

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-آیرودینامیک

بررسی آزمایشگاهی تاثیر دیمپل های سطحی بر رفتار هیدرودینامیکی سقوط اجسام کروی در داخل آب

نگارنده:

حسین شکری

استاد راهنما:

دکتر پوریا اکبرزاده

تقدیم اثر

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایشار و از خودگذشتگان
به پاس عاطفه سرشار و کرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرکردانی و ترس در پناهمشان به شجاعت می گرید
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند
این مجموعه را به روح پدر بزرگوار و ماد و همسر عزیزم تقدیم می کنم.

تشکر و قدردانی

خداوند سبحان را سپاسگذارم که بیهوده حقیر توفیق انجام و اتمام پژوهش حاضر را عنایت فرمود. با تشکر از مهربانترین همراهان
زندگیم، پدر، مادر، همسر عزیزم که حضورشان همیشه کرمابخش روح من بوده است. از استاد راهنمای گرامی که با قدرم جناب
آقای دکتر پوریا اکبرزاده که وجودشان همیشه قوتی برای انجام کارهایم بوده است و بدون شک انجام این پایان نامه بدون
کمال و راهنمایی های ارزنده آنها امکان پذیر نبوده است، کمال تشکر را دارم.

و در پایان از تمامی اساتید محترم دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که در مقاطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته و مرا
از سرچشمه دانایی سیراب کرده اند، تشکر کرده و برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی می کنم.

تهدنامه

اینجانب حسین شکری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی هوافضا گرایش آئرو دینامیک دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی تاثیر دیمپل های سطحی بر رفتار هیدرو دینامیکی سقوط اجسام کروی در داخل آب تحت راهنمایی دکتر پوریا اکبرزاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

افزایش راندمان تجهیزات دریایی و آبی موضوع بسیاری از تحقیقات صنعتی و مهندسی در سال‌های اخیر است. ایجاد تغییرات سطحی یکی از روش‌های ساده، ارزان، با ماندگاری بالا و بدون آلودگی زیست‌محیطی در تغییر رفتار هیدرودینامیکی اجسام در سیالات است. در مطالعه حاضر، به تأثیر دیمپل‌های سطحی در رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی با قطر ۲۰ میلی‌متر پرداخته شده است. این مطالعه به صورت آزمایشگاهی و با هفت گوی فلزی متفاوت، شامل یک گوی بدون دیمپل و شش گوی دارای دیمپل سطحی انجام شده است. بررسی رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی در آب توسط تصویربرداری با استفاده دوربین پرسرعت با نرخ ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه و تحلیل تصاویر با نرم‌افزار مخصوص پردازش تصویر صورت گرفته است. گوی‌های فلزی در پنج ارتفاع رهاسازی متفاوت، در بازه اعداد بی‌بعد به صورت، عدد فراد (۱ الی ۲۰۰)، عدد رینولدز (۷۰۱۹ الی ۹۹۱۱۸)، عدد وبر (۱۳/۵۸ الی ۲۷۱۶/۶)، عدد باند (۱۳/۵۸) و عدد موینگی (۰/۰۰۳۸۳ الی ۰/۰۵۴۶۹) در سه رژیم برخورد شبه استاتیک، جدایش نیمه عمیق و جدایش عمیق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. گوی بدون دیمپل سطحی تنها در رژیم برخورد با عدد فراد ۲۰۰ کاواک کوچک تشکیل می‌دهد و در اعداد فراد کمتر از آن کاواک تشکیل نمی‌دهد و در طی مسیر حرکت در آب منحرف می‌شود. تمامی گوی‌های دارای دیمپل‌های سطحی در رژیم‌های برخورد با عدد فراد بیشتر از ۴۰ کاواک تشکیل می‌دهند و در طی مسیر حرکت در آب سرعت بیشتری دارند و از مسیر حرکت نیز منحرف نمی‌شوند و پایداری خوبی دارند. دو گوی دارای دیمپل‌های سطحی با پنج ردیف دیمپل در رژیم‌های برخورد با عدد فراد بیشتر از ۱۰ نیز کاواک‌های قابل توجه و بزرگی تشکیل می‌دهند. گوی‌های دارای سه و پنج ردیف دیمپل‌های سطحی از دو گوی دارای یک ردیف دیمپل‌های سطحی در تمامی رژیم‌های برخورد کاواک‌های قابل توجه تر و بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند.

کلمات کلیدی: گوی دارای دیمپل سطحی، نحوه شکل‌گیری کاواک، مفاهیم ورود پرتابه در آب، انواع رژیم

برخورد

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱-

۲-

۳-

فهرست مطالب

فهرست اشکال.....	ز
فهرست علائم.....	ض
فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ سابقه موضوع.....	۴
۱-۲-۱ پژوهش‌های تجربی.....	۴
۲-۲-۱ پژوهش‌های تحلیلی.....	۱۰
۳-۲-۱ پژوهش‌های عددی.....	۱۲
۳-۱ ضرورت انجام تحقیق.....	۱۴
۴-۱ نوآوری پژوهش.....	۱۴
۵-۱ ساختار پایان‌نامه.....	۱۵
فصل ۲: تئوری برخورد و نیروهای حاکم.....	۱۷
۱-۲ نیروهای حاکم.....	۱۹
۱-۱-۲ نیروی شناوری.....	۲۰
۲-۱-۲ نیروی کشش سطحی.....	۲۱
۳-۱-۲ نیروی هیدرودینامیکی.....	۲۲
۲-۲ مفاهیم برخورد.....	۲۲
۱-۲-۲ پارامترهای کلیدی.....	۲۲
۱-۱-۲-۲ زاویه تماس.....	۲۳
۲-۱-۲-۲ آب‌گریزی و آب‌دوستی.....	۲۳

- ۲۵.....۲-۲-۲ اعداد بی بعد
- ۲۶.....۳-۲-۲ معرفی کاواک و بخش های مختلف کاواک
- ۲۶.....۱-۳-۲-۲ کاواک
- ۲۷.....۲-۳-۲-۲ نقطه جدایش کاواک
- ۲۷.....۳-۳-۲-۲ پرده پاشش آب
- ۲۸.....۴-۳-۲-۲ جت شعاعی
- ۲۹.....۵-۳-۲-۲ ورتینگتون جت
- ۳۰.....۶-۳-۲-۲ ریپل
- ۳۰.....۴-۲-۲ طبقه بندی مسئله ورود پرتابه در آب، بر اساس مکانیسم تشکیل کاواک
- ۳۰.....۱-۴-۲-۲ مکانیسم نفوذ هوا
- ۳۱.....۲-۴-۲-۲ مکانیسم سوپر کاویتاسیون
- ۳۲.....۳-۴-۲-۲ مکانیسم لیدن فراست
- ۳۳.....۵-۲-۲ رژیم های برخورد
- ۳۳.....۱-۵-۲-۲ رژیم شبه استاتیک
- ۳۴.....۲-۵-۲-۲ رژیم جدایش نیمه عمیق
- ۳۴.....۳-۵-۲-۲ رژیم جدایش عمیق
- ۳۵.....۴-۵-۲-۲ رژیم جدایش سطحی

فصل ۳: معرفی مسئله و تجهیزات آزمایشگاهی..... ۳۷

۳-۱ معرفی مسئله..... ۳۸

۳-۲ معرفی پرتابه و تجهیزات آزمایشگاهی..... ۳۸

۳-۳ نحوه ایجاد دیمپل بر روی سطح گوی ها..... ۴۰

۳-۴ تصویربرداری..... ۴۱

۳-۵ نورپردازی..... ۴۲

۳-۶-۱ تصاویر نوع ۱..... ۴۳

۳-۶-۲ تصویر نوع ۲..... ۴۴

۳-۶-۳ تصویر نوع ۳..... ۴۵

۳-۷ نحوه سقوط گوی ها..... ۴۶

۳-۸ پردازش تصویر..... ۴۷

فصل ۴: نتایج..... ۴۹

۴-۱ نتایج رهاسازی گوی های فلزی از ارتفاع ۰/۵ سانتی متر..... ۵۰

۴-۲ نتایج رهاسازی گوی های فلزی از ارتفاع ۱۰ سانتی متر..... ۵۴

۴-۳ نتایج رهاسازی گوی های فلزی از ارتفاع ۳۰ سانتی متر..... ۶۴

۴-۴ نتایج رهاسازی گوی های فلزی از ارتفاع ۷۵ سانتی متر..... ۷۵

۴-۵ نتایج رهاسازی گوی های فلزی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر..... ۸۷

فصل ۵: نتیجه گیری..... ۹۹

۵-۱ بحث و نتیجه گیری..... ۱۰۰

۵-۲ پیشنهادها..... ۱۰۲

مراجع..... ۱۰۳

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: کاهش نیروی پسا در لباس غواصان [۴]..... ۳
- شکل ۲-۱: استفاده از تزریق هوا در کشتی جهت کاهش نیروی پسا [۴]..... ۳
- شکل ۳-۱: شلیک اژدر MU90 از ناو جنگی [۵]..... ۴
- شکل ۱-۲: ورود گوی شیشه‌ای صاف و گوی شیشه‌ای با پوشش دوده در آب ۱۸
- شکل ۲-۲: دیاگرام نیروهای وارد بر گوی..... ۱۹
- شکل ۳-۲: دیاگرام نیروی شناوری وارد بر یک گوی در آب [۳۷]..... ۲۰
- شکل ۴-۲: دو نمونه از اثرات کشش سطحی [۲]..... ۲۱
- شکل ۵-۲: دیاگرام غرق شدن یک گوی آب‌گریز در آب در رژیم برخورد شبه استاتیک [۳]..... ۲۱
- شکل ۶-۲: زاویه تماس بین سیال و سطح جامد [۳۹]..... ۲۳
- شکل ۷-۲: دسته‌بندی خاصیت آب‌گریزی و آب‌دوستی با استفاده از زاویه تماس [۴۱]..... ۲۴
- شکل ۸-۲: تأثیر خاصیت آب‌گریزی در شکل‌گیری کاواک [۴۱]..... ۲۴
- شکل ۹-۲: مراحل شکل‌گیری کاواک در اثر ورود گوی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر .. ۲۶
- شکل ۱۰-۲: تکرار چندین جدایش متوالی در مراحل فروپاشی کاواک [۱۰]..... ۲۷
- شکل ۱۱-۲: روند شکل‌گیری پرده پاشش آب توسط گوی فولادی [۴۶]..... ۲۷
- شکل ۱۲-۲: انواع شکل‌های پرده پاشش آب [۴۷]..... ۲۸
- شکل ۱۳-۲: روند تشکیل جت شعاعی در اثر برخورد پرتابه به سطح آب..... ۲۸
- شکل ۱۴-۲: شکل‌گیری ورتینگتون جت در اثر ورود گوی آب‌دوست و آب‌گریز [۴۸]..... ۲۹
- شکل ۱۵-۲: نمونه‌ای از رپل‌های ایجاد شده بر روی سطح کاواک [۵۰]..... ۳۰
- شکل ۱۶-۲: تشکیل کاواک با مکانیسم نفوذ هوا در اثر سقوط توپ بلیارد در آب [۴۲]..... ۳۱
- شکل ۱۷-۲: تشکیل کاواک با مکانیسم کاویتاسیون در اثر ورود گلوله در آب [۴۲]..... ۳۱
- شکل ۱۸-۲: تأثیر دمای پرتابه در شکل‌گیری کاواک [۴۵]..... ۳۲
- شکل ۱۹-۲: کاواک‌های تشکیل شده توسط مکانسیم لیدن فراست [۱۷]..... ۳۲
- شکل ۲۰-۲: روند تشکیل کاواک در رژیم شبه استاتیک توسط گوی فلزی $S_{5,8}$ ۳۳
- شکل ۲۱-۲: روند شکل‌گیری کاواک در رژیم جدایش نیمه عمیق توسط گوی فلزی آب‌گریز [۹]..... ۳۴
- شکل ۲۲-۲: روند شکل‌گیری کاواک در رژیم جدایش عمیق توسط ورود گوی فلزی آب‌گریز در آب [۹]..... ۳۵
- شکل ۲۳-۲: روند شکل‌گیری کاواک در رژیم جدایش سطحی توسط ورود گوی فلزی آب‌گریز در آب [۹]..... ۳۵
- شکل ۱-۳: تصویر گوی‌های فلزی مورد استفاده در این مطالعه ۳۹
- شکل ۲-۳: مشخصات شش گوی دارای دی‌مپل‌های سطحی مورد مطالعه ۳۹
- شکل ۳-۳: دستگاه صفحه تقسیم تایکوپ ۴۰

- شکل ۳-۴: روش ماشین کاری اسپارک ۴۱
- شکل ۳-۵: دوربین pco dimaxs s از سه نمای مختلف [۵۲] ۴۲
- شکل ۳-۶: نمایش محیط نرم افزار camware v3.17 ۴۲
- شکل ۳-۷: شکل چینش تجهیزات برای تصاویر نوع ۱، ۲ و ۳ ۴۳
- شکل ۳-۸: لنز ۱۰۵ میلی متری AF-S VR Micro-Nikkor [۵۳] ۴۴
- شکل ۳-۹: نمونه‌ای از تصویر نوع ۱ جهت مشاهده جزئیات دقیق از کاواک و پرده پاشش آب ۴۴
- شکل ۳-۱۰: لنز ۸۵ میلی متری carl zeiss 85mm f/1.4 planar [۵۴] ۴۵
- شکل ۳-۱۱: نمونه از تصویر نوع ۲ جهت مشاهده مراحل شکل گیری کاواک و نقطه جدایش کاواک ۴۵
- شکل ۳-۱۲: نمونه‌ای از شکل نوع ۳ جهت پردازش تصویر ۴۶
- شکل ۳-۱۳: شکل شماتیک نحوه رهاسازی و تصویربرداری ورود گوی فلزی در آب [۵۵] ۴۷
- شکل ۳-۱۴: تصویری از محیط نرم افزار پردازش تصویر ۴۸
- شکل ۴-۱: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع ۰/۵ سانتی متر ۵۱
- شکل ۴-۲: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع ۰/۵ سانتی متر ۵۱
- شکل ۴-۳: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع ۰/۵ سانتی متر ۵۲
- شکل ۴-۴: نمودار تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۰/۵ سانتی متری ۵۳
- شکل ۴-۵: نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۰/۵ سانتی متری ۵۴
- شکل ۴-۶: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۱) ۵۵
- شکل ۴-۷: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۲) ۵۵
- شکل ۴-۸: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۱) ۵۶
- شکل ۴-۹: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۲) ۵۶
- شکل ۴-۱۰: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{3,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۱) ۵۸
- شکل ۴-۱۱: تصویر روند توسعه کاواک توسط گوی فلزی $S_{3,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۲) ۵۸
- شکل ۴-۱۲: تصویر روند فروریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{3,8}$ در آب (تصویر نوع ۳) ۵۹
- شکل ۴-۱۳: نمودار تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متری ۶۰
- شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متری ۶۱
- شکل ۴-۱۵: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر ۶۲

- شکل ۴-۱۶: نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر ۶۳
- شکل ۴-۱۷: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر ۶۳
- شکل ۴-۱۸: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱) ۶۵
- شکل ۴-۱۹: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۲) ۶۵
- شکل ۴-۲۰: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱) ۶۶
- شکل ۴-۲۱: تصویر روند توسعه و فروریزش کاواک توسط گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب (تصویر نوع ۲) ۶۷
- شکل ۴-۲۲: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱) ۶۸
- شکل ۴-۲۳: روند شکل‌گیری پرده پاشش آب و ورتینگتون جت در اثر ورود گوی $S_{5,12}$ ۶۸
- شکل ۴-۲۴: تصویر روند توسعه و شکل‌گیری کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب (تصویر نوع ۲) ۶۹
- شکل ۴-۲۵: تصویر روند فروریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب (تصویر نوع ۳) ۶۹
- شکل ۴-۲۶: نمودار تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۳۰ سانتی‌متری ۷۲
- شکل ۴-۲۷: نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۳۰ سانتی‌متری ۷۲
- شکل ۴-۲۸: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر ۷۳
- شکل ۴-۲۹: نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر ۷۴
- شکل ۴-۳۰: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر ۷۵
- شکل ۴-۳۱: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱) ۷۶
- شکل ۴-۳۲: تصویر نحوه طی کردن مسیر گوی فلزی $S_{0,0}$ در استخر آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۳) ۷۷
- شکل ۴-۳۳: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱) ۷۸
- شکل ۴-۳۴: تصویر روند توسعه کاواک توسط گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۲) ۷۹
- شکل ۴-۳۵: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{3,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱) ۸۰
- شکل ۴-۳۶: تصویر روند توسعه کاواک توسط گوی فلزی $S_{3,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۲) ۸۱
- شکل ۴-۳۷: تصویر روند فروریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{3,12}$ در آب (تصویر نوع ۳) ۸۱

- شکل ۴-۳۸: نمودار تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۷۵ سانتی متری..... ۸۳
- شکل ۴-۳۹: نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۷۵ سانتی متری..... ۸۴
- شکل ۴-۴۰: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۷۵ سانتی متر ۸۵
- شکل ۴-۴۱: نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۷۵ سانتی متر ۸۶
- شکل ۴-۴۲: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۷۵ سانتی متر ۸۶
- شکل ۴-۴۳: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۱)..... ۸۸
- شکل ۴-۴۴: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۲)..... ۸۸
- شکل ۴-۴۵: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۱)..... ۸۹
- شکل ۴-۴۶: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۲)..... ۹۰
- شکل ۴-۴۷: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۱)..... ۹۰
- شکل ۴-۴۸: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۲)..... ۹۲
- شکل ۴-۴۹: تصویر روند شکل گیری و فروریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب (تصویر نوع ۳)..... ۹۲
- شکل ۴-۵۰: نمودار تغییرات مکان مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۱۰۰ سانتی متری..... ۹۴
- شکل ۴-۵۱: نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۱۰۰ سانتی متری..... ۹۵
- شکل ۴-۵۲: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۱۰۰ سانتی متر ۹۶
- شکل ۴-۵۳: نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۱۰۰ سانتی متر ۹۷
- شکل ۴-۵۴: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رها سازی ۱۰۰ سانتی متر ۹۷

فهرست علائم

h_c [m]	ارتفاع رها سازی گوی
H_p [m]	ارتفاع نقطه جدایش کاواک
m_a [kg]	جرم اضافه شده سیال
m	جرم گوی
ρ [kg/m ³]	چگالی
z	راستای محور مختصات
ψ	زاویه کاواک با محور افقی
t [s]	زمان
t_{pinch} [s]	زمان نقطه جدایش کاواک
U_0 [m/s]	سرعت برخورد گوی به سطح آب
$\frac{d^2z}{dt^2}$ [m/s ²]	شتاب لحظه ای گوی
R_0 [m]	شعاع گوی
R_a	صافی سطح
C_f	ضریب نیروی هیدرودینامیکی
L [m]	طول کاواک
Bo	عدد باند
Re	عدد رینولدز
Fr	عدد فراد
Ca	عدد موینگی
W	عدد وبر
D_{pinch} [m]	قطر کاواک در نقطه جدایش
D_0 [m]	قطر گوی
σ [N/m]	کشش سطحی
μ [Pa. s]	لزجت دینامیک
$S_{x,y}$	نماد گوی ها
F_b	نیروی شناوری
F_c	نیروی کشش سطحی
F_h	نیروی هیدرودینامیکی

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

دینامیک سیالات یکی از زیرمجموعه‌های مهم، پرکاربرد و جذاب مکانیک سیالات به شمار می‌رود که خود به دوشاخه هیدرودینامیک و آئرو دینامیک تقسیم می‌شود. حرکت یک جسم صلب داخل سیال، منجر به وارد شدن نیرو به جسم و سیال خواهد شد. برای طراحی و ساخت یک قطعه، سازه و هر وسیله‌ای با ویژگی و هدف مشخص می‌بایست شناخت کافی از نیروهای وارد بر آن داشت. هنگامی که یک جسم جامد به سطح آب برخورد می‌کند ممکن است کاواک^۱ ایجاد کند که شکل آن بر مسیر حرکت جسم تأثیر بگذارد [۱]. برای پیش‌بینی نحوه حرکت، نیروهای وارد بر آن، سرعت و ویژگی‌های دیگر جسم در داخل آب می‌بایست شناخت کافی از رفتار هیدرودینامیکی آن داشت. پدیده ورود جسم در داخل آب یکی از موضوعات مهم و پرکاربرد در علم هیدرودینامیک است. برای نمونه می‌توان به حرکت کشتی بر روی آب، فرود یک هواپیما بر روی آب، ورود موشک به داخل آب، در ورزش‌های آبی، علت راه رفتن مارمولک باسیلیسک بر روی آب و کاربردهای فراوان دیگر اشاره کرد [۲]. در سال‌های اخیر به‌خصوص پس از پیشرفت در تصویربرداری با سرعت بالا، تحقیقات فراوانی بر روی موضوع ورود جسم و پرتابه به داخل آب و مطالعه رفتار هیدرودینامیکی آن انجام گرفته است. روش‌هایی که جهت تغییر در رفتار هیدرودینامیکی جسم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از، پلیمرهای حل شونده، تزریق میکرو حباب‌ها، رنگ‌های آب‌گریز، محلول‌های پلیمری و صابونی، پدیده سوپر کاویتاسیون^۲ و لیدن فراست^۳ [۳]. استفاده از روش‌های پوشش‌های پلیمری و صابونی و رنگ‌های آب‌گریز معمولاً آلودگی زیست محیطی زیادی دارند و پوشش‌های گرانی هستند و ماندگاری به نسبت کمی هم دارند. یکی دیگر از روش‌های تأثیرگذار بر روی رفتار هیدرودینامیکی اجسام، ایجاد تغییرات سطحی بر روی جسم مانند ایجاد زبری، شیار و حفره است که روشی به نسبت ارزان‌تر، بدون آلودگی زیست محیطی و

1 cavity

2 supercavitation

3 Leidenfrost

همراه با ماندگاری بالا است. درواقع با شناخت رفتار هیدرودینامیکی و نیروهای وارد بر جسم متحرک در داخل آب می‌توان نیروهای وارد بر آن را کنترل کرد که کاربردهای بسیاری در صنایع نظامی، صنایع دریایی، ورزشی (شکل ۱-۱) و ... خواهد داشت. برای مثال با کاهش نیروی پسا وارد بر کشتی با استفاده از تزریق هوا در کف کشتی مطابق شکل ۱-۲ می‌توان مصرف سوخت را کاهش داد و با کاهش نیروی پسا وارد بر گلوله‌ها و اژدرهای زیرآبی برد و سرعت آن‌ها را بالا برد (شکل ۱-۳). هدف از این تحقیق بررسی تأثیر ایجاد دیمپل^۱ در سطح اجسام کروی در آرایش‌ها و تعداد مختلف و اثر آن بر رفتار هیدرودینامیکی و تغییرات سرعت و نیروهای وارد بر جسم خواهد بود.



شکل ۱-۱: کاهش نیروی پسا در لباس غواصان [۴]



شکل ۱-۲: استفاده از تزریق هوا در کشتی جهت کاهش نیروی پسا [۴]



شکل ۱-۳: شلیک اژدر MU90 از ناو جنگی [۵]

۱-۲ سابقه موضوع

محققان متعددی پدیده ورود پرتابه‌ها را در درون سیال، بررسی کردند. تحقیقات با مطالعه ورود به آب گوی‌ها و کشتی‌ها، انواع موشک‌ها، بسته به کاربرد تجاری و نظامی آغاز شد. در قرن جدید به دلیل در دسترس بودن ابزار اندازه‌گیری با قابلیت اطمینان بیشتر و دقیق‌تر، تحقیقات زیادی در زمینه ورود پرتابه در سیال با پارامترهای مختلف برخورد و شرایط سطح متفاوت در حال انجام است. در این قسمت پژوهش‌های انجام شده به سه بخش مختلف تقسیم شده است: ۱- پژوهش‌های تجربی ۲- پژوهش‌های تحلیلی ۳- پژوهش‌های عددی

۱-۲-۱ پژوهش‌های تجربی

اولین مطالعه سیستماتیک در مورد ورود پرتابه به درون آب از بیش از یک قرن پیش توسط ورتینگتون و کول (۱۸۹۷ و ۱۹۰۰) با استفاده از عکاسی جرقه‌ای انجام گرفت. مطالعات بعدی و برخی توضیحات کیفی در مورد کاواک‌ها توسط مالوک و بل در سال ۱۹۲۴ انجام گرفت. پس از پیشرفت در دوربین‌های عکس‌برداری با سرعت بالا، علاقه به پژوهش در زمینه فیزیک برخورد پرتابه‌ها در سیال، بیشتر شد؛ و پژوهش‌های بسیار قوی انجام گرفت [۶].

در پژوهش‌های انجام گرفته توسط دوئز و همکاران [۷] گوی‌های فولادی، شیشه‌ای، آلومینیومی در ابعاد متفاوت با پوشش نانومتریک در درون آب، محلول اتانول، ایزوپروپانول و مخلوط آب و گلیسرول در ارتفاع‌های متفاوت رها شدند و رفتار آن‌ها در سیال و نحوه تشکیل کاواک بررسی گردید با تغییر سرعت پرتابه ثابت کردند که یک کاواک در طول برخورد فقط در سرعت‌های بالاتر از سرعت آستانه^۱ ایجاد می‌شوند و سرعت آستانه نیز با زاویه برخورد^۲ مرتبط است. با مقایسه گوی‌های آب‌دوست^۳ و آب‌گریز^۴ به این نتیجه رسیدند که عامل کلیدی در تشکیل کاواک خاصیت تر شوندگی^۵ سطح پرتابه است. منصور و همکاران [۸] به مطالعه در مورد برخورد گلوله‌های لیدن فراست به سطح آب پرداختند. آن‌ها گلوله‌های لیدن فراست در قطرهای ۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر و در دمای ۵۷ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را در درون آب رها کردند و یک تحقیق تجربی در مورد شکل‌گیری کاواک‌های مارپیچی^۶ و کاواک‌های ساده پایدار انجام دادند. کاواک‌های مارپیچی در اعداد رینولدز^۷ بزرگ‌تر از $10^6 \times 14$ رخ می‌دهند و ضریب نیروی پسا نسبت به کاواک‌های ساده پایدار ۴۰ تا ۵۵ درصد پایین‌تر است، به‌علاوه ضریب نیروی پسا در مراحل اولیه تشکیل کاواک و قبل از فروپاشی آن تا ۷۵ درصد کمتر است. در پژوهش انجام شده توسط آریستوف و همکاران [۹] یک تحقیق ترکیبی تجربی و نظری در برخورد گوی‌های آب‌گریز به سطح آب انجام گرفت. در این تحقیق گوی‌ها با پوشش wx2100 آب‌گریز گردیدند و در ارتفاع‌های متفاوت در درون آب رها شدند و با دوربین با سرعت بالا از لحظه‌ی برخورد و ورود به آب، عکس‌برداری گردید سرعت برخورد گوی‌ها به سطح آب در بازه ۳۰ تا ۵۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه بود در بررسی روند شکل‌گیری کاواک‌ها، مشاهده گردید با افزایش سرعت برخورد و عدد وبر^۸، کاواک‌های قابل توجه‌تری تشکیل گردید. در این مطالعه آریستوف و همکاران در اعداد وبر متفاوت ۴ نوع رژیم متفاوت معرفی

1 Threshold Velocity

2 Contact Angle

3 Hydrophilic

4 Hydrophobic

5 Wettability

6 Helical Cavity

7 Reynolds Number

8 Weber Number

کردند. همچنین طبق بررسی‌های انجام شده، عامل اصلی متلاشی شدن کاواک‌ها کشش سطحی معرفی گردید. همچنین برای توصیف شکل کاواک‌ها یک مدل نظری مبتنی بر راه حل ریلی بی‌سنت^۱ ارائه نمودند. ژانگ و همکاران [۱۰] یک مطالعه تجربی، در مورد تکامل کاواک و فروریزش^۲ کاواک تولید شده توسط گوی‌های فولادی آب‌گریز پرتاب شده درون آب، ارائه دادند. از عکس‌برداری با سرعت‌بالا برای درک مکانیسم فروریزش کاواک استفاده شد، همچنین از هیدروفون برای اندازه‌گیری فشار در زیر آب استفاده گردید. دو رژیم فروریزش مجزا: ۱- فروریزش منظم حباب هوا^۳ و ۲- فروریزش ناپایدار ابری هوا^۴ معرفی شد. با تغییر ارتفاع برخورد و اندازه گوی، وابستگی این دو رژیم فروریزش به اعداد وبر و باند^۵ اثبات شد. با افزایش عدد باند یا قطر گوی، فروریزش کاواک از حالت حباب منظم هوا به حالت ابری هوا تبدیل می‌شود. زمانی که فروریزش منظم حباب هوا رخ می‌دهد، فروریزش تقریباً دوره‌ای حباب‌های بزرگ باعث نوسانات فشار، فرکانس پایین در آب می‌شود، که می‌تواند به‌وضوح توسط هیدروفون ثبت گردد. این ارتعاشات با فرکانس پایین به منشأ صوتی جدید تبدیل می‌شوند و در طول فرایند سقوط به‌طور مکرر باعث ایجاد موج در سطح کاواک می‌شوند بدین‌وسیله پدیده فروریزش کاواک به‌عنوان فروریزش صوتی^۶ نام‌گذاری گردید و رابطه بین فروریزش حباب و موج‌دار شدن کاواک اثبات شد. نتایج تجربی نشان داد که انواع مختلف رژیم‌های کاواک تأثیر قابل توجهی در مکانیسم فروریزش کویتی دارند. در مورد رژیم جدایش سطحی^۷، فروریزش ابری هوا در محیط‌های با عدد باند زیاد و فروریزش منظم حباب هوا در عدد باند نسبتاً کم رخ می‌دهد. در تمام موارد رژیم جدایش عمیق^۸، فروریزش ابری هوا مشاهده می‌شود. یک رژیم جدایش عمیق همیشه باعث تشدید طنین صدای کاواک

1 Rayleigh–Besant problem

2 Shedding

3 Regular air-bubble shedding

4 unstable air-cloud shedding

5 Bond Number

6 Acoustic shedding

7 Surface Seal

8 Deep seal

و کوچک شدن سریع طول کاواک می‌شود. در سال ۱۹۴۸، اولین بار توسط گیلبارگ و اندرسون [۱۱] اهمیت فشار جو بر دینامیک کاواک برجسته شد. آن‌ها تشکیل و فروپاشی کاواک به وجود آمده از برخورد گوی‌ها در آب را تحت تأثیر فشار جو بررسی کردند. آزمایش‌های مربوط به برخورد گوی‌ها به سطح آب با مقادیر مختلف فشار جو و سرعت برخورد بین $4/5$ تا 30 متر بر ثانیه در جهت عمودی انجام شد. تحقیقات نشان داد که دینامیک کاواک‌ها و روند شکل‌گیری کاواک‌ها به شدت تحت تأثیر تغییر فشار جو قرار دارد. زمان نقطه جدایش کاواک^۱ نیز تحت تأثیر فشارهای مختلف جو محاسبه شد. در سال ۲۰۰۹، با استفاده از عکاسی با سرعت بالا، جهت مشاهده رفتار کاواک در زیر آب، مطالعه تجربی روی پرتابه‌های بالستیک با زاویه ورود (۵ تا ۱۵ درجه)، اعداد ماخ بین $0/3$ تا ۱ توسط تراسکات و همکاران [۱۲] انجام شد. دینامیک پرتابه، شکل‌گیری کاواک و زاویه ورود بحرانی^۲ برای هندسه‌های مختلف پرتابه مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج به دست آمده نتیجه‌گیری شد که، کاهش اندازه دماغه پرتابه به طور قابل توجهی عملکرد این پرتابه‌ها را بهبود می‌بخشد و پدیده ورود پرتابه به آب به طور قابل توجهی تحت تأثیر هندسه دماغه پرتابه و نسبت طول به قطر قرار دارد. آریستوف و همکاران [۱] مطالعاتی را در مورد سقوط عمودی گوی‌های فلزی با چگالی پایین در آب انجام دادند. آن‌ها به توصیف شکل‌گیری کاواک و تأثیر کاهش سرعت گوی بر شکل‌گیری کاواک پرداختند. از نتایج به دست آمده متوجه شدند شکل کاواک به طور قابل توجهی تحت تأثیر چگالی گوی است. گو و همکاران [۱۳] دینامیک کاواک و مسیر حرکت زیر آب گلوله‌های تپانچه کامل و گلوله‌های نیم کروی را توسط دوربین‌هایی با وضوح بالا بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌ها را در ۶ سرعت متفاوت انجام دادند و نتیجه گرفتند که، پایداری مسیر به طور قابل توجهی تحت تأثیر شکل دماغه پرتابه قرار دارد و گلوله‌های نیم کروی پایداری بهتری دارند. آن‌ها یک مدل جهت محاسبه کاهش سرعت گلوله در آب ارائه دادند که با نتایج تجربی تطابق داشت. در مطالعه تجربی دیگر [۱۴] در سال ۲۰۱۴ برخورد عمودی و مورب^۳ پرتابه‌های باریک

1 Cavity Pinch off

2 Critical Entry Angle

3 Oblique Impact

و متقارن با پوشش‌های سطحی مختلف و با سه نوع دماغه متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. مسیر حرکت و نیرو و ضرایب برا و پسا محاسبه گردید، از نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که شکل دماغه پرتابه، بر جابجایی عرضی^۱ گلوله تأثیر می‌گذارد. و در ورود مورب پرتابه در آب، حداکثر جابجایی عرضی برای پرتابه با دماغه مخروطی به دست آمد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که جابجایی جانبی به دلیل نیروی برا رخ داده است. همچنین حداکثر نیروی برخورد برای پرتابه با دماغه تخت در برخورد عمودی به دست آمد. با این حال، در هنگام ورود مورب پرتابه در آب، نیروی برخورد کاهش یافت. ژانگ و همکاران [۱۵] ورود به آب پرتابه‌ها را با اشکال مختلف دماغه و سرعت (۲۰-۲۰۰ متر بر ثانیه) با تمرکز بر مسیر حرکت پرتابه بررسی کردند. انحراف از مسیر برای دماغه‌های تخت، قوس‌دار^۲ نوک‌تیز^۳، نیم کروی و مخروطی مقایسه شد. با بررسی داده‌های تجربی، نتیجه‌گیری شد که شکل دماغه تخت از پایداری بهتری برخوردار است. با افزایش سرعت برخورد، بهبود پایداری مسیر حرکت پرتابه مشاهده شد. در پژوهش انجام شده [۱۶] در سال ۲۰۱۷، با استفاده از دوربین‌های با وضوح بالا و روش‌های پردازش تصویر، پدیده‌های تشکیل کاواک به‌صورت تجربی بررسی شد. گوی‌های الاستومری^۴ تاکنون برای پدیده برخورد به درون آب مورد مطالعه قرار نگرفته بودند. هورد و همکاران اولین کسانی بودند که بر ویژگی‌های برخورد گوی‌های تغییر شکل‌پذیر الاستومریک تمرکز کردند. در آزمایش‌های انجام‌شده مشاهده شد که کاواک‌های ایجاد شده توسط گوی‌های تغییر شکل‌پذیر، عرض بیشتر و عمق کمتری نسبت به کاواک‌های ایجاد شده توسط، گوی‌های صلب دارند. رفتار گوی‌های تغییر شکل‌پذیر، در مسئله ورود به آب، به دلیل تغییر شکل‌های قابل توجه ناشی از برخورد و ارتعاشات مواد، متفاوت است. از آزمایش‌های انجام شده نتیجه‌گیری شد که، تغییر شکل و ارتعاشات گوی الاستومری را می‌توان، از ویژگی‌های مواد و شرایط برخورد ارزیابی کرد. لی و همکاران [۱۷] ایجاد کاواک ناشی از برخورد گوی‌های گرم شده هنگام ورود

1 Lateral Displacement

2 Conical

3 Ogive

4 Elastomeric

به آب را بررسی کرد. نشان داده شد که شکل‌گیری کاواک، برای آب با دمای های متفاوت، تحت تأثیر دمای گوی قرار دارد. همچنین مشاهده شد که تشکیل کاواک و شکل ظاهری آن تحت تأثیر شدت انتقال حرارت و حالت‌های جوشش قرار دارد. چن و همکاران [۱۸] دینامیک کاواک، ویژگی‌های هیدرودینامیکی و مسئله ورود زاویه‌دار پرتابه‌های با سرعت بالا را در آب را مطالعه کردند. مطالعات تجربی پرتابه‌ها با سرعت برخورد متفاوت (۱۰۰-۱۷۵ متر بر ثانیه) و زاویه ورود متفاوت با استفاده از یک اسلحه گازی سبک و فناوری عکس‌برداری سرعت بالا انجام شد. مسیر پرتابه، تشکیل کاواک، رشد و جدایش کاواک، بسته شدن سطحی کاواک^۱ و ضریب پسا بررسی شد. نتایج نشان داد که زمان بسته شدن^۲ کاواک به زاویه برخورد و عدد کاویتاسیون^۳ بستگی دارد. همچنین مشخص شد که شکل دماغه پرتابه تأثیر قابل توجهی بر نیروی پسا دارد، اما نسبت طول به قطر پرتابه هیچ تأثیری بر روی نیروی پسا ندارد. در مطالعه انجام شده توسط اسپیرس [۱۹] و همکاران، با تغییر زاویه تماس گوی‌ها، ورود به آب گوی‌ها به‌طور تجربی بررسی شد. از آزمایش‌های انجام گرفته نتیجه‌گیری شد که زاویه تماس بر شکل کاوک تأثیر می‌گذارد. همچنین مشاهده شد شکل‌گیری و رفتار پرده پاشش آب^۴ به‌طور قابل توجهی بر شکل‌گیری کاواک تأثیر می‌گذارد. در مطالعه دیگر توسط اسپیرس و همکاران [۲۰] به‌طور تجربی ورود به آب گوی در یک جت آب مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که اگر جت مایع، زودتر از گوی به آب برخورد کند، نیروهای برخورد به میزان قابل توجهی (تا ۷۵٪) کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه‌گیری شد که تأثیر جرم اضافه شده^۵ با شتاب بخشیدن به آب ساکن، کاهش پیدا می‌کند. پیشرفت در این تحقیق می‌تواند به کاهش نیروی برخورد هیدرودینامیکی بر روی اشیایی که در آب رها می‌شوند مانند وسایل نقلیه و موشک‌ها کمک کند. شی و همکاران [۲۱] ویژگی‌های کاواک‌های تشکیل شده از پرتابه‌های کم‌سرعت را با پارامترهای مختلف پرتاب بررسی کردند. اثر شکل دماغه پرتابه، سرعت برخورد

1 Surface Closure

2 Cavity Closure

3 Cavitation Number

4 Splash Crown

5 Added Mass

و زاویه پرتاب بر شکل کاواک، زمان جدایش کاواک، عمق جدایش کاواک و رپل‌ها (موج‌های تشکیل شده بر روی سطح کاواک)^۱ مورد بحث قرار گرفت. مشاهده شد که قطر کاواک با افزایش زاویه دماغه پرتابه افزایش می‌یابد که در نتیجه جدایش سطحی را تسریع می‌کند. همچنین عمق جدایش کاواک و زمان جدایش کاواک تحت تأثیر زمان وقوع جدایش سطحی هستند.

۲-۲-۱ پژوهش‌های تحلیلی

نخستین مطالعات تحلیلی در تعیین میزان نیروهای حاصل از برخورد اجسام به سطح آب توسط ون کارمن [۲۲] در هنگام فرود هواپیمای آبی در سطح آب انجام گرفت. کارمن با استفاده از مفهوم جرم اضافه شده و اصل بقای مومنتوم، توصیف فیزیکی اولیه‌ای از پدیده ورود به آب ارائه کرد. مدل تحلیلی ون کارمن بیان می‌کند که پیش‌بینی دقیق حداکثر نیروی برخورد، وابسته به جرم اضافه شده و مشتق آن است. جرم اضافه شده به تنوع در شرایط مرزی سطح آزاد آب وابسته است. بنابراین ارزیابی آن اغلب دشوار است. بعدها بیشتر دانشمندان مدل نظری پیشنهاد شده توسط ون کارمن را تا اواسط قرن بیستم مورد استفاده قرار دادند. هیلمن [۲۳] محاسبات تحلیلی را برای یک مخروط با زاویه رأس ۹۰ درجه انجام داد. او از یک روش تکرار با یک معادله انتگرالی برای تعیین دقیق نیروی برخورد در یک سرعت ثابت استفاده کرد. در یکی از نخستین مطالعات نظری، شیفمن و اسپنسر [۲۴] یک راه‌حل تحلیلی را، با بررسی برخورد عمودی گوی‌ها بر روی آب ارائه دادند. و اولین کسانی بودند که تکامل کاواک را هنگام ورود گوی‌ها در آب مورد مطالعه قرار دادند. از نتایج به‌دست آمده اثبات شد که گوی می‌تواند از سیال جدا شود، که منجر به تشکیل کاواک می‌شود. از تئوری جریان پتانسیل برای تجزیه و تحلیل ضریب پسا به‌عنوان تابعی از عمق نفوذ برای تعیین جرم اضافه شده استفاده کردند و اثبات کردند که وقتی گوی بین ۱۰ تا ۲۰ درصد از شعاع آن زیر آب فرو رفته باشد، حداکثر ضریب پسا رخ می‌دهد. در پژوهش

1 Ripple

انجام شده توسط باتیستین و همکاران [۲۵] مسئله ورود اجسام با شکل دلخواه با تقارن محوری و دوبعدی و با در نظر گرفتن اثرات کشش سطحی، تراکم‌پذیری و گرانش مورد مطالعه قرار گرفت. تمرکز عمدتاً در ارزیابی توزیع فشار و نیروی هیدرودینامیکی وارد بر جسم بوده و نتایج استوانه و گوی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. با استفاده از اصل بقای انرژی مدل جدیدی پیشنهاد شد. در مدل به کار رفته فرض بر این است که کل انرژی گوی پس از برخورد به سیال برابر است با انرژی ازدست رفته توسط پرتابه. میلو [۲۶] یک راه حل تئوریک برای ارزیابی ضریب تر شوندگی در مسئله ورود عمودی اجسام کروی صلب در آب ارائه داد. در این مدل تحلیلی تراکم‌پذیری سیال و جاذبه را در نظر گرفت و از اثر ویسکوزیته که معمولاً در مراحل اولیه برخورد به آب تأثیرگذار است، چشم‌پوشی کرد. جهت به دست آوردن ضریب تر شوندگی از معادلات لاگرانژ استفاده شده است. پس از مقایسه نتایج مشخص شد که نتایج تجربی و نظری تطابق خوبی باهم دارند. دوکلاس و همکاران [۲۷] یک طرح نظری را برای بررسی ویژگی‌های کاواک ایجاد شده به وسیله اجسام کروی و استوانه‌ای در حین ورود به آب پیشنهاد کردند. از نتایج به دست آمده مشخص شد که اندازه استوانه و کاواک ایجاد شده توسط استوانه، تقریباً برابر بوده درحالی که کاواک‌های ایجاد شده توسط گوی‌ها، بزرگ‌تر از خود گوی‌ها هستند. علاوه بر این، مشاهده شد که زمان نقطه جدایش کاواک با افزایش قطر جسم موردنظر افزایش می‌یابد، اما تحت تأثیر سرعت ورود به آب قرار نمی‌گیرد. همچنین نتیجه‌گیری شد که عمق جدایش کاواک با افزایش قطر گوی کاهش می‌یابد. گیو و همکاران [۲۸] از لحاظ نظری و تجربی رفتار ورود به آب پرتابه‌های استوانه‌ای با دماغه تخت را مورد بررسی قرار دادند. مدل ارائه شده با استفاده از حل مسئله رایلی بیژنت و با گسترش مدل استفاده شده توسط دوکلاکس و همکاران [۲۷] به دست آمد. از نتایج به دست آمده مشاهده شد که کاواک تا حد زیادی بر ضریب کاهش سرعت^۱ و ضریب پسا تأثیر می‌گذارد و قطر کاواک به‌طور یکنواخت با عمق نفوذ کاهش می‌یابد. دایمنت [۲۹] یک روش تحلیلی از ورود سریع گوی‌های

1 Coefficient of velocity decay

تغییر شکل‌پذیر، به درون آب ارائه داد که یک کاواک کشیده را تشکیل می‌دهد. او شرایط را برای پرتابه‌های سنگین و اعداد فرود بالا شبیه‌سازی کرد. وی اهمیت اصطکاک را در هنگام ورود عمودی و با سرعت بالا برجسته کرد و نتیجه گرفت که بسته شدن حفره به شدت تحت تأثیر اصطکاک است.

۳-۲-۱ پژوهش‌های عددی

اخیراً تحقیقات عددی در خصوص ورود پرتابه‌ها به درون آب به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. این روش کاربردهای گسترده‌ای در زمین‌شناسی بازرگانی و... دارد اما در زمینه نظامی بیشترین کاربرد را دارد. روش‌های عددی دقت بسیار خوبی دارند. در نتیجه پیشرفت‌های بسیار خوبی در روش‌های عددی شامل روش‌های مبتنی بر روش المان مرزی^۱ روش المان محدود^۲ و... ایجاد شده است.

در سال ۱۹۹۷ ژائو و همکاران [۳۰] با استفاده از روش المان مرزی دوبعدی و شبیه‌سازی کاملاً غیرخطی و بدون جداسازی جریان، برخورد مقاطع دوبعدی دلخواه را در درون آب مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از راه‌حل‌ها نشان داده شد که ویژگی‌های هیدرودینامیکی در گوی صلب و سخت با نتایج تجربی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که شیب فشار بر روی سطح گوی به میزان زیادی تحت تأثیر جریان جت قرار نمی‌گیرد. باتیستین و همکاران [۲۵] خصوصیات هیدرودینامیکی اجسام با شکل دلخواه، دوبعدی و با تقارن محوری را بررسی کردند. در مدل عددی از روش المان مرزی غیرخطی با در نظر گرفتن جریان جت که از سطح تراز جسم و سطح آزاد آب سرچشمه می‌گیرد استفاده شد. این مطالعه بر اساس تئوری جریان پتانسیل و با فرض یک سیال تراکم ناپذیر و تأثیر کشش سطحی و جاذبه انجام شده است. پارک و همکاران [۳۱] یک روش عددی را با استفاده از روش پانل^۳ برای ارزیابی نیروهای ناشی از برخورد جسم دلخواه که با سرعت زیاد و فرض جریان سیال تراکم ناپذیر و غیر لزج

1 Boundary Element Method

2 Finite Element Method

3 Panel Method

ارائه دادند. در مطالعه [۳۲] عددی دیگر با استفاده از روش حجم محدود^۱ مدلی تلفیق شده با یک روش عددی برای بررسی خصوصیات برخورد یک گوی به درون آب طراحی شد، هدف به دست آوردن مسیر حرکت، نیروهای وارده و ضریب پسا، پرتابه بود. گائو و همکاران [۳۳] به منظور بررسی نیروهای حاصل از برخورد مایل پرتابه‌های استوانه‌ای با سرعت بالا، یک مطالعه عددی بر پایه روش تفاضل محدود^۲ تحت پارامترهای متنوع پرتاب انجام دادند. شبیه‌سازی عددی با حل معادلات ناویر استوکس^۳ متوسط‌گیری شده رینولدز انجام شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که هندسه پرتابه به‌طور عمده بر روی تضعیف سرعت تأثیر می‌گذارد درحالی‌که سرعت برخورد و زاویه ورودی تأثیر کمی بر روی آن دارند. ضریب پسا نیز بیش‌تر تحت تأثیر شکل دماغه قرار دارد. گوا و همکاران [۳۴] رفتارهای پرتابه با شکل‌های متنوع را در هنگام ورود افقی به آب در سرعت بالا مطالعه کردند. در این مطالعه عددی، از روش کوپل لاگرانژ اوپلر برای محاسبه ضریب پسای پرتابه‌ها با استفاده از نرم‌افزار تجاری AUTODYN استفاده شد. عرفانیان و همکاران [۳۵] از روش کوپل لاگرانژ اوپلر^۴ برای ارزیابی پدیده ورود پرتابه به درون آب استفاده کردند. صحت الگوریتم عددی با مقایسه خروجی‌های مدل، با داده‌های آزمایشی اعتبار سنجی و تأیید شد. درخشانیان و همکاران [۳۶] مطالعه‌ای را برای انتخاب روش عددی مناسب برای شبیه‌سازی پدیده ورود پرتابه هنگام ورود مورب در آب انجام دادند. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی روش‌های مختلف عددی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. مشخص شد که فرمولاسیون^۵ ALE می‌تواند به‌طور دقیق برای ثبت پدیده ورود پرتابه هنگام ورود مورب در آب استفاده شود.

1 Finite Volume Method

2 Finite Difference Method

3 Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations

4 Lagrange-Euler Coupling

5 Arbitrary Lagrangian Eulerian

۳-۱ ضرورت انجام تحقیق

موضوعات متنوعی در زمینه بررسی رفتار هیدرودینامیکی، ورود پرتابه‌ها به داخل آب مورد بررسی قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به روش‌های پوشش‌های پلیمری، استفاده از انواع پوشش‌های آب‌گریز، لרزش دادن جسم، روش سوپر کاویتاسیون و روش لیدن فراست و روش‌های دیگر اشاره کرد. مهم‌ترین نقص روش‌های ذکر شده آلودگی زیست محیطی، گران بودن و ماندگاری پایین آن‌ها است. به همین دلیل ضروری به نظر می‌رسد مطالعه بیشتری بر روی تأثیر تغییر خواص سطحی جسم، بر رفتار هیدرودینامیکی آن انجام گیرد. یکی از روش‌هایی که کمتر مورد بررسی قرار گرفته، تأثیر ایجاد دیمپل بر روی سطوح و نقش آن بر تغییرات رفتار هیدرودینامیکی جسم است. لذا لازم است تحقیق و بررسی کاملی در این باره انجام گیرد. در این تحقیق تأثیر ایجاد دیمپل در تعداد و آرایش‌های مختلف و بر روی گوی‌های فلزی و تأثیر این دیمپل‌ها در تغییرات سرعت، تغییرات شتاب، نیروهای وارد بر گوی و نحوه شکل‌گیری کاواک‌ها در آب بررسی و با گوی فلزی با همان ابعاد بدون تغییرات سطحی مقایسه خواهد شد.

۴-۱ نوآوری پژوهش

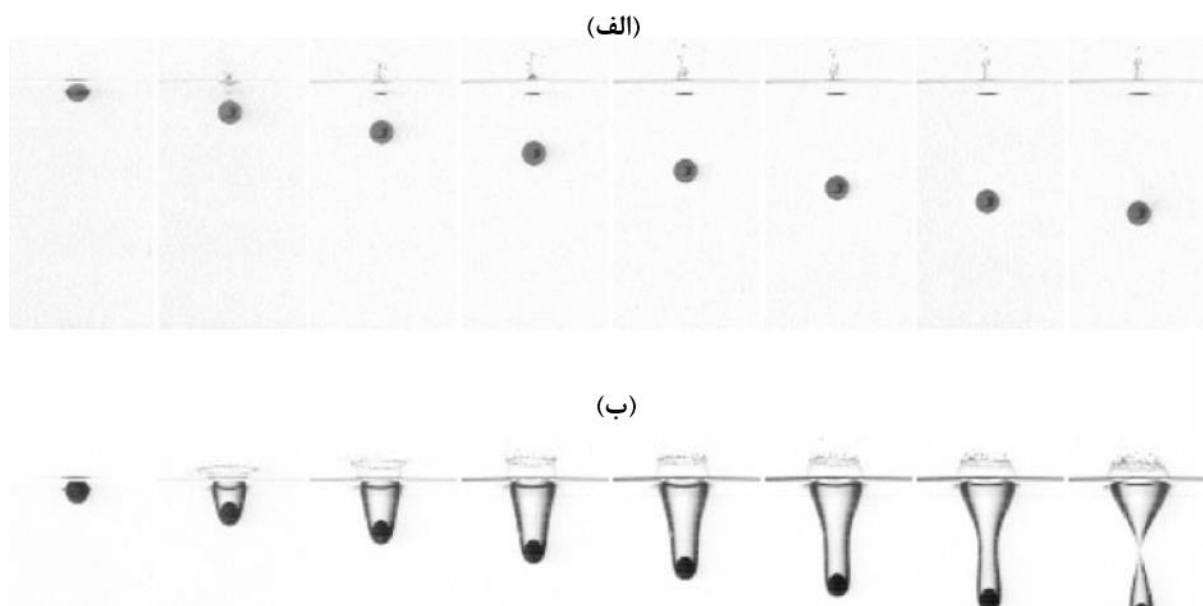
در مطالعه حاضر، تأثیر ایجاد دیمپل‌های سطحی بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. دیمپل‌ها در الگوهای مختلف بر روی شش عدد گوی فلزی متفاوت ایجاد شده است. در این مطالعه تأثیر، حفره‌های سطحی بر نحوه شکل‌گیری کاواک، مشخصه‌های نقطه جدایش کاواک، ضریب هیدرودینامیکی، سرعت و شتاب مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۵ ساختار پایان نامه

در فصل اول به معرفی موضوع مورد مطالعه و سابقه موضوع پرداخته شده و در فصل ۲ به تئوری و نیروهای حاکم بر موضوع و مفاهیم آن اشاره شده است. در فصل ۳ نیز به معرفی مسئله، پرتابه‌ها، تجهیزات آزمایشگاهی و روند انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و نحوه به دست آوردن نتایج پرداخته شده و در فصل ۴ نتایج ارائه شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در فصل ۵ نتیجه‌گیری مطالعه و ارائه پیشنهادهایی جهت ادامه پژوهش‌های آینده ارائه شده است.

فصل ۲: تئوری برخورد و نیروهای حاکم

زمانی که یک جسم جامد به آب برخورد می‌کند چه اتفاقی رخ می‌دهد؟. این سؤال متعلق به موضوع کلی مسئله ورود پرتابه در آب است. در برخورد یک پرتابه به سطح آب بسته به شرایط برخورد و مشخصات سطح پرتابه، می‌تواند باعث تشکیل و یا عدم تشکیل کاواک گردد. همان‌طور که در شکل ۲-۱ (الف-ب) مشاهده می‌شود. در اثر ورود گوی شیشه‌ای در آب هیچ‌گونه کاواکی تشکیل نشده و گوی به آرامی در آب غرق شده است اما در اثر ورود گوی شیشه‌ای پوشش داده شده با دوده، در آب کاواک تشکیل شده است. در ادامه فصل به توضیح کامل دلایل علمی تشکیل و یا عدم تشکیل کاواک، مفاهیم موضوع ورود پرتابه در آب و نیروهای حاکم بر مسئله ورود پرتابه در آب پرداخته می‌شود.



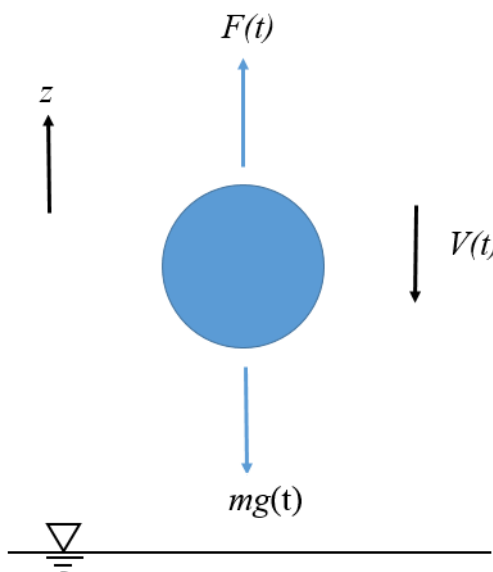
شکل ۲-۱: (الف) ورود گوی شیشه‌ای صاف به آب ($U_0 = 4.429[ms^{-1}], R_0 = 20[mm]$)

(ب) ورود گوی شیشه‌ای با پوشش دوده به آب ($U_0 = 4.429[ms^{-1}], R_0 = 20[mm]$) [۲۷]

۲-۱ نیروهای حاکم

تاکنون جهت تحلیل و بررسی پدیده ورود پرتابه در آب و نیروهای حاکم بر آن مدل و تحلیل‌های زیادی ارائه شده است. به دلیل پیچیدگی این پدیده هیچ کدام از تحلیل‌ها به تمامی نکات و ویژگی‌های موضوع نپرداختند. نخستین مطالعه تحلیلی در تعیین میزان نیروهای حاکم بر مسئله ورود پرتابه در آب توسط ون کارمن در هنگام فرود هواپیمای آبی در سطح آب انجام گرفت.

همان‌طور که در دیاگرام نیروهای وارد بر گوی مشاهده می‌کنید (شکل ۲-۲) به دنبال سقوط گوی در آب، گوی تحت تأثیر نیروی وزن و اینرسی خود در آب غرق می‌شود و توسط نیروی شناوری، نیروی کشش سطحی و هیدرودینامیکی مقاومت می‌کند.



شکل ۲-۲: دیاگرام نیروهای وارد بر گوی

با استفاده از قانون دوم نیوتون و تعادل نیروهای حاکم در راستای z خواهیم داشت:

$$(m + m_a) \frac{d^2 z}{dt^2} = mg - F_t \quad (۲-۱)$$

که در آن m جرم گوی، $z(t)$ عمق گوی و F_t مجموع نیروهای مقاوم گوی در مقابل سقوط است. m_a جرم اضافه شده سیال است که در هنگام برخورد و حرکت گوی در زیر سطح آزاد آب در نظر گرفته می‌شود.

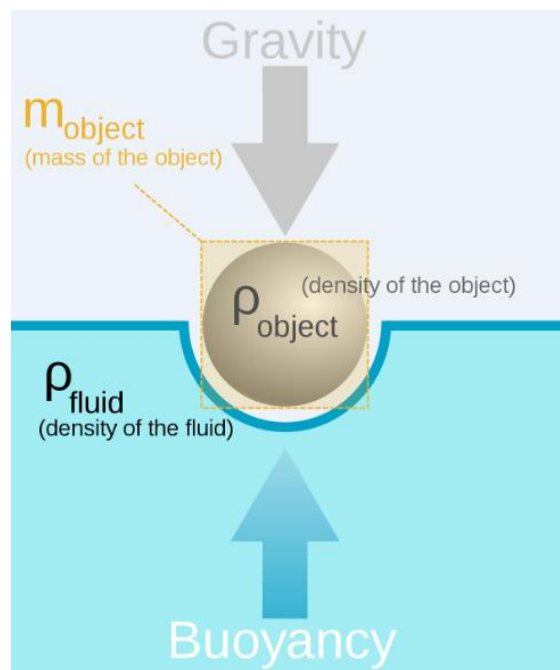
F_t برابر است با مجموع سه نیروی مقاوم، F_b نیروی شناوری، F_C نیروی کشش سطحی و F_h نیروی هیدرودینامیکی است.

$$F_t = F_b - F_C - F_h \quad (۲-۲)$$

$$(m + m_a) \frac{d^2z}{dt^2} = mg - F_b - F_C - F_h \quad (۳-۲)$$

۲-۱-۱ نیروی شناوری

زمانی که جسم وارد سیال می‌شود نیرویی از طرف سیال در جهت مخالف، به آن وارد می‌شود. فشار در یک ستون سیال با افزایش عمق افزایش می‌یابد، بنابراین فشار در قسمت پایین یک جسم غوطه‌ور در سیال بیشتر از فشار بالای آن است. این اختلاف فشار منجر به یک نیروی خالص به سمت بالا بر روی جسم می‌شود که ما آن را به عنوان نیروی شناوری تعریف می‌کنیم (شکل ۳-۲).



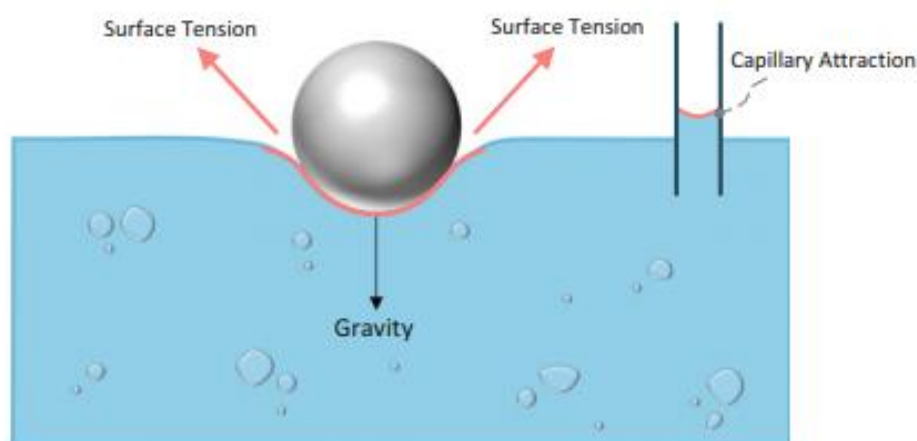
شکل ۳-۲: دیاگرام نیروی شناوری وارد بر یک گوی در آب [۳۷]

نیروی شناوری بر سطح مرطوب گوی وارد می‌شود و ناشی از فشار هیدرواستاتیک است و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F_b = \rho g \iint_A z \, dA \quad (۴-۲)$$

۲-۱-۲ نیروی کشش سطحی

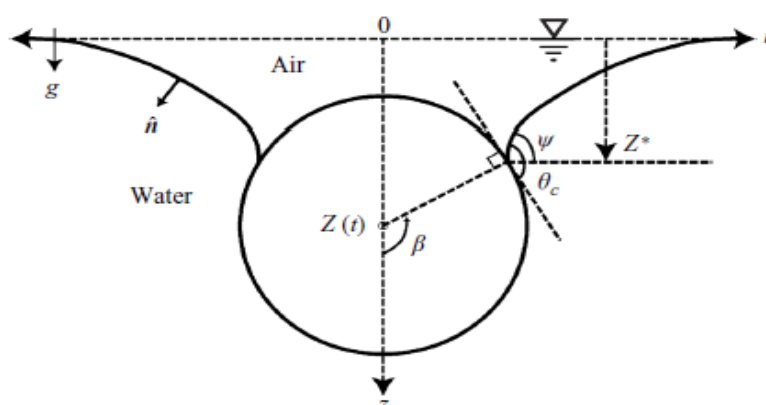
نیروی کشش سطحی یک نیروی کاملاً شناخته شده در زندگی روزمره ما و یک خاصیت سیال است که باعث می شود سطح بیرونی سیال مانند یک صفحه کشسان عمل کند. این ویژگی باعث ربایش دو سطح مایع به یکدیگر می شود. در شکل ۴-۲ دو نمونه از کاربردهای نیروی کشش سطحی را نشان داده که باعث می شود یک گوی سبک با غلبه بر نیروی گرانش در آب شناور بماند و اثر موینگی در لوله باریک، نیز نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: دو نمونه از اثرات کشش سطحی [۲]

نیروی کشش سطحی از رابطه (۵-۲) به دست می آید که در آن φ زاویه ای است که کاواک چسبیده به گوی با افق می سازد. σ کشش سطحی و $2\pi R_0 \sin \beta$ طول حلقه تماس است (شکل ۵-۲).

$$F_c = 2\pi R_0 \sigma \sin \beta \sin \varphi \quad (5-2)$$



شکل ۵-۲: دیاگرام غرق شدن یک گوی آب گریز در آب در رژیم برخورد شبه استاتیکی [۳]

۳-۱-۲ نیروی هیدرودینامیکی

نیروی هیدرو دینامیکی نحوه رفتار هیدرودینامیکی گوی را در سیال نشان می دهد. نیروی هیدرودینامیکی مجموع نیروهای پسای فشاری و اصطحاکای و دیگر نیروها را مدل می کند. مؤلفه عمودی نیروی کل هیدرودینامیکی با استفاده از رابطه (۶-۲) به دست می آید که در آن $T = P_d I + 2\eta E$ تانسور تنش است.

$$F_h = - \iint_A \hat{n} \cdot T \cdot \hat{Z} dA \quad (۶-۲)$$

ضریب نیروی هیدرودینامیکی از رابطه زیر بدست می آید.

$$C_F = \frac{m_s[g - \ddot{Z}(t)]}{\frac{1}{2}\rho[\dot{Z}(t)]^2\pi R_0^2} \quad (۷-۲)$$

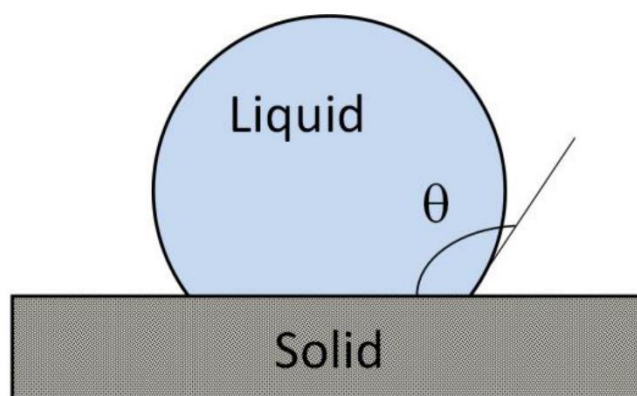
۲-۲ مفاهیم برخورد

۱-۲-۲ پارامترهای کلیدی

چندین پارامتر کلیدی وجود دارد که بر فیزیک مسئله ورود پرتابه در آب تأثیرگذارند، پارامترهای کلیدی را می توان در سه بخش دسته بندی کرد: ۱- پارامترهای پرتابه ۲- پارامترهای برخورد ۳- پارامترهای سیال. پارامترهای پرتابه مانند هندسه پرتابه، زاویه تر شونده، موقعیت مرکز جرم، آب دوستی و آب گریزی و چگالی پرتابه. همچنین پارامترهای برخورد از جمله سرعت برخورد، زاویه برخورد، چرخش عرض و طولی؛ و مشخصه های اصلی سیال مانند چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی از پارامترهای مؤثر در پدیده ورود پرتابه در آب هستند. در فصل اول به تأثیر تعدادی از این پارامترها در مسئله ورود پرتابه در آب اشاره شد. در ادامه به معرفی برخی از پارامترهای کلیدی و اعداد بی بعد پرکاربرد در مسئله ورود پرتابه در آب پرداخته خواهد شد.

۲-۱-۲-۲ زاویه تماس

همان طور که در شکل ۶-۲ مشاهده می گردد، زاویه بین خط تماس سیال و جسم، زاویه تماس یا زاویه خیزی نامیده می شود؛ که با نمادهای θ ، θ_c و θ_a نام گذاری می شود. برای توصیف خاصیت تر شوندگی یک سطح از زاویه تماس استفاده می شود، به عنوان مثال جهت تشخیص سطوح آب گریز و آب دوست [۳۸].



شکل ۶-۲: زاویه تماس بین سیال و سطح جامد [۳۹]

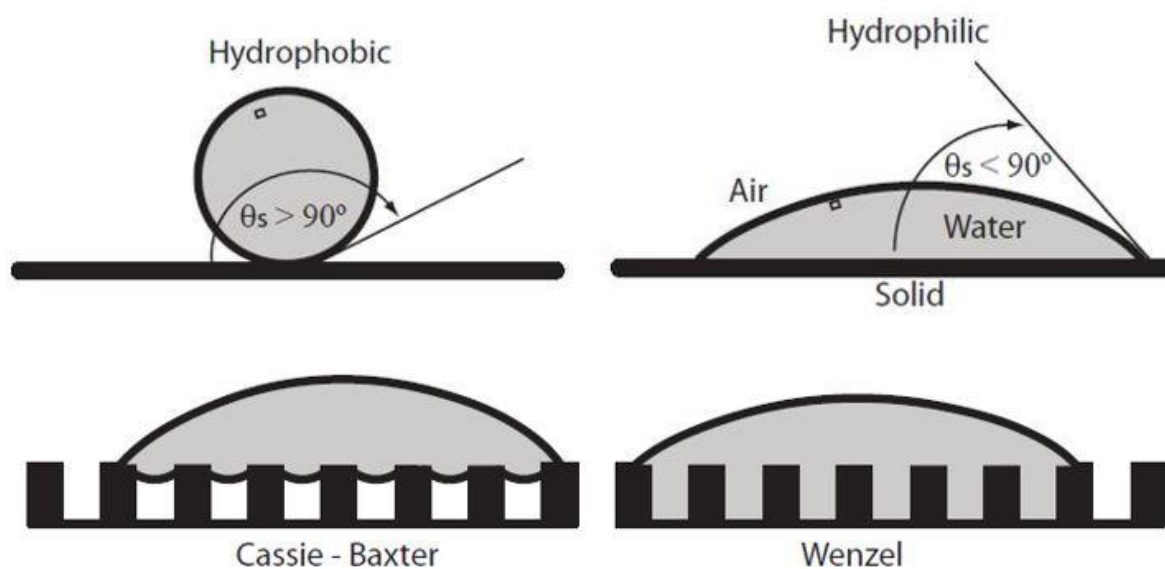
۲-۱-۲-۲ آب گریزی و آب دوستی

توانایی یک سطح جامد برای خیس شدن توسط یک مایع، با استفاده از زاویه تماس طبقه بندی می شود. اگر زاویه تماس کوچک تر از ۹۰ درجه باشد جسم دارای خاصیت آب دوستی است و اگر زاویه تماس بزرگ تر از ۹۰ درجه باشد جسم دارای خاصیت آب گریزی است. در واقع در سطوحی که خیس نمی شوند^۱، به دلیل خلل فرج موجود بر روی سطح جسم، هوا در آنها به دام می افتد و سطح، دارای خاصیت آب گریزی می شود. اما در سطوحی که کاملاً خیس می شوند سیال در داخل خلل و فرج موجود بر روی سطح جسم، نفوذ می کند و باعث می شود سطح کاملاً خیس شود^۲ (شکل ۷-۲) [۳۸]. خاصیت آب دوستی و آب گریزی در علوم پزشکی، ابزار انتقال حرارت، دستگاه های تصفیه آب، ساختمان سازی، نساجی و خودروسازی مورد استفاده قرار می گیرد. کیم و همکاران [۴۰] در مطالعه تجربی ثابت کردند، میزان آب دوستی و آب گریزی سطح جسم، تأثیر بسزایی

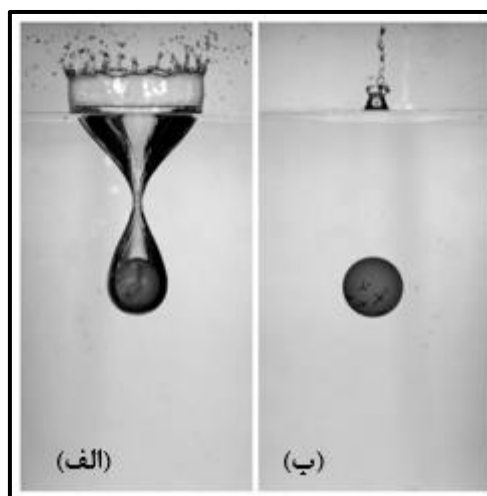
1 Cassie-Baxter

2 Wenzel

در تشکیل کاواک و شکل پاشش آب دارد و افزایش زاویه تماس عامل مهمی در شکل‌گیری کاواک است. همان‌طور که در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود، افزایش زاویه تماس گوی و آب‌گریز کردن سطح گوی باعث ایجاد کاواک شده است درحالی‌که گوی آب‌دوست هیچ‌گونه کاواکی تشکیل نداده است.



شکل ۲-۷: دسته‌بندی خاصیت آب‌گریزی و آب‌دوستی با استفاده از زاویه تماس [۴۱]



شکل ۲-۸: تأثیر خاصیت آب‌گریزی در شکل‌گیری کاواک الف: توپ گلف آب‌گریز ب: توپ گلف آب‌دوست [۴۱]

۲-۲-۲ اعداد بی بعد

اعداد بی بعد مهم و کاربردی در مطالعه ورود پرتابه در آب، به شرح ذیل می باشد.

الف- عدد فرود

نسبت نیروی اینرسی به نیروی جاذبه را نشان می دهد. عدد فرود در جریان های با سطح آزاد مانند کانال های باز و برخورد پرتابه به سطح آب، برای دسته بندی نوع جریان کاربرد فراوانی دارد. این عدد در مبحث ورود پرتابه در آب رفتار ماکروسکپی کاواک را توصیف می کند.

$$Fr = \frac{U_0^2}{gR_0} \quad (۸-۲)$$

ب- عدد وبر

یک عدد بدون بعد در مکانیک سیالات است که اغلب در تجزیه و تحلیل جریان سیالات درجایی که بین دو سیال فصل مشترک وجود دارد مورد استفاده قرار می گیرد. این عدد در مسئله ورود پرتابه در آب بیشتر در توصیف تجزیه کاواک و همچنین در توصیف پایداری تاج پرده پاشش آب مورد استفاده قرار می گیرد [۴۲]. عدد وبر نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی را توصیف می کند.

$$W = \frac{\rho U_0^2 R_0}{\sigma} \quad (۹-۲)$$

پ- عدد رینولدز

یک عدد مهم در مکانیک سیالات است که برای تعیین الگوی جریان سیال مورد استفاده قرار می گیرد. این عدد نسبت نیروی اینرسی به لزجت را نشان می دهد.

$$Re = \frac{\rho U_0 d}{\mu} \quad (۱۰-۲)$$

عدد رینولدز برای پیش بینی گذر جریان سیال از آرام به آشسته مورد استفاده قرار می گیرد و کاربردهای بسیاری از جمله در تعیین نوع جریان داخل لوله تا جریان هوا بر روی ایرفویل دارد [۴۳].

ت - عدد باند

به نسبت نیروی درونی به تنش سطحی، در سطح بین مایع و گاز یا در سطح بین دو مایع غیرقابل حل، عدد باند گفته می‌شود [۴۴].

$$Bo = \frac{\rho g R_0^2}{\sigma} \quad (۱۱-۲)$$

ث - عدد موینگی

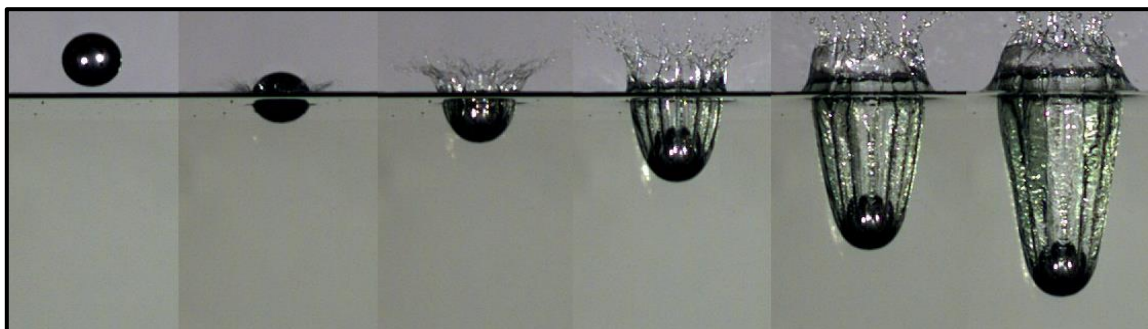
عدد بی بعدی است که در مکانیک سیالات، نسبت نیروی ناشی از لزجت به کشش سطحی را نشان می‌دهد و در مسئله ورود پرتابه در سیال پر کاربرد است. از عدد موینگی و زاویه خیزی در پیش‌بینی شکل‌گیری و عدم تشکیل کاواک، استفاده می‌شود.

$$Ca = \frac{\mu U_0}{\sigma} \quad (۱۲-۲)$$

۲-۲-۳ معرفی کاواک و بخش‌های مختلف کاواک

۲-۲-۳-۱ کاواک

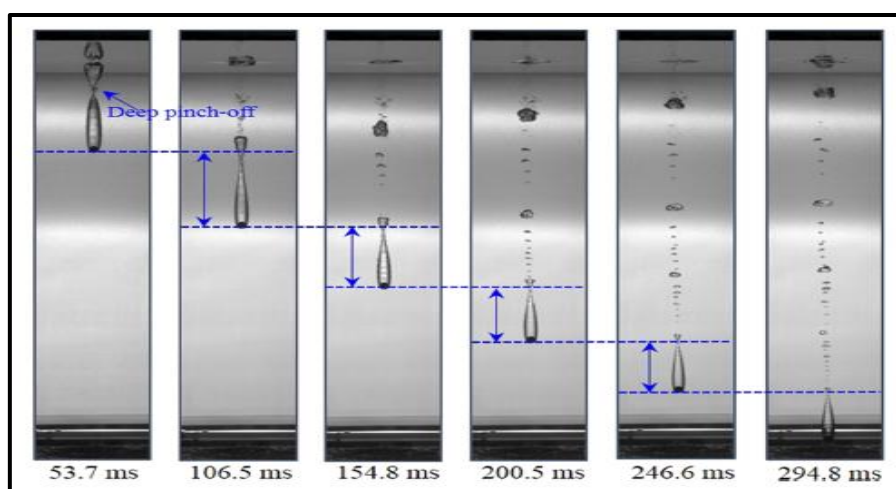
به حفره هوایی که در اثر ورود پرتابه در سیال شکل می‌گیرد و باعث می‌شود هوا، بخار یا مخلوطی از آن‌ها اطراف پرتابه را محاصره کند کاواک گفته می‌شود. در شکل ۲-۹ روند شکل‌گیری کاواک در اثر ورود گوی فلزی با شناسه $S_{5,12}$ در آب مشاهده می‌گردد.



شکل ۲-۹: مراحل شکل‌گیری کاواک در اثر ورود گوی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر

۲-۳-۲-۲ نقطه جدایش کاواک

بعد از برخورد پرتابه به سطح سیال و شکل‌گیری کاواک، در زمانی که کاواک در آستانه تقسیم به دو بخش مجزا است، به آن نقطه جدایش کاواک گفته می‌شود. از این نقطه جهت اندازه‌گیری زمان و عمق نقطه جدایش استفاده می‌شود. عمق و زمان نقطه جدایش کاواک در رژیم‌های مختلف متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۲-۱۰ قابل مشاهده است در مراحل فروپاشی کاواک به خصوص در رژیم جدایش سطحی ممکن است چندین جدایش متوالی شکل گیرد؛ که با هر جدایش مقداری از حجم کاواک کاسته می‌شود.



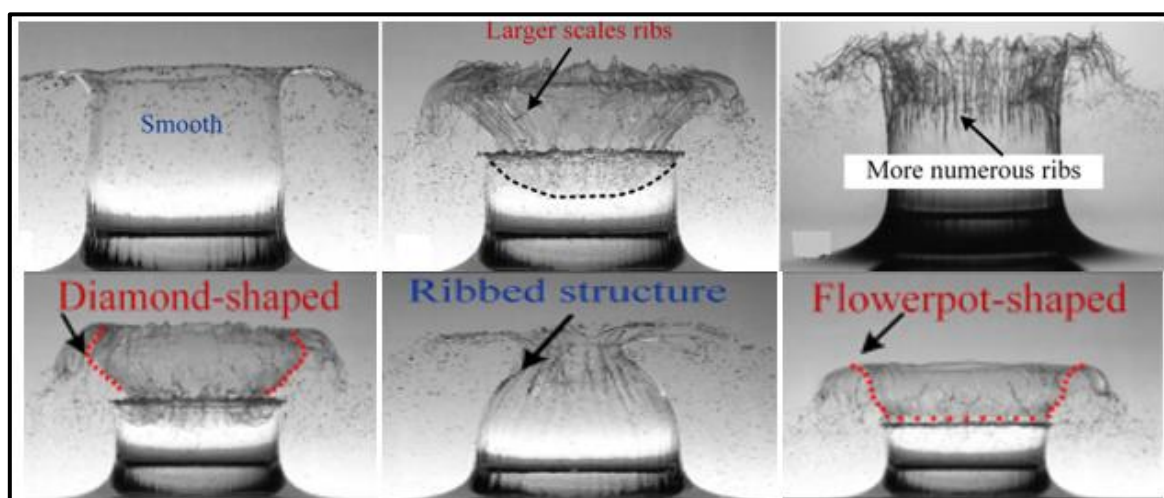
شکل ۲-۱۰: تکرار چندین جدایش متوالی در مراحل فروپاشی کاواک [۱۰]

۲-۳-۲-۳ پرده پاشش آب

زمانی که پرتابه به سطح آزاد سیال برخورد می‌کند (شکل ۲-۱۱)، پرده پاشش آب در بالا و در زیر سطح آزاد، کاواک ایجاد می‌کند. با پایین آمدن پرتابه در داخل سیال، در اثر فشار هیدرو استاتیک کاواک بسته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می‌گردد. پرده پاشش آب ممکن است به شکل تاج، گنبد و یا یک سطح بسته دربیاید. طبق مطالعه انجام شده توسط اشراقی و همکاران اثر متقابل فشار داخل کاواک، جاذبه و کشش سطحی، بر نحوه شکل‌گیری پرده پاشش آب تأثیرگذار هستند [۴۵].



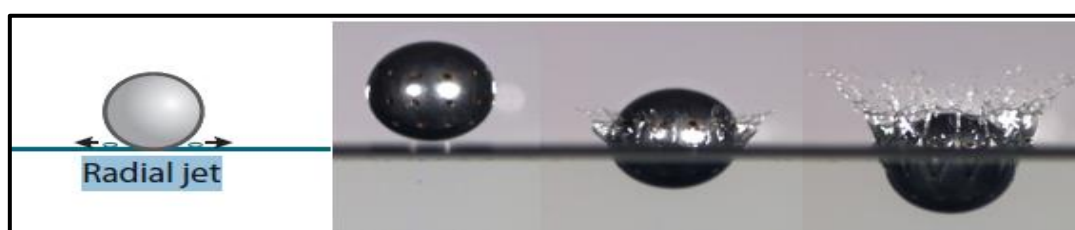
شکل ۲-۱۱: روند شکل‌گیری پرده پاشش آب توسط گوی فولادی [۴۵]



شکل ۲-۱۲: انواع شکل‌های پرده پاشش آب [۴۶]

۲-۳-۲-۴ جت شعاعی

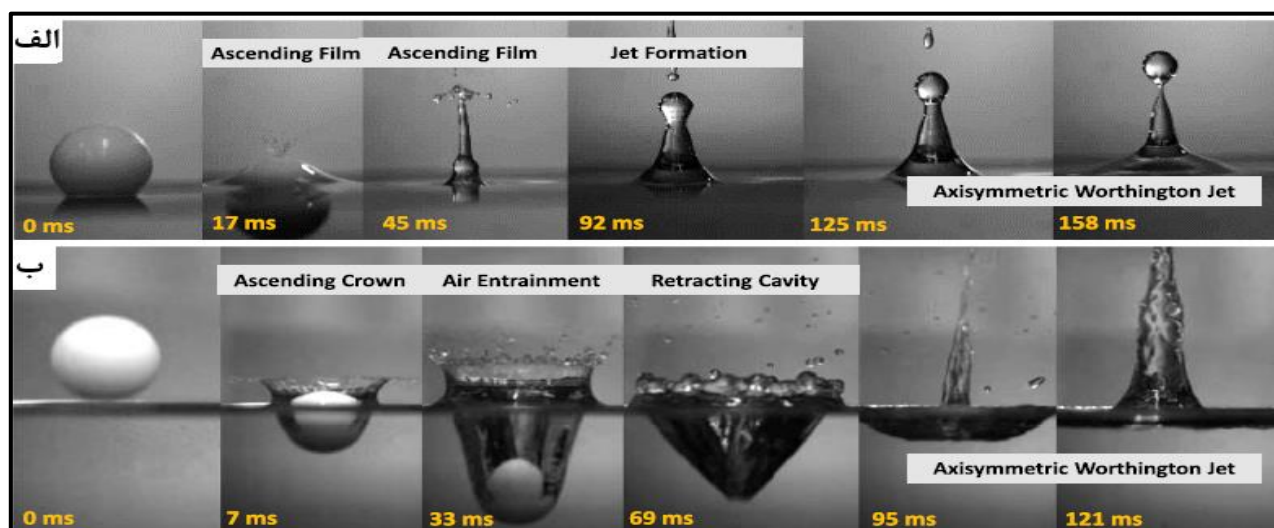
در برخوردهایی که سرعت پرتابه به اندازه کافی زیاد باشد، پس از برخورد پرتابه به سطح آزاد آب یک جت افقی با سرعت زیاد از نقطه تماس کره و سطح آب به بیرون سطح آزاد آب پرتاب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۳ قابل مشاهده است. سرعت این جت می‌تواند تا ۳۰ برابر سرعت برخورد پرتابه به سطح آب باشد. جت اولیه در کمتر از ۱ میلی‌ثانیه پس از برخورد ایجاد می‌شود. کشش سطحی و تراکم‌پذیری تأثیر کمی در شکل‌گیری جت شعاعی دارد؛ اما در مطالعات مختلف به تأثیر هندسه‌های متفاوت در تشکیل جت آب پرداخته شده است [۴۲].



شکل ۲-۱۳: روند تشکیل جت شعاعی در اثر برخورد پرتابه به سطح آب

۲-۳-۵ ورتینگتون جت

چند لحظه پس از ورود پرتابه در آب یک جت عمودی ایجاد می‌شود که به آن ورتینگتون جت نیز گفته می‌شود. در گوی‌های آب‌دوست بعد از ورود گوی در آب دو نوع جت عمودی به وجود می‌آید. در گوی‌های آب‌گریز نیز بعد از اینکه در کاواک جدایش اتفاق می‌افتد و کاواک به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود، یک جت عمودی به سمت سطح آزاد آب و یک جت عمودی به سمت پایین حرکت می‌کند. در رژیم جدایش سطحی نیز پس از جدایش کاواک در نزدیکی سطح آب یک جت عمودی به سمت پایین حرکت می‌کند. در مطالعات انجام شده وابستگی ورتینگتون جت به گرانش اثبات شده است. بر اساس نتایج تجربی مشخص شده که طول ورتینگتون جت به صورت خطی به عدد فراد وابسته است. در شکل ۲-۱۴ روند شکل‌گیری ورتینگتون جت در اثر ورود گوی آب‌گریز و آب‌دوست را مشاهده می‌شود.

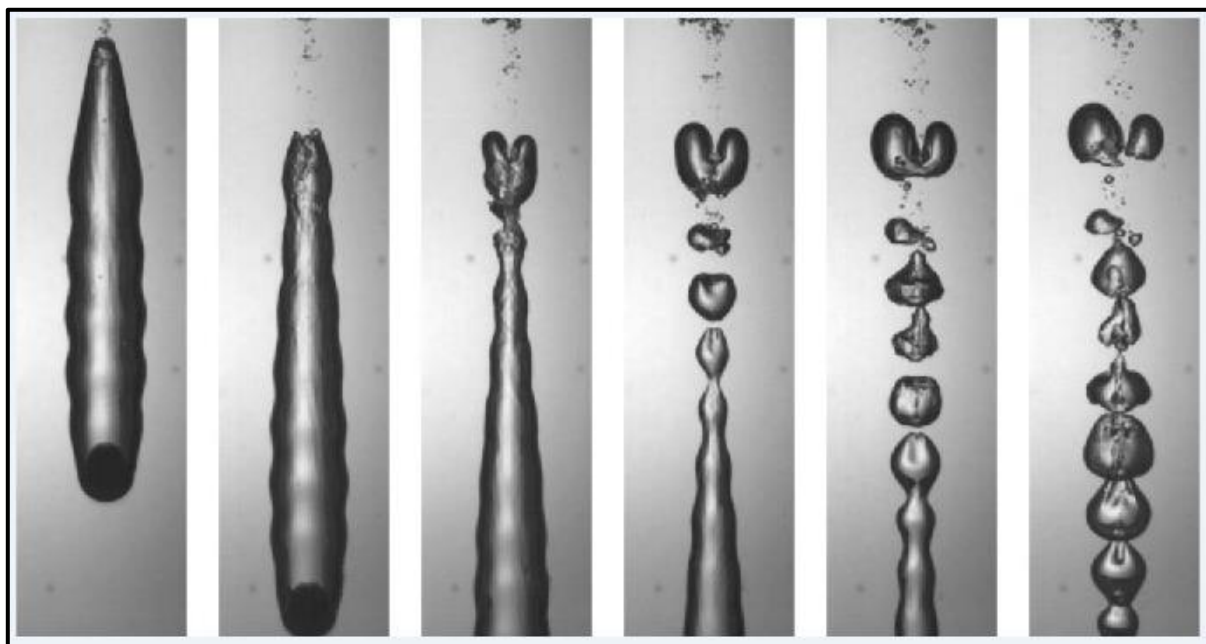


شکل ۲-۱۴: (الف): شکل‌گیری ورتینگتون جت در اثر ورود گوی آب‌دوست در آب

(ب) شکل‌گیری ورتینگتون جت در اثر ورود گوی آب‌گریز در آب [۴۷]

۲-۲-۳-۶ رپیل

همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ مشاهده می‌گردد به موج‌های ایجاد شده بر روی سطح کاواک رپیل گفته می‌شود. ژانگ و همکاران [۴۸] با تعبیه هیدروفون در آب و اندازه‌گیری فشار ثابت کردند عامل تشکیل رپیل بر روی دیواره کاواک، نوسانات فشار با فرکانس پایین است که به دلیل فروریزش کاواک به وجود آمده است.



شکل ۲-۱۵: نمونه‌ای از رپیل‌های ایجاد شده بر روی سطح کاواک [۴۹]

۲-۲-۴ طبقه‌بندی مسئله ورود پرتابه در آب، بر اساس مکانیسم تشکیل کاواک

به‌طور کلی پدیده ورود پرتابه در آب را می‌توان بر اساس مکانیسم تشکیل‌دهنده کاواک به سه نوع مکانیسم تقسیم کرد [۴۲]. مکانیسم نفوذ هوا، مکانیسم سوپر کاویتاسیون و مکانیسم لیدن فراست، در ادامه به معرفی این سه نوع مکانیسم پرداخته می‌شود.

۲-۲-۴-۱ مکانیسم نفوذ هوا

همان‌طور که در شکل ۲-۱۶ مشاهده می‌شود، در اثر برخورد گوی آب‌گریز با سطح آب، کاواک یا همان حفره هوایی، مانند یک ساعت شنی شکل‌گرفته و یک تاج آبی از سطح آب به سمت بالا تشکیل شده است. در خط

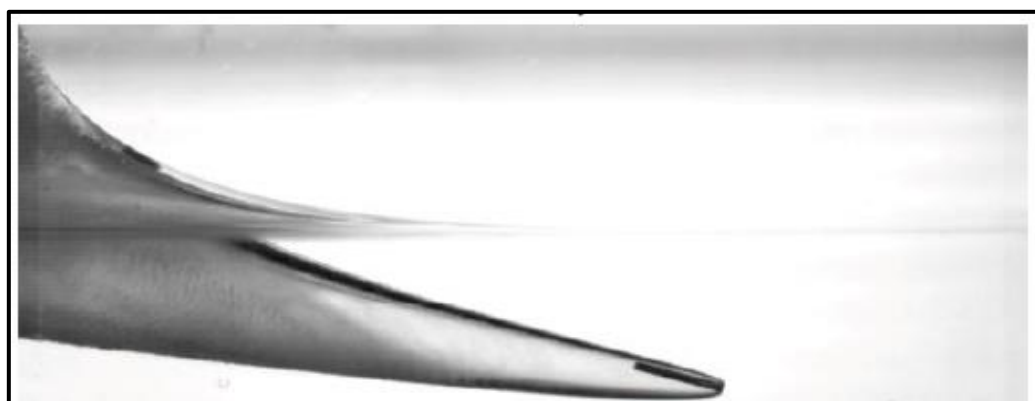
تماس پرتابه و سیال، نیروی لزج بر نیروی کشش سطحی غلبه کرده و خط تماس به سطح پرتابه متصل شده است. به همین دلیل هوا اجازه پیدا می‌کند تا زمانی که کاواک شکل می‌گیرد پشت گوی قرار گیرد. به این مکانیسم تشکیل کاواک، مکانیسم نفوذ هوا گفته می‌شود.



شکل ۲-۱۶: تشکیل کاواک با مکانیسم نفوذ هوا در اثر سقوط توپ بیلارد در آب [۴۲]

۲-۴-۲-۲ مکانیسم سوپر کاویتاسیون

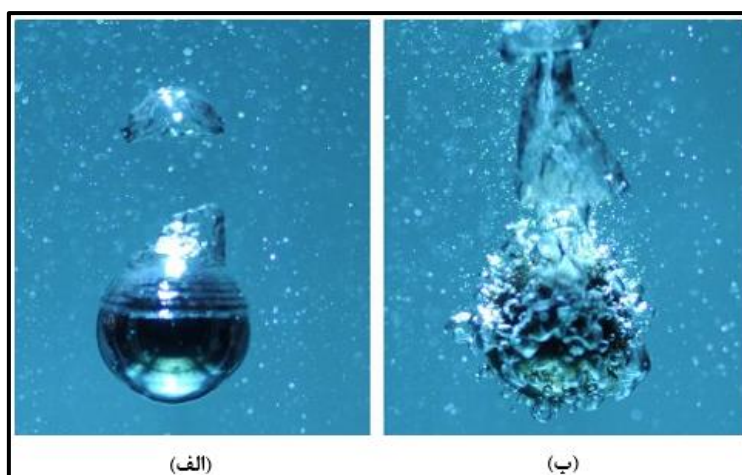
در صورتی که سرعت پرتابه به اندازه کافی زیاد باشد به این معنی که آب تبخیر شود و حفره زیرسطحی با مخلوط هوا-بخار پر شود سوپر کاویتاسیون مسئول تشکیل کاواک خواهد بود. هنگامی که کاویتاسیون یک ناحیه به اندازه کافی بزرگ از مخلوط هوا-بخار ایجاد کند و اطراف پرتابه را محاصره کند سوپر کاویتاسیون عامل تشکیل کاواک شناخته می‌شود. در شکل ۲-۱۷ ورود یک گلوله با سرعت بالا در آب، نشان داده شده است که باعث شکل‌گیری کاواک توسط مکانیسم کاویتاسیون شده است.



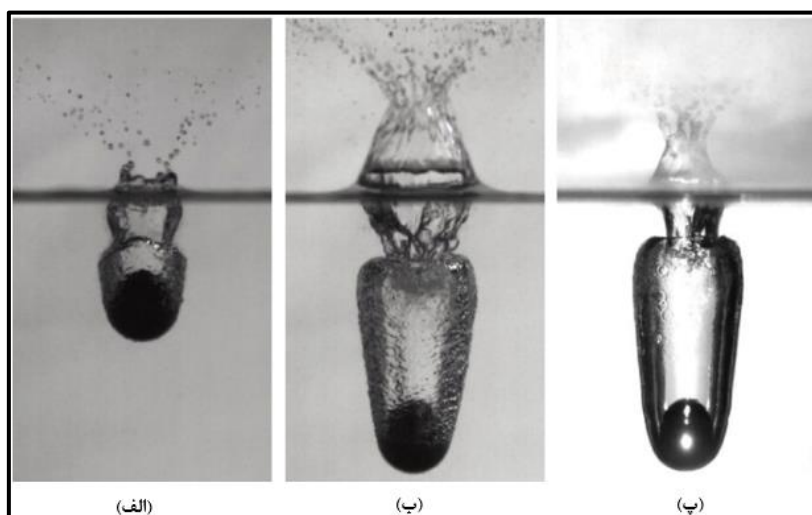
شکل ۲-۱۷: تشکیل کاواک با مکانیسم کاویتاسیون در اثر ورود گلوله در آب [۴۲]

۲-۲-۳ مکانیسم لیدن فراست

واکارلسکی و همکاران نشان دادند که کاواک می‌تواند توسط اثر لیدن فراست ایجاد شود. یک گوی فولادی سوپر هیت، یک لایه قوی از بخار آب در اطراف گوی ایجاد می‌کند. این نوعی از کاواک با سرعت پایین است. درواقع اگر دمای گوی به اندازه کافی بالا باشد آب اطراف گوی تبدیل به بخار می‌شود و یک لایه نسبتاً ضخیم از بخار در اطراف گوی ایجاد می‌کند، به این مکانیسم تشکیل‌دهنده کاواک لیدن فراست گفته می‌شود. در شکل‌های ۲-۱۸ و ۲-۱۹ می‌توان تأثیر دمای پرتابه در شکل‌گیری کاواک و نمونه‌هایی از مکانیسم لیدن فراست را مشاهده کرد.



شکل ۲-۱۸: تأثیر دمای پرتابه در شکل‌گیری کاواک الف: گوی با دمای سطح پایین ب: گوی با دمای سطح بالا [۵۰]



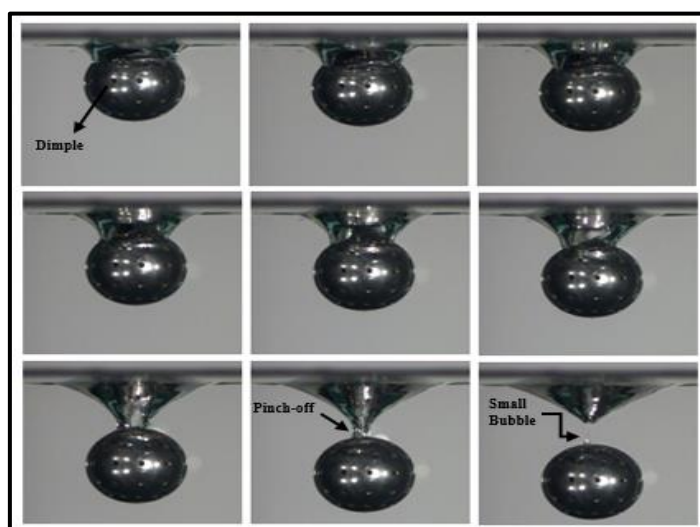
شکل ۲-۱۹: کاواک‌های تشکیل شده توسط مکانیسم لیدن فراست (الف): گوی با دمای ۲۶۰ درجه سانتی گراد (ب): گوی با دمای ۲۸۰ درجه سانتی گراد (پ): گوی با دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد [۱۷]

۲-۲-۵ رژیم‌های برخورد

همان‌طور که توسط آریستوف و بوش بیان گردید در اثر ورود پرتابه در آب ۴ نوع رژیم برخورد، توسط مکانیسم نفوذ هوا به وجود خواهد آمد که شامل رژیم‌های شبه استاتیک، جدایش نیمه عمیق، جدایش عمیق و جدایش سطحی می‌باشند. در اعداد باند پایین با افزایش عدد وبر نوع رژیم برخورد از شبه استاتیک به رژیم جدایش نیمه عمیق و از رژیم جدایش نیمه عمیق به رژیم جدایش عمیق و در انتها به رژیم جدایش سطحی انتقال می‌یابد. در ادامه به معرفی ۴ نوع رژیم برخورد پرداخته می‌شود.

۲-۲-۵-۱ رژیم شبه استاتیک

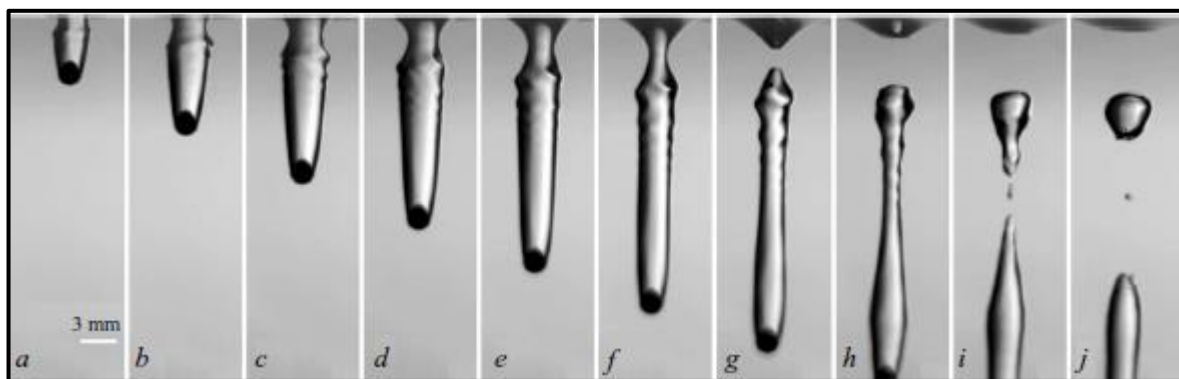
در ورود پرتابه‌های با سرعت بسیار پایین در آب، معمولاً رژیم شبه استاتیک ایجاد می‌گردد. در این رژیم گوی به آرامی در آب غرق و در کمتر از ۰/۰۱ ثانیه به‌طور کامل در آب غوطه‌ور می‌شود. در این حالت کمترین مقدار هوا وارد آب و یک کاواک کوچک متصل به پرتابه ایجاد می‌گردد. یکی دیگر از مشخصه‌های این رژیم این است که جدایش کاواک در نزدیکی پرتابه رخ می‌دهد، این به این دلیل است که نیروی کشش سطحی به‌اندازه کافی بزرگ است تا ورود پرتابه در آب را مهار کند به عبارت دیگر تعادل بین گرانش و کشش سطحی وجود دارد. پس از جدایش کاواک یک حباب کوچک متصل به گوی باقی می‌ماند. در شکل ۲-۲۰ می‌توان روند شکل‌گیری کاواک در رژیم شبه استاتیک را مشاهده کرد.



شکل ۲-۲۰: روند تشکیل کاواک در رژیم شبه استاتیک توسط گوی فلزی $S_{5,8}$

۲-۵-۲-۲ رژیم جدایش نیمه عمیق

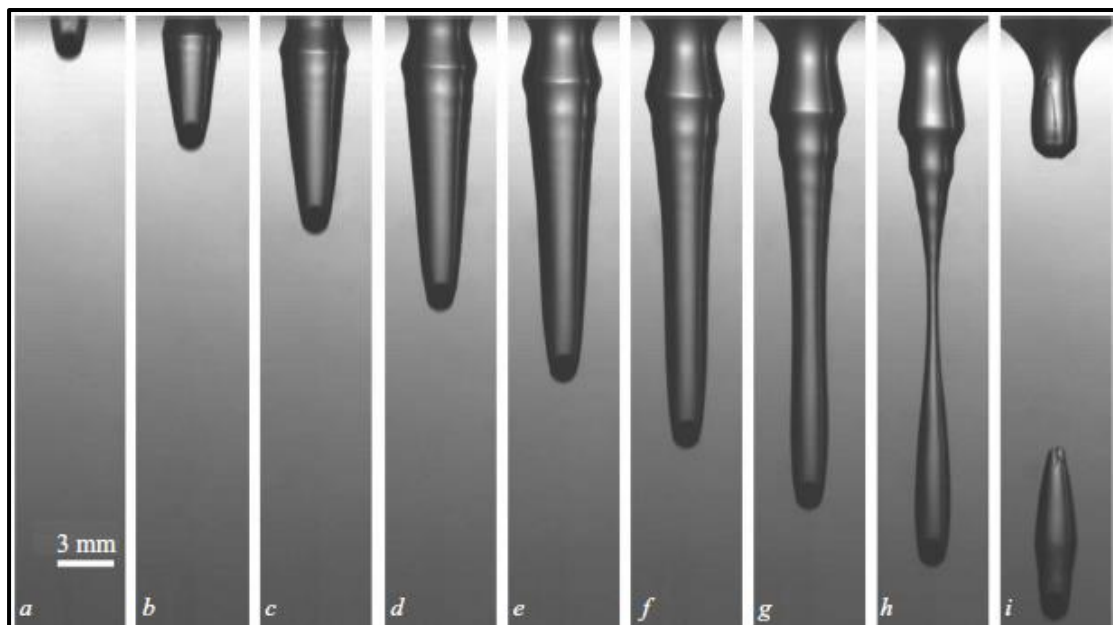
با افزایش عدد وبر رژیم جدایش نیمه عمیق اتفاق خواهد افتاد. در این رژیم کاواک قابل ملاحظه‌تری نسبت به رژیم شبه استاتیک ایجاد می‌شود. بر روی سطح جانبی کاواک ریزموج‌هایی با سرعت کمی کمتر از پرتابه ایجاد می‌گردد. نقطه جدایش کاواک تقریباً نزدیک به سطح است. هنگامی که جدایش اتفاق می‌افتد در قسمت بالای کاواک جت عمودی بزرگی تشکیل می‌شود. تفاوت کلیدی رژیم جدایش نیمه عمیق و رژیم جدایش عمیق در نزدیک بودن نقطه جدایش کاواک به سطح آب، در رژیم جدایش نیمه عمیق است؛ اما در حالت کلی این دو رژیم به هم شباهت زیادی دارند. در شکل ۲-۲۱ روند تشکیل رژیم جدایش نیمه عمیق قابل مشاهده است.



شکل ۲-۲۱: روند شکل‌گیری کاواک در رژیم جدایش نیمه عمیق توسط گوی فلزی آب‌گریز [۹]

۲-۵-۲-۳ رژیم جدایش عمیق

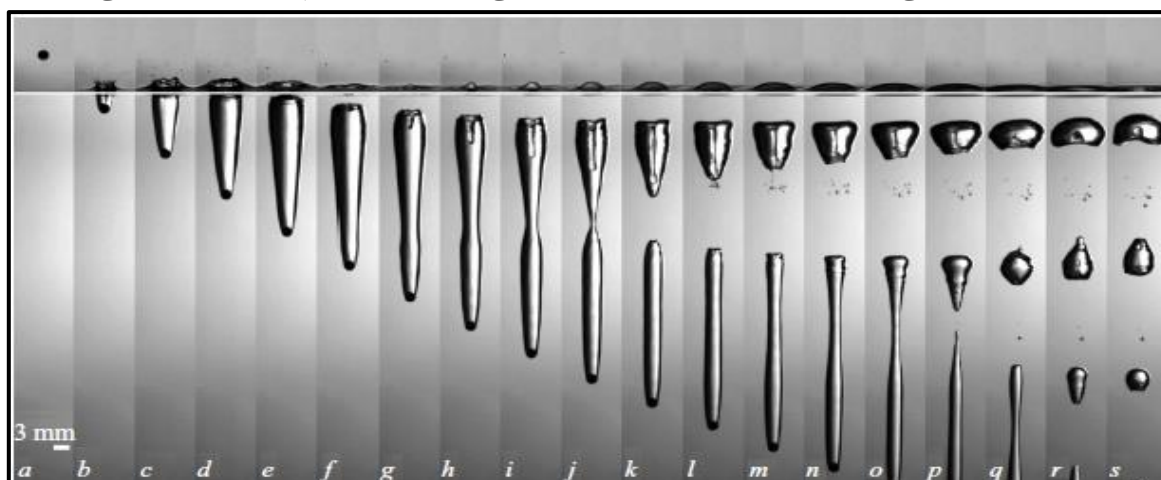
با افزایش بیشتر عدد وبر کاواک بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. همچنین نقطه جدایش در عمق بیشتر، تقریباً بین سطح آزاد آب و پرتابه رخ می‌دهد. ریزموج‌های روی سطح کاواک نیز با سرعتی حدود نصف سرعت پرتابه منتشر می‌شوند. طبق مطالعات انجام شده در اعداد باند بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ فقط رژیم جدایش عمیق و جدایش سطحی ایجاد می‌شود. طبق مطالعات صورت گرفته توسط لی و همکاران [۵۱] رژیم جدایش عمیق در بازه عدد فرود $\sqrt{70} < Fr < \sqrt{20}$ رخ می‌دهد. همچنین انتقال از رژیم جدایش عمیق به جدایش سطحی در اعداد فرود $Fr > \sqrt{150}$ اتفاق می‌افتد. در شکل ۲-۲۲ می‌توان نمونه‌ای از رژیم برخورد جدایش عمیق را مشاهده کرد.



شکل ۲-۲۲: روند شکل‌گیری کاواک در رژیم جدایش عمیق توسط ورود گوی فلزی آب‌گریز در آب [۹]

۲-۲-۴ رژیم جدایش سطحی

با افزایش عدد ویر نسبت به رژیم جدایش عمیق، کاواک بلند و متصل به پرتابه تشکیل می‌شود، جدایش کاواک در نزدیکی سطح ایجاد می‌شود که به آن جدایش سطحی گفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۲۳، نمونه‌ای از رژیم جدایش سطحی قابل مشاهده است. پس از جدایش سطحی، کاواک منبسط می‌شود و فشار آن کاهش می‌یابد و در نتیجه از سطح جدا می‌شود. با افزایش عمق آب بالای کاواک، یک ناپایداری ریلی تیلور در بالای کاواک ایجاد می‌شود و یک جت آب از بالا به پایین در کاواک نفوذ می‌کند. با افزایش عمق ممکن است، چند جدایش متوالی اتفاق بیفتد که با هر جدایش متوالی مقداری از حجم کاواک کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۲۳: روند شکل‌گیری کاواک در رژیم جدایش سطحی توسط ورود گوی فلزی آب‌گریز در آب [۹]

فصل ۳: معرفی مسند و تجهیزات آزمایشگاهی

۳-۱ معرفی مسئله

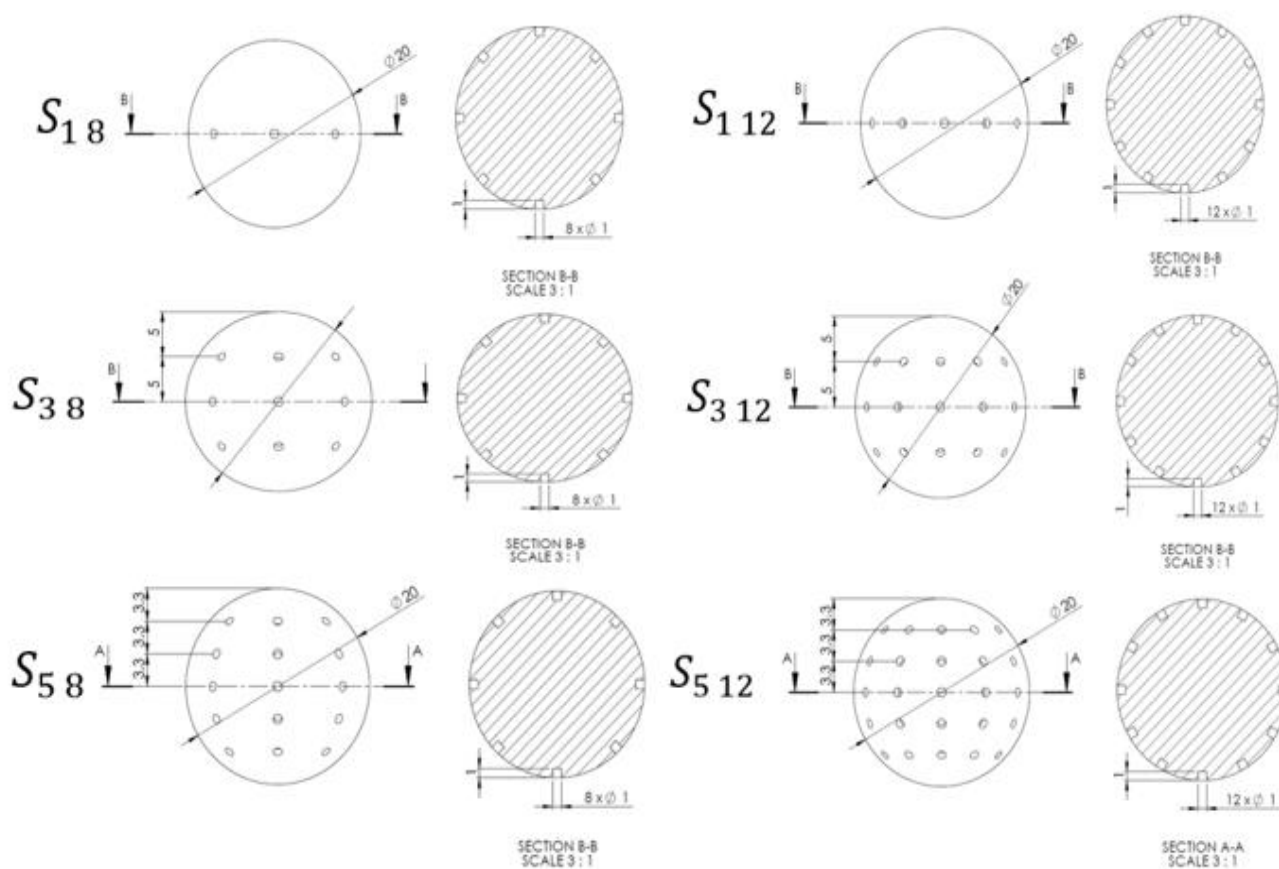
در این مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ایجاد دیمپل‌های سطحی در گوی‌های فلزی، بر رفتار هیدرودینامیکی، سرعت، مسیر حرکت، ضریب پسا و نحوه تشکیل کاواک، در سرعت‌های برخورد متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا گوی بدون دیمپل در ارتفاع‌های متفاوت در آب رهاسازی شد و با استفاده از دوربین سرعت‌بالا از مراحل ورود به آب گوی، تصویربرداری گردید. در مرحله بعد گوی‌های دارای دیمپل سطحی در آرایش‌های مختلف در ارتفاع متفاوت رهاسازی گردید؛ در ادامه مقایسه بین رفتار هیدرودینامیکی گوی بدون دیمپل و گوی‌های دارای دیمپل انجام گرفت.

۳-۲ معرفی پرتابه و تجهیزات آزمایشگاهی

گوی‌های مورد استفاده در این پژوهش از جنس فولاد و قطر ۲۰ میلی‌متر ($D_0 = 20[\text{mm}]$) صافی سطح $R_a = 0.06$ و چگالی $\rho = 8004.4 [\text{kg/m}^3]$ هستند. تعداد گوی‌های مورد استفاده ۷ عدد است بدین‌صورت که یک گوی بدون حفره و ۶ گوی دارای دیمپل‌های سطحی در آرایش و تعداد متفاوت است. با استفاده از ماشین‌کاری به روش اسپارک یا تخلیه الکتریکی (EDM) دیمپل‌های سطحی به قطر و عمق ۱ میلی‌متر بر روی سطح گوی‌ها اعمال گردید. در تصاویر شماره (۱-۳) و (۲-۳) عکس واقعی و شماتیک گوی‌ها مشاهده می‌شود. جهت نام‌گذاری گوی‌ها از نماد $S_{X,Y}$ استفاده شده، که به‌صورت قراردادی X تعداد ردیف حفره‌ها و Y تعداد دیمپل در هر ردیف در نظر گرفته شده است. برای نمونه همان‌طور که در تصویر شماره (۳-۳) مشاهده می‌شود، $S_{3,8}$ نماد گویی با ۳ ردیف دیمپل است که در هر ردیف آن ۸ عدد دیمپل وجود دارد. سیال مورد استفاده در این پژوهش، آب با کشش سطحی $\sigma = 72[\text{kg.s}^{-2}]$ چگالی $\rho = 998.2[\text{kg/m}^3]$ و لزجت دینامیک $\mu = 8.90 \times 10^{-3}[\text{pa.s}]$ و دمای 25 ± 3 درجه سانتی‌گراد است. رهاسازی گوی‌ها با استفاده از سازه فلزی باقابلیت تنظیم ارتفاع و یک الکترومگنت در استخر شیشه‌ای با سطح مقطع 20×20 سانتی‌متر و ارتفاع ۸۵ سانتی‌متر انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۱: تصویر گوی‌های فلزی مورد استفاده در این مطالعه



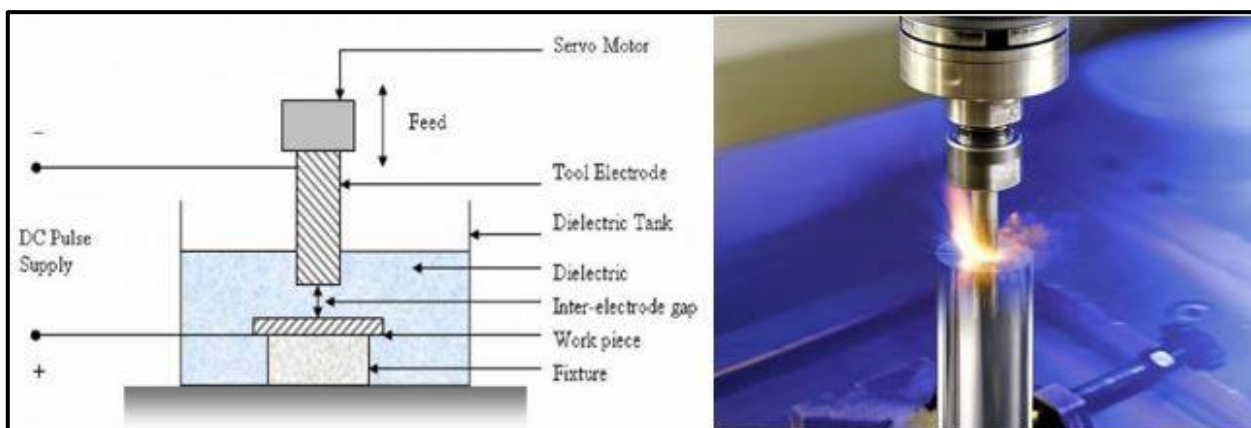
شکل ۳-۲: مشخصات شش گوی دارای دیمپل‌های سطحی مورد مطالعه

۳-۳ نحوه ایجاد دیمپل بر روی سطح گوی‌ها

جهت ایجاد شیار، سوراخ و یا طرح‌های خاص بر روی قطعات استوانه‌ای و کروی شکل به صورت منظم و دقیق از صفحه تقسیم تایکوپ استفاده می‌شود (شکل ۳-۳). این ابزار بسیار کاربردی دارای دیسک یا صفحاتی با تعدادی سوراخ بافاصله یکسان و مشخص است. ابتدا با استفاده از دستگاه تایکوپ و نقشه‌های گوی‌ها، محل ایجاد دیمپل بر روی سطح گوی‌ها مشخص می‌گردد؛ و با استفاده از روش ماشین‌کاری اسپارک سوراخ‌هایی با قطر و عمق ۱ میلی‌متر بر روی سطح گوی‌ها ایجاد می‌گردد. اسپارک نوعی روش نوین ماشین‌کاری است. در این روش که به آن تخلیه الکتریکی نیز گفته می‌شود. قطعات و ابزار در فاصله بسیار کم از هم قرار می‌گیرند و با استفاده از تزریق گاز بین الکترود و قطعه جرقه‌هایی متناوب و کنترل‌شده بر روی سطح اعمال و ماشین‌کاری انجام می‌گردد (شکل ۳-۴). از این روش جهت ماشین‌کاری قطعات با مقاومت گرمایی و سختی بالا استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان سوراخ‌هایی با قطر ۰/۳ تا ۳ میلی‌متر و با عمق متفاوت ایجاد کرد.



شکل ۳-۳: دستگاه صفحه تقسیم تایکوپ



شکل ۳-۴: روش ماشین کاری اسپارک

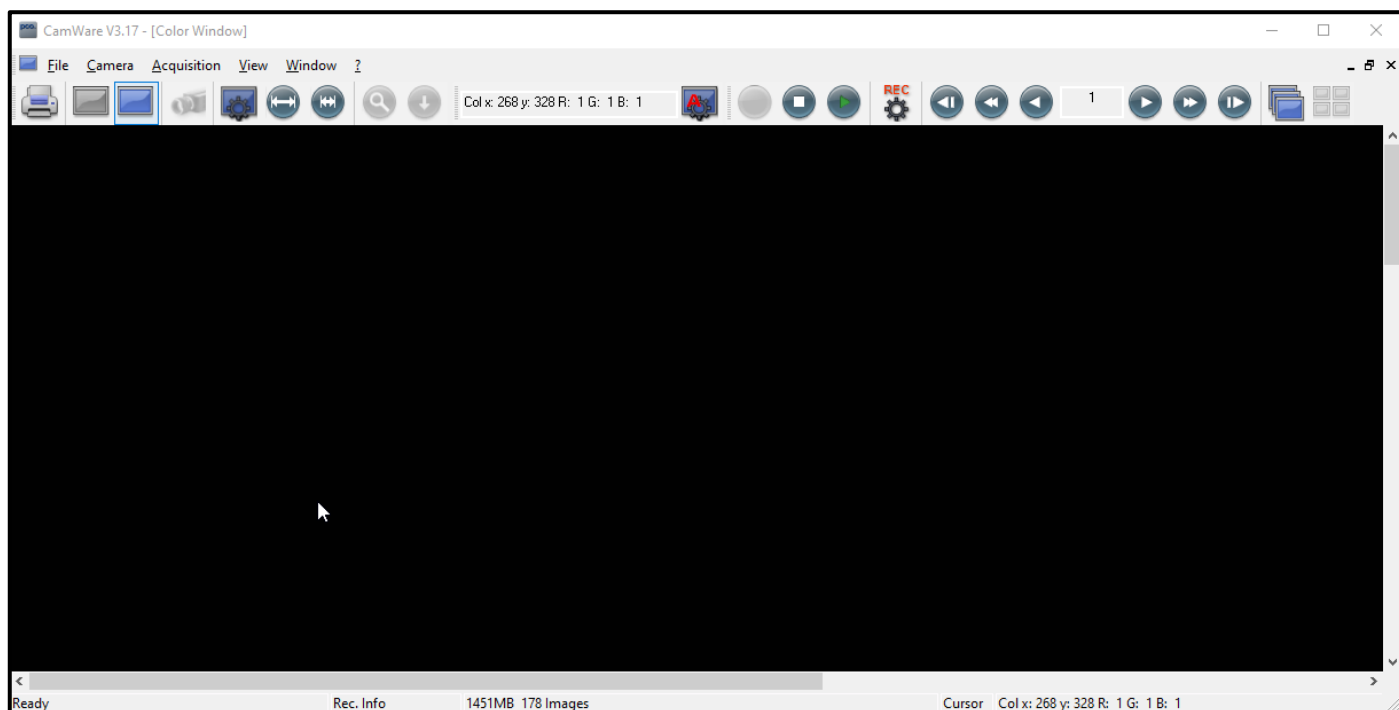
۳-۴ تصویربرداری

جهت تصویربرداری از لحظه سقوط گوی در آب از دوربین پرسرعت pco dimaxs s استفاده شده است. این سری از دوربین قابلیت ارائه تصاویر آهسته باکیفیت بالا در کاربردهای مختلف و در وضوح تصویر کامل، قابلیت تصویربرداری با نرخ ۴۴۶۷ فریم بر ثانیه را دارد (شکل ۳-۵).

با استفاده از نرم افزار camware v3.17 امکان تنظیم تمامی پارامترهای دوربین از جمله نورگیری، سایز تصویر، رنگ و تنظیمات دیگر وجود دارد. از ویژگی های دیگر نرم افزار می توان به امکان ذخیره کردن فیلم و عکس ثبت شده توسط دوربین در فرمت های متنوع اشاره کرد. در شکل (۳-۶) نمایی از محیط این نرم افزار نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: دوربین pco dimax s از سه نمای مختلف [۵۲]



شکل ۳-۶: نمایش محیط نرم افزار camware v3.17

۳-۵ نورپردازی

حتی گران ترین دوربین ها داخل یک اتاق کاملاً تاریک کارایی چندانی نخواهند داشت زیرا بخش عمده ای از کیفیت تصویر، ناشی از کار نورپردازی آن است. به ندرت پیش می آید که نور موجود در محیط برای تصویربرداری مناسب باشد. در این پژوهش جهت نورپردازی از پروژکتورهای ۲۰۰۰ وات یونیومات استفاده شده که در شکل ۳-۷ نحوه چینش پروژکتور و تجهیزات دیگر با توجه به نوع تصویر مدنظر، نشان داده شده است. همان طور در شکل ۳-۷ مشاهده می گردد برای ثبت تصاویر نوع ۱ و ۲ نور مستقیماً به استخر تابانده شده و برای ثبت تصاویر نوع ۳ نور به صفحه سفید پشت استخر تابانده شده است.



شکل ۳-۷: شکل سمت چپ چینش تجهیزات برای تصاویر نوع ۱ و ۲، شکل سمت راست چینش تجهیزات برای تصاویر نوع ۳

۳-۶ انواع تصویر

در این پژوهش آزمایشگاهی با توجه به هدف از تصویربرداری سه نوع تصویربرداری با ویژگی متفاوت انجام شده است. در ادامه به تشریح این سه نوع تصویر پرداخته می‌شود:

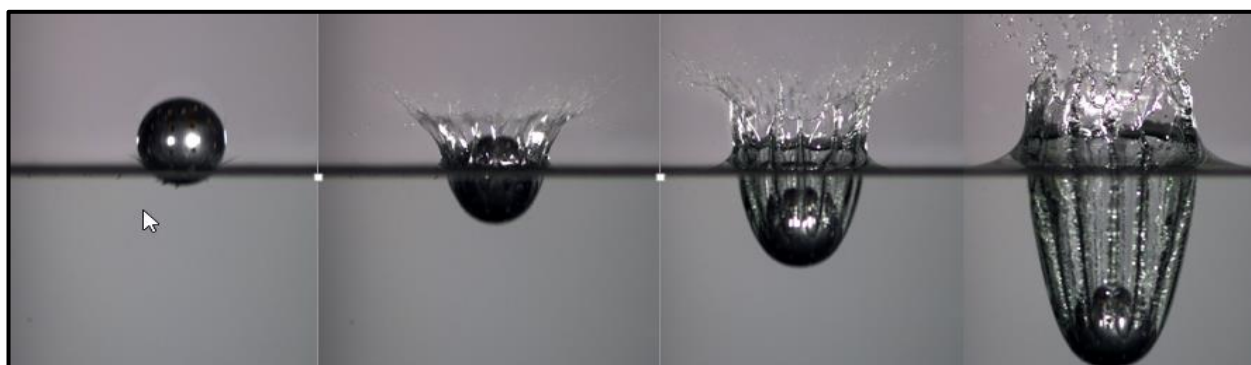
۳-۶-۱ تصاویر نوع ۱

این نوع تصویر از فاصله بسیار نزدیک و با وضوح تصویر بالا به منظور بررسی دقیق لحظه برخورد پرتابه به سطح آب، مراحل اولیه شکل‌گیری کاواک و مشاهده انواع پاشش آب با جزئیات بالا مورد استفاده قرار گرفته است. این تصاویر با استفاده از لنز ۱۰۵ میلی‌متری AF-S VR Micro-Nikkor از فاصله حدود یک متری ثبت شده و همچنین این لنز بسیار پیشرفته، جهت تصویربرداری ماکرو در موقعیت‌های متفاوت طراحی شده است (شکل

۳-۸). جهت نورپردازی از دو پروژکتور ۲۰۰۰ وات یونیمات و تاباندن نور به استخر آب استفاده و نمونه‌ای از این نوع تصویر در شکل شماره (۳-۹) ارائه گردیده است.



شکل ۳-۸: لنز ۱۰۵ میلی‌متری AF-S VR Micro-Nikkor [۵۳]



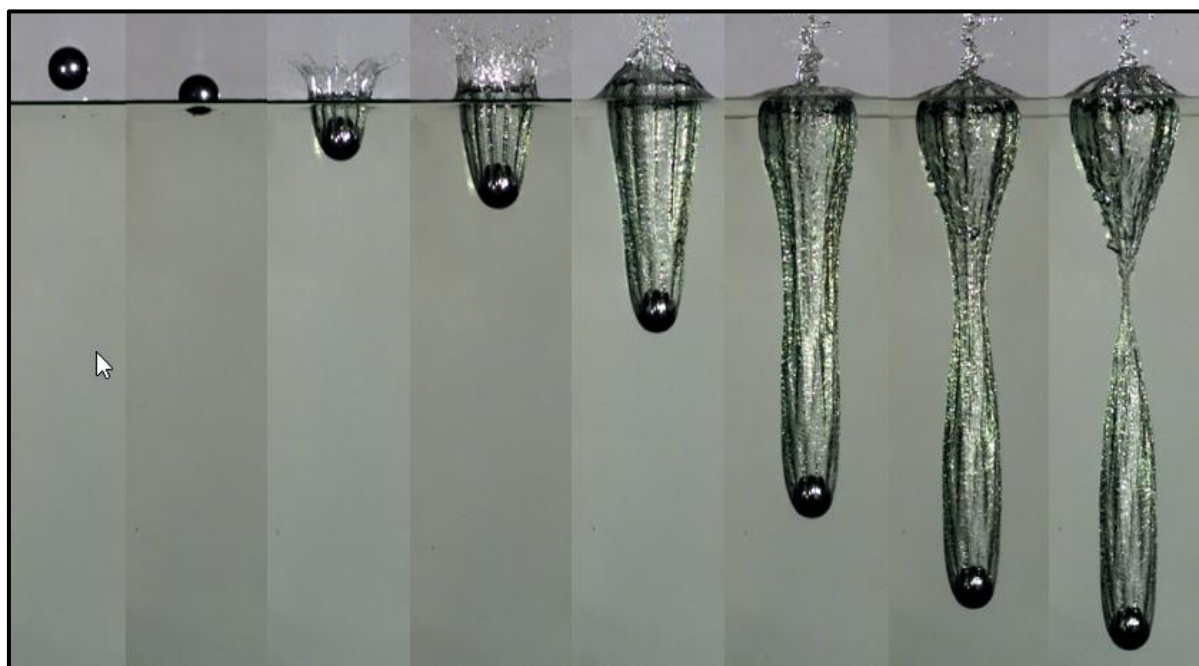
شکل ۳-۹: نمونه‌ای از تصویر نوع ۱ جهت مشاهده جزئیات دقیق از کاواک و پرده پاشش آب

۳-۶-۲ تصویر نوع ۲

این نوع تصاویر به منظور ثبت و بررسی مراحل شکل‌گیری کاواک به خصوص لحظه جدایش کاواک مورد استفاده قرار گرفته است. تصاویر با استفاده از لنز ۸۵ میلی‌متری Carl Zeiss 85mm f/1.4 Planar ثبت شده‌اند (شکل ۳-۱۰). این لنز نسبت به لنز ۱۰۵ میلی‌متری دارای عمق میدان بیشتر و عرض تصویر بیشتری است. جهت نورپردازی از ۲ عدد پروژکتور ۲۰۰۰ وات استفاده شده و دوربین در فاصله حدود ۳ متری از استخر آب قرار گرفته است. در شکل ۳-۱۱ می‌توان نمونه‌ای از تصاویر نوع ۲ را مشاهده کرد.



شکل ۳-۱۰: لنز ۸۵ میلی‌متری Carl Zeiss 85mm f/1.4 Planar [۵۴]

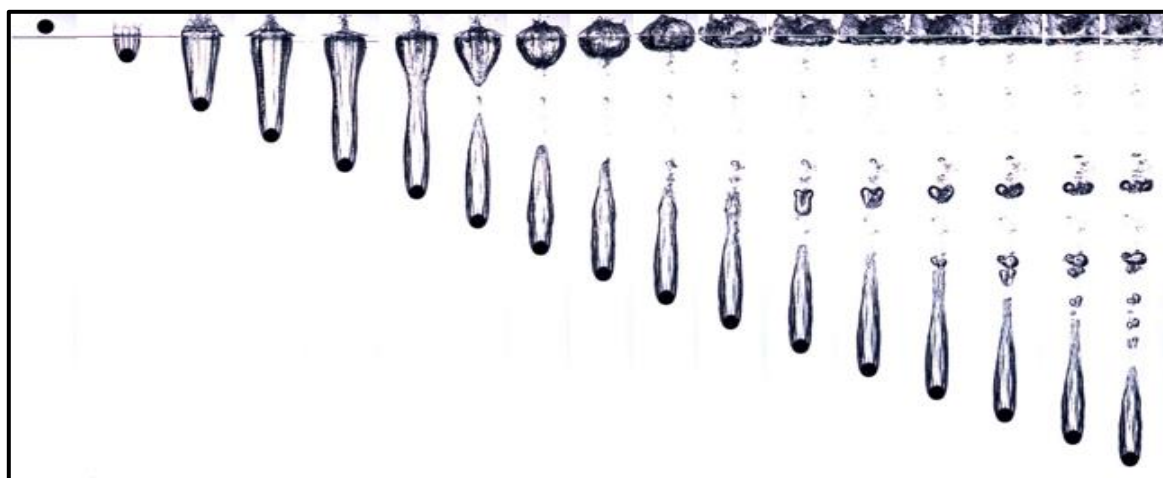


شکل ۳-۱۱: نمونه از تصویر نوع ۲ جهت مشاهده مراحل شکل‌گیری کاواک و نقطه جدایش کاواک

۳-۶-۳ تصویر نوع ۳

این تصاویر به منظور پوشش دادن کل استخر آب و پردازش تصویر به صورت سیاه و سفید و جهت به دست آوردن نمودارهای مکان، سرعت و شتاب گوی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصاویر با استفاده از لنز Carl Zeiss 85mm f/1.4 Planar از فاصله حدود ۸ متری ثبت شده، این نوع تصویر دارای طول کم و عرض

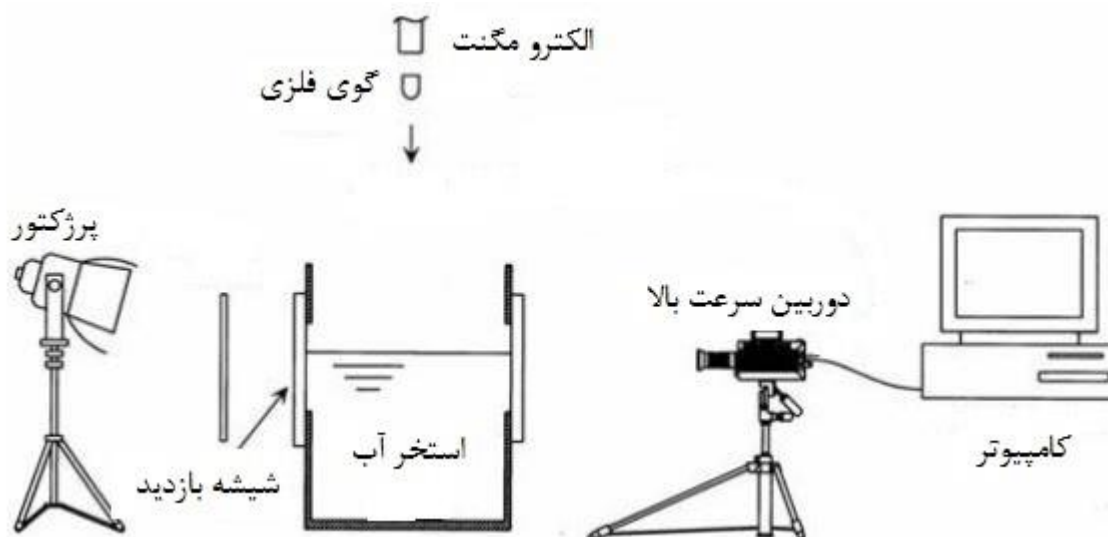
زیاد است. نورپردازی با استفاده از ۲ پروژکتور ۱۰۰۰ وات یونیمات و تاباندن نور به پشت استخر آب انجام گرفت. در شکل ۳-۱۲ می‌توان نمونه‌ای از این نوع تصویر را مشاهده کرد.



شکل ۳-۱۲: نمونه‌ای از شکل نوع ۳ جهت پردازش تصویر

۳-۷ نحوه سقوط گوی‌ها

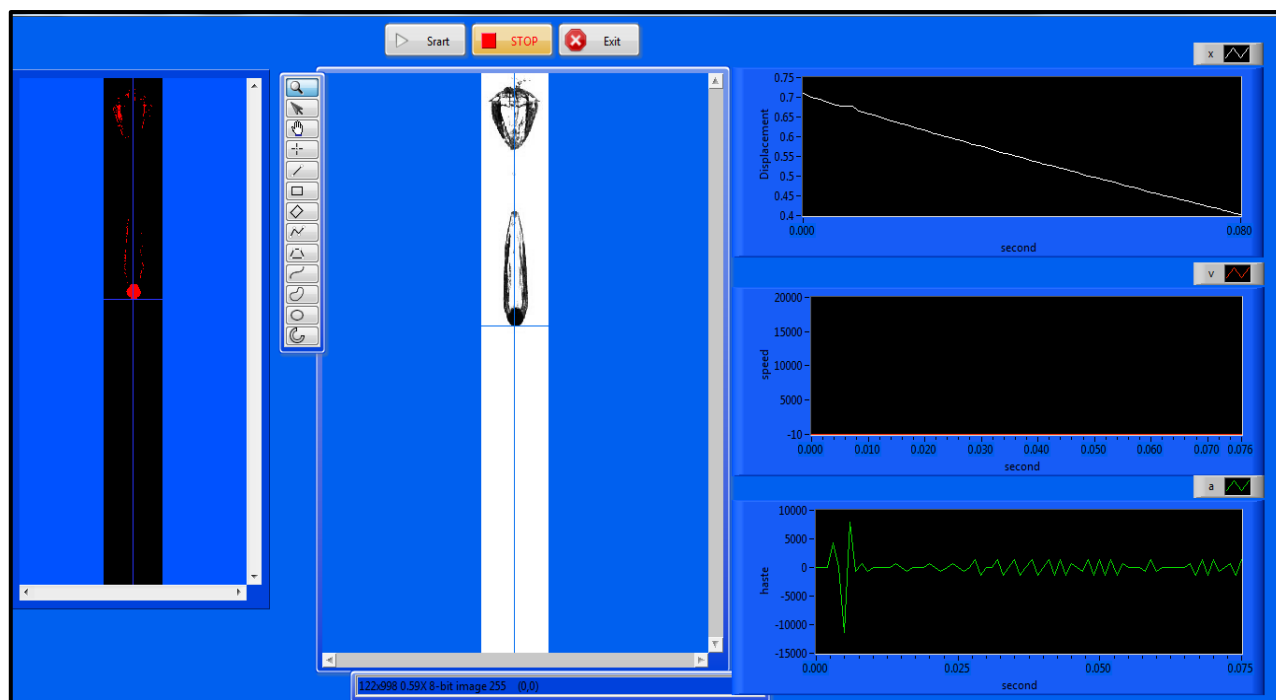
در ابتدا سازه فلزی رهاسازی گوی به صورت دقیق با استفاده از تراز تنظیم و سپس گوی‌ها به صورت دقیق و بدون انحراف به الکترومگنت متصل می‌شود تا در زمان برخورد گوی‌ها به سطح آب هیچ گونه انحرافی نداشته باشند. در مرحله بعد با قطع کردن جریان برق، گوی از الکترومگنت رها و با استفاده از دوربین پرسرعت از ورود گوی در استخر آب تصویربرداری می‌شود. سرعت سقوط آزاد گوی‌ها در زمان برخورد به سطح آب را می‌توان با استفاده رابطه $U_0 \cong \sqrt{2gh_c}$ تخمین زد. در این رابطه h_c ارتفاع رهاسازی گوی و U_0 سرعت برخورد گوی به سطح آب است. ارتفاع رهاسازی گوی در این پژوهش به ترتیب برابر با ۰/۵، ۱۰، ۳۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتیمتر می‌باشد. در شکل ۳-۱۳ نحوه رهاسازی و تصویربرداری از ورود گوی در آب به صورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۳: شکل شماتیک نحوه رهاسازی و تصویربرداری ورود گوی فلزی در آب [۵۵]

۳-۸ پردازش تصویر

با پیشرفت فناوری، پردازش تصویر در تمامی صنایع و حتی زندگی روزمره ما جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. از کاربردهای پردازش تصویر می‌توان به شمارش و اندازه‌گیری اشیاء و کاربردهای فراوان دیگر اشاره کرد. یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهایی که می‌توان از آن در زمینه پردازش استفاده کرد نرم‌افزار لب ویو^۱ است. جهت به دست آوردن سرعت، شتاب و پارامترهای هیدرودینامیکی پرتابه، به وسیله تصاویر سیاه سفید، از کد پردازش تصویر استفاده شده، که این کد به وسیله نرم‌افزار لب ویو ایجاد گردیده است. کد به وسیله تصاویر سیاه سفید عریض، ثبت شده توسط دوربین پرسرعت و تشخیص گوی‌ها به عنوان پیکسل‌های سیاه توسط کد پردازش تصویر، نمودار مکان، سرعت و شتاب در یک فایل اکسل رسم می‌گردد. تمامی مسیر سقوط گوی‌های فلزی از لحظه ورود به آب تا پایین‌ترین نقطه استخر آب توسط کد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۱۴ محیط نرم‌افزار پردازش تصویر قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۴: تصویری از محیط نرم‌افزار پردازش تصویر

فصل ۴: نتایج

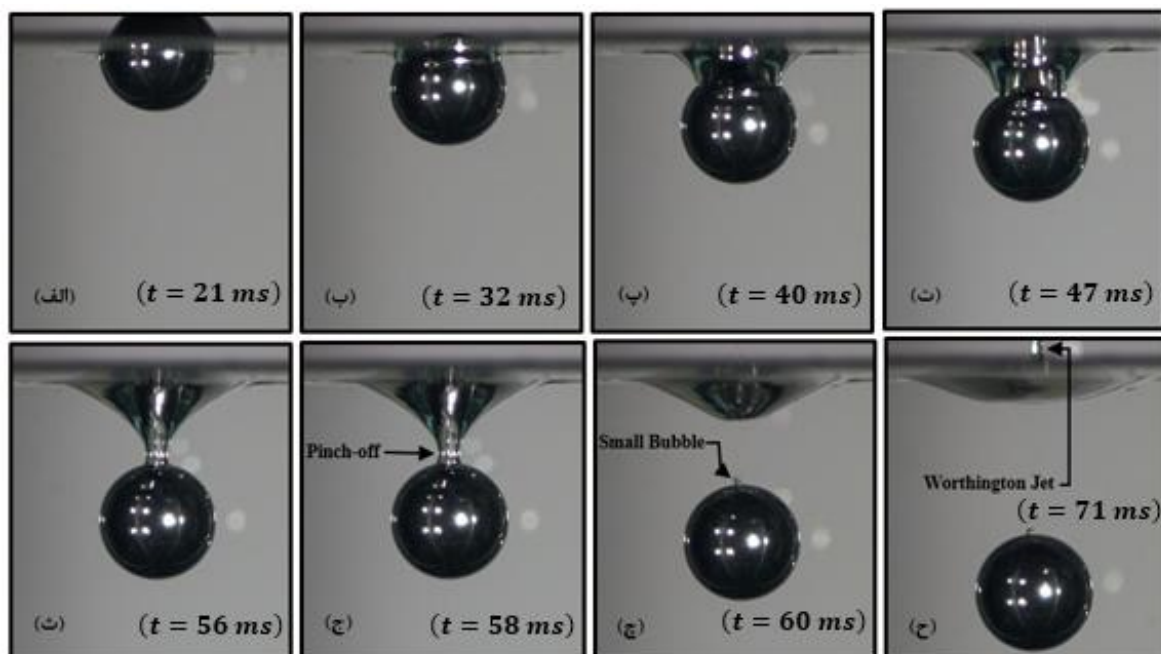
در فصل ۴ به ارائه نتایج آزمایشگاهی و اثر دیمپل‌های سطحی، بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی رها شده در استخر آب در ارتفاع‌های مختلف (۰/۵، ۱۰، ۳۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر) پرداخته خواهد شد. چنانکه در فصل قبل اشاره گردید، هفت گوی فلزی مورد آزمایش قرار گرفته است. یک گوی بدون دیمپل سطحی و شش گوی دارای دیمپل‌های سطحی در آرایش‌های مختلف که مشخصات گوی‌ها کاملاً توضیح داده شده است.

۴-۱ نتایج رهاسازی گوی‌های فلزی از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر

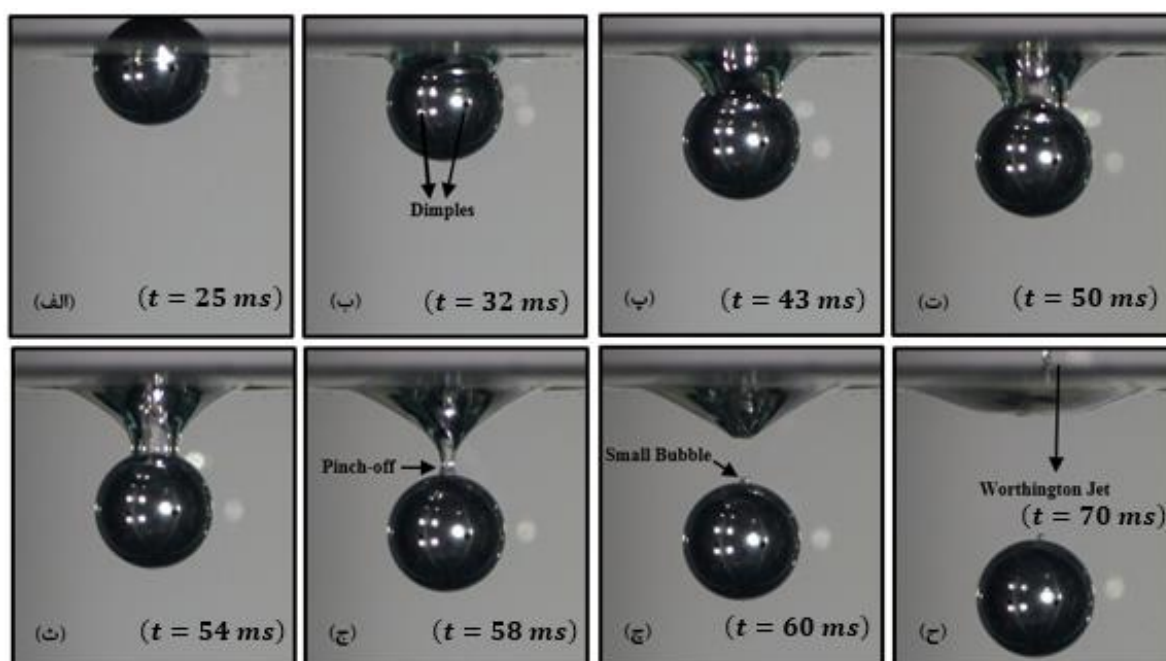
در این قسمت نتایج تأثیر دیمپل‌های سطحی بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی رها شده در آب ارائه شده است. گوی‌ها از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر، با سرعتی در حدود ۰/۳۱۳ متر بر ثانیه به سطح آب برخورد کرده و وارد آب می‌شوند. مقادیر اعداد بی‌بعد برای گوی‌ها برابر است با $Fr = 1$ و $Ca = 3.83 \times 10^{-3}$ و $W = 13.58$ ، $Bo = 13.58$ و $Re = 7019.7$. در تمامی گوی‌ها رژیم برخورد شبه استاتیک مشاهده گردید. پس از سقوط گوی بدون دیمپل سطحی $S_{0,0}$ از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری، گوی به آرامی در آب غرق می‌گردد و مقدار بسیار کمی هوا در پشت گوی وارد آب می‌گردد و یک کاواک جزئی، متقارن و پایدار به وجود می‌آورد (شکل ۴-۱ (الف-ث)) دلیل این رفتار هیدرودینامیکی ارتفاع رهاسازی کم‌گوی و پایین بودن نیروی وزن است و این باعث می‌شود که گوی به‌سختی بر نیروی‌های بین‌مولکولی آب غلبه پیدا کند. با پایین رفتن بیشتر گوی در آب جدایش کاواک، چسبیده به سطح گوی اتفاق می‌افتد (شکل ۴-۱ (ج)) پس از جدایش کاواک یک حباب کوچک متصل به گوی باقی می‌ماند (شکل ۴-۱ (چ)). همانطور که در شکل (۴-۱، (ح)) مشاهده می‌گردد در اثر جدایش کاواک یک ورتینگتون جت تشکیل می‌شود و همراه با کاواک به سمت سطح آزاد آب حرکت می‌کند. رفتار هیدرودینامیکی، گوی $S_{0,0}$ کاملاً منطبق بر رژیم برخورد شبه استاتیک است.

در سقوط تمامی گوی‌های فلزی دارای دیمپل‌های سطحی از فاصله ۰/۵ سانتی‌متری با شناسه‌های $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ رفتاری کاملاً مشابه با سقوط گوی بدون دیمپل در آب مشاهده شد. برای نمونه می‌توان در شکل‌های (۴-۲ و ۴-۳) رفتار گوی‌های دارای دیمپل‌های سطحی با شناسه‌های $S_{1,8}$

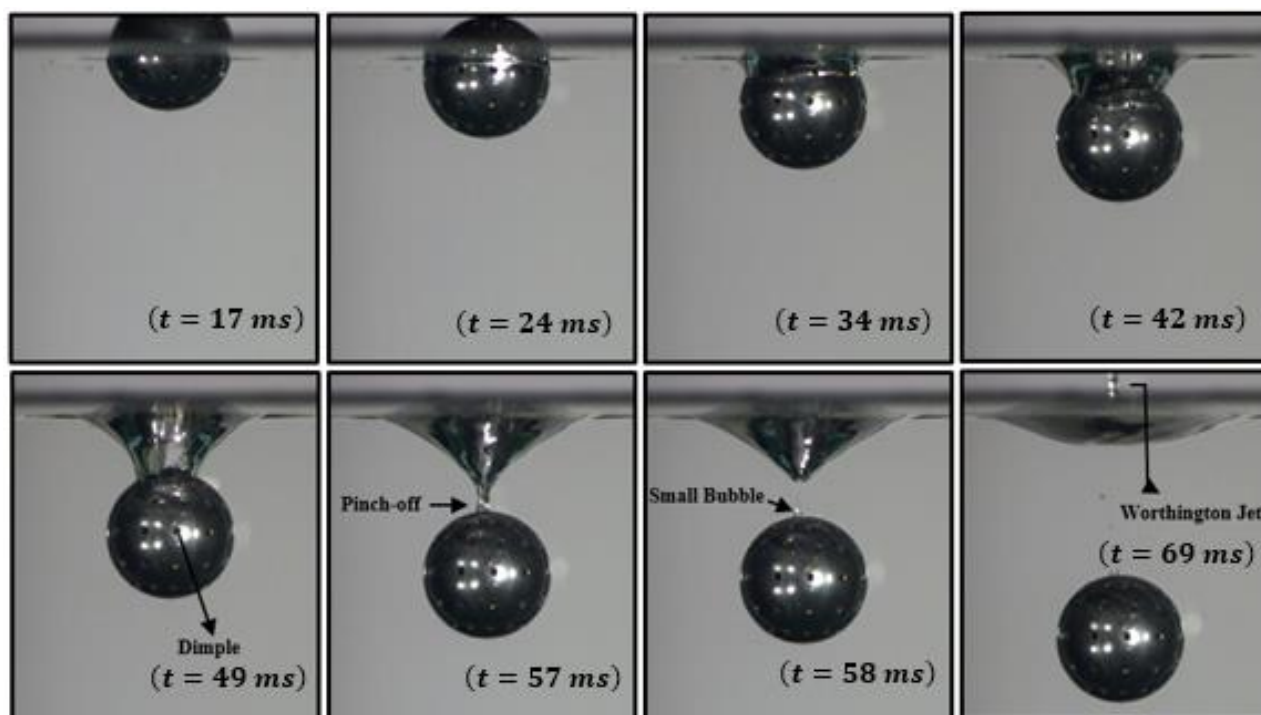
و $S_{5,12}$ را مشاهده کرد. در گوی‌های دارای دیمپل‌های سطحی نیز رژیم برخورد شبه استاتیک مشاهده گردید. دلیل آن تعادل بین نیروی گرانش و نیروی کشش سطحی است. به عبارت دیگر به دلیل ارتفاع رهاسازی کم، نیروی کشش سطحی بر نیروی وزن غلبه پیدا می‌کند.



شکل ۴-۱: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر
 $(Ca = 3.83 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 1, W=13.58, Re = 7019.7, U_0 = 0.313[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

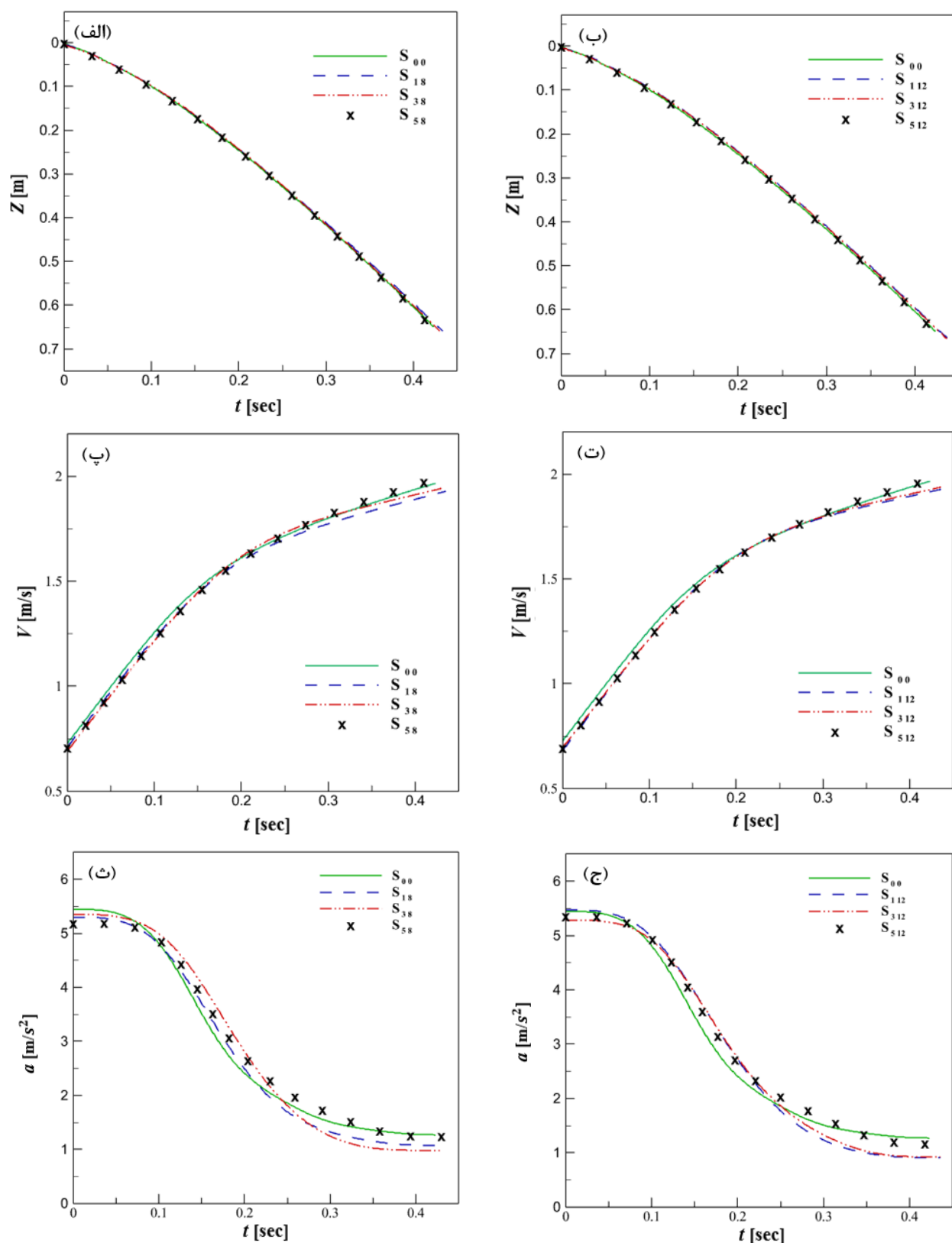


شکل ۴-۲: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر
 $(Ca = 3.83 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 1, W=13.58, Re = 7019.7, U_0 = 0.313[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

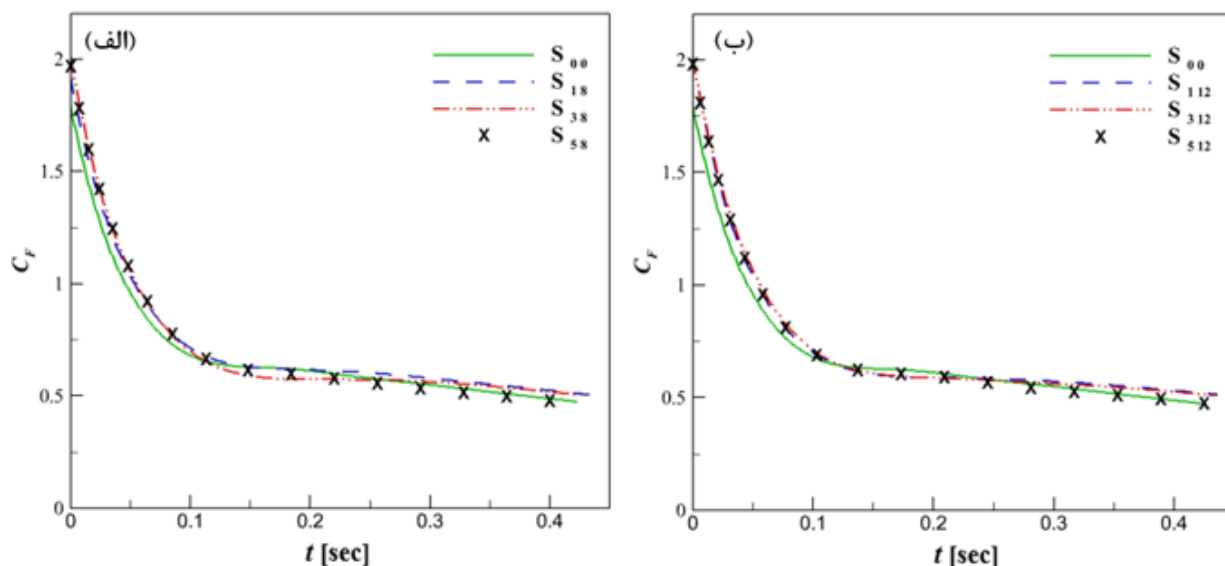


شکل ۴-۳: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع ۰/۵ سانتی متر
 $(Ca = 3.83 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 1, W=13.58, Re = 7019.7, U_0 = 0.313[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

در شکل ۴-۴ (الف، پ، ث) به ترتیب نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ در شکل ۴-۴ (ب، ت، ج) به ترتیب نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارها مشخص است. تغییرات مکان، سرعت و شتاب هر شش گوی دارای دیمپل‌های سطحی و گوی بدون دیمپل تقریباً بر هم منطبق هستند. دلیل آن مشابه بودن رفتار هیدرودینامیکی گوی‌ها در این ارتفاع رهاسازی است. همان‌طور که در شکل ۴-۵ نیز مشاهده می‌گردد تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی بدون دیمپل و گوی‌های دارای دیمپل سطحی در ارتفاع رهاسازی ۰/۵ سانتی‌متر باهم یکسان هستند.



شکل ۴-۴: (الف) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (ب) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (پ) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$ (ت) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$ (ث) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (ج) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$.

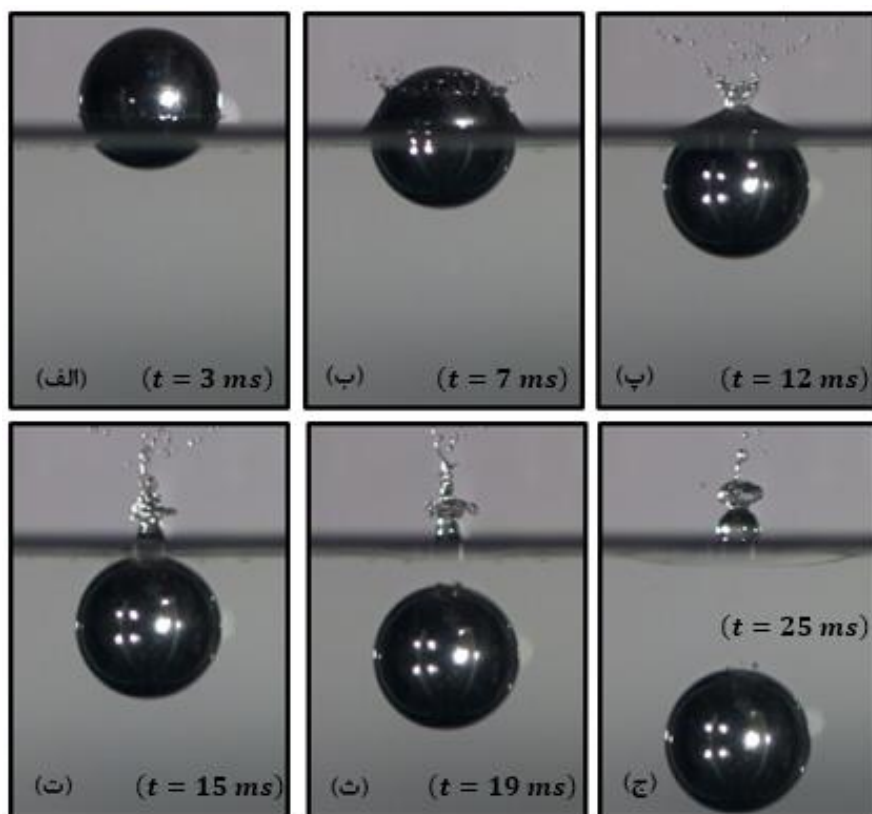


شکل ۴-۵: (الف) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,8}$, $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$

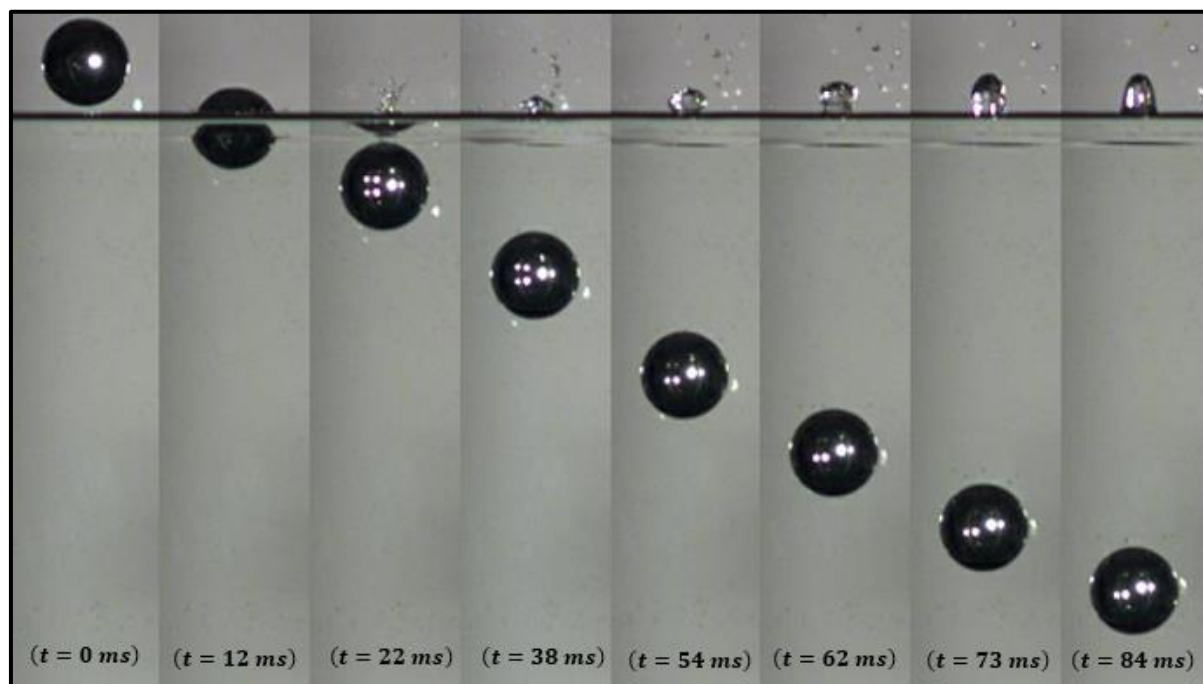
(ب) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,12}$, $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$

۴-۲ نتایج رها سازی گوی‌های فلزی از ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر

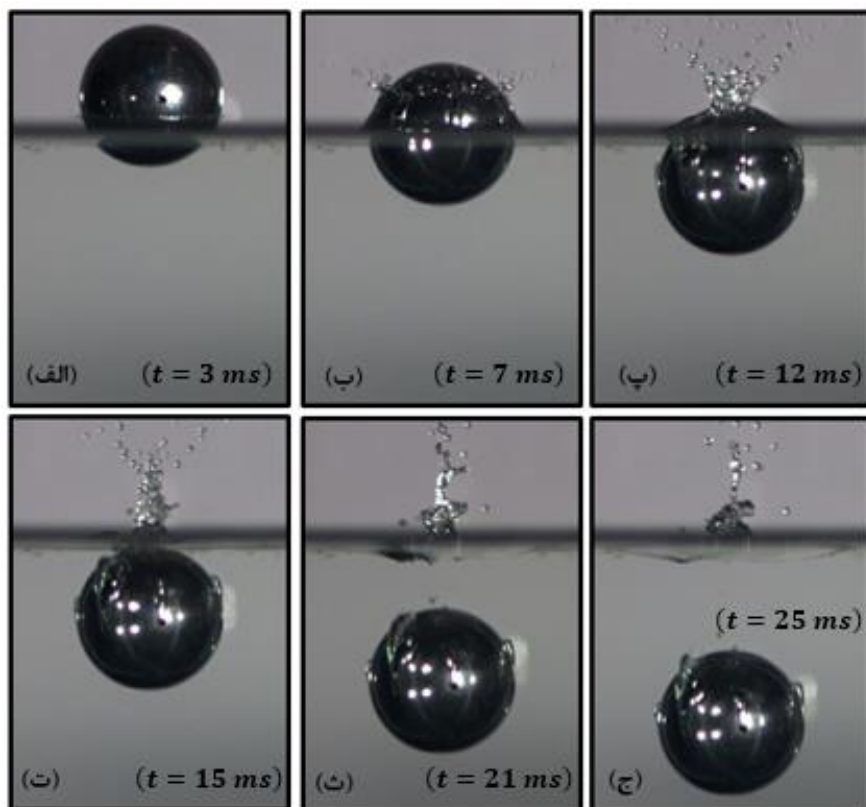
در این قسمت نتایج تأثیر دیمپل‌های سطحی بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی از ارتفاع رها سازی ۱۰ سانتی‌متر ارائه شده است. گوی‌ها در هنگام ورود به آب سرعتی معادل $1/4$ متر بر ثانیه دارند و اعداد بی بعد برای گوی‌ها برابر است با $Fr=20$, $Ca=17.29 \times 10^{-3}$, $W=271.4$, $Bo=13.58$ و $Re=31398$ بدون دیمپل $S_{0,0}$ و گوی‌های دارای دیمپل‌های سطحی $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ رفتاری مشابه به هم دارند و پس از ورود به آب هیچ‌گونه کاواکی تشکیل نمی‌دهند. رفتار چهار گوی دارای دیمپل‌های سطحی $S_{3,8}$, $S_{3,12}$, $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ مشابه هم است و کاواک‌هایی در محدوده رژیم جدایش نیمه عمیق ایجاد می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۴-۶ (الف-ت) مشاهده می‌شود پس از برخورد گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ به سطح آب یک جت شعاعی شکل می‌گیرد و در کمتر از ۱۵ هزارم ثانیه گوی کاملاً در آب فرو می‌رود و از سطح آب جدا می‌شود (شکل ۴-۶ (ت)) و یک ورتینگتون جت کوچک به سمت بالا شروع به شکل گرفتن می‌کند و مدتی بعد میرا می‌شود (شکل ۴-۷). دو گوی $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ نیز رفتاری مشابه گوی $S_{0,0}$ دارند تنها تفاوت این دو گوی این است که هنگام ورود به آب مقداری کمی هوا در برخی نقاط به سطح گوی می‌چسبند و با افزایش عمق گوی در آب، از سطح گوی جدا می‌شوند. رفتار گوی $S_{1,8}$ در هنگام ورود به آب در شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ نشان داده شده است.



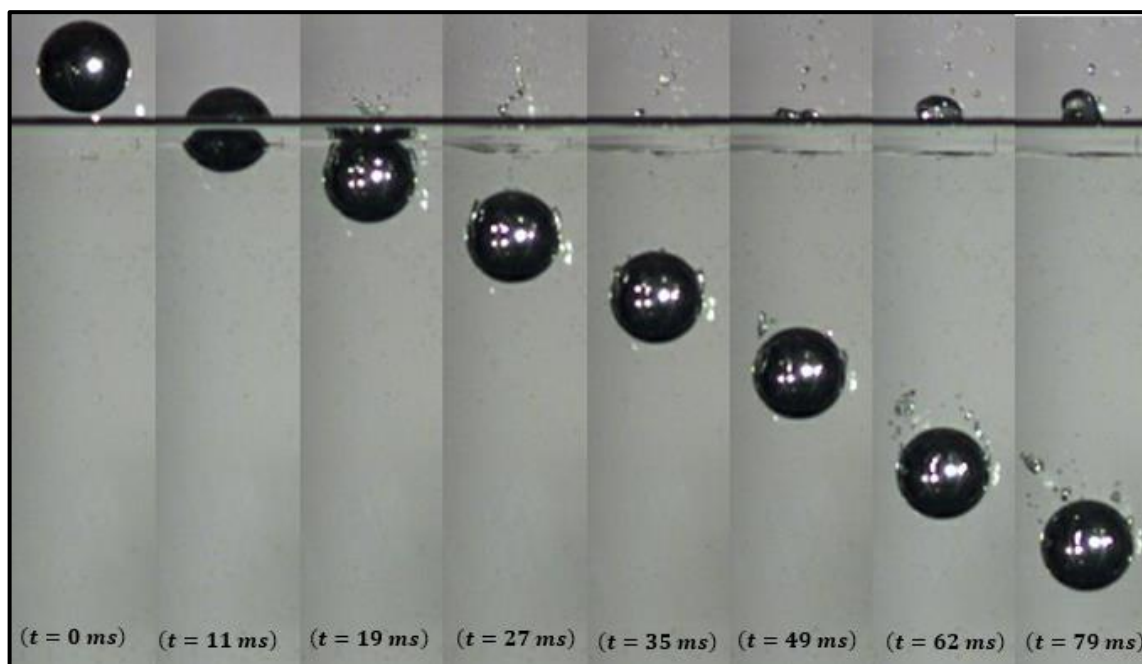
شکل ۴-۶: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 17.29 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 20, W=271.44, Re = 31398, U_0 = 1.4[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$



شکل ۴-۷: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۲)
 $(Ca = 17.29 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 20, W=271.44, Re = 31398, U_0 = 1.4[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

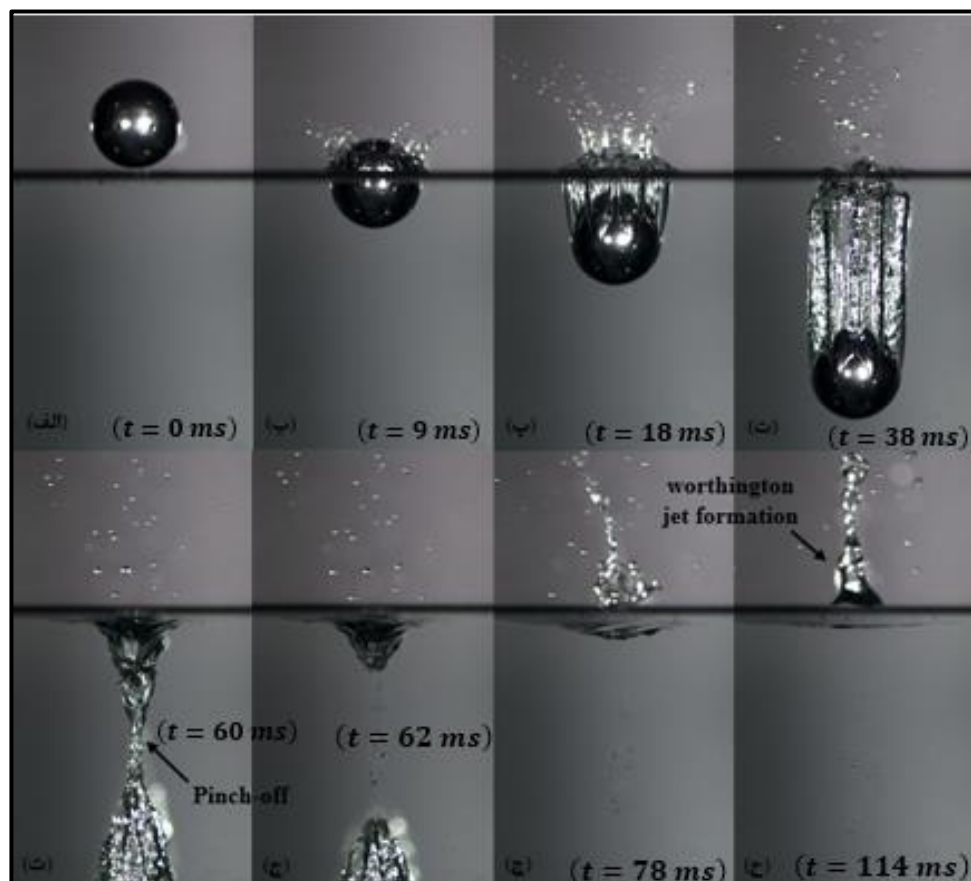


شکل ۴-۸: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 17.29 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 20, W=271.44, Re = 31398, U_0 = 1.4[ms^{-1}], D_0 = 20[mm])$

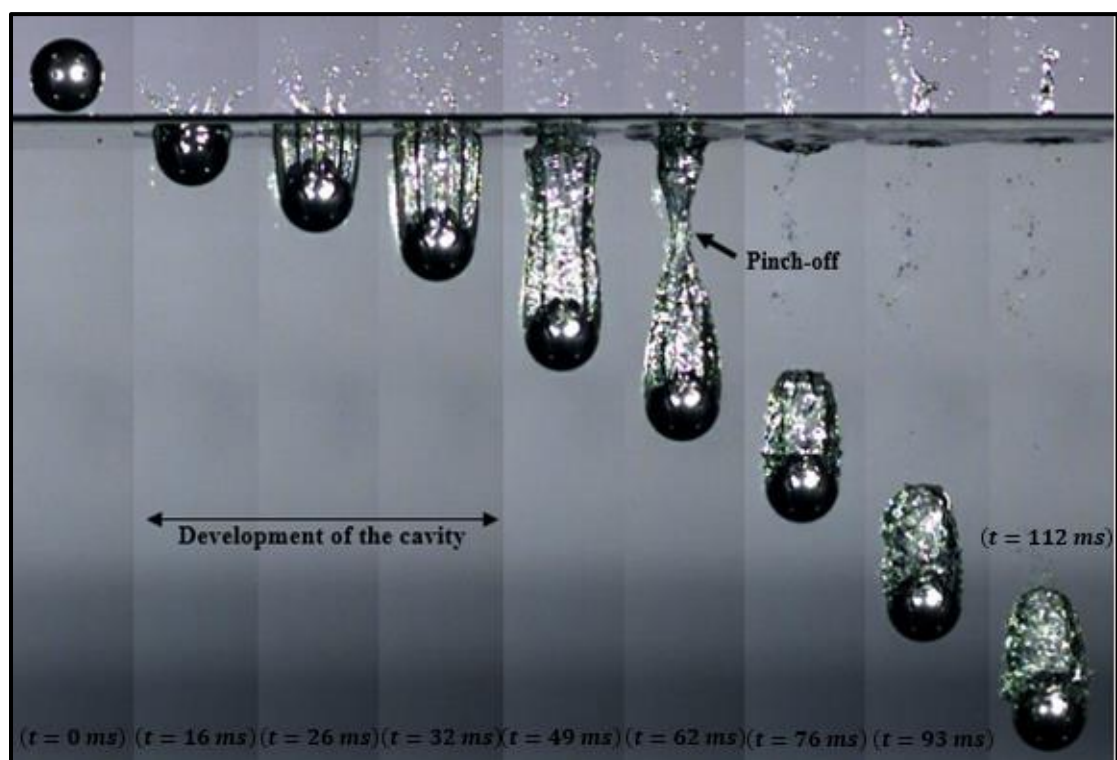


شکل ۴-۹: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۲)
 $(Ca = 17.29 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 20, W=271.44, Re = 31398, U_0 = 1.4[ms^{-1}], D_0 = 20[mm])$

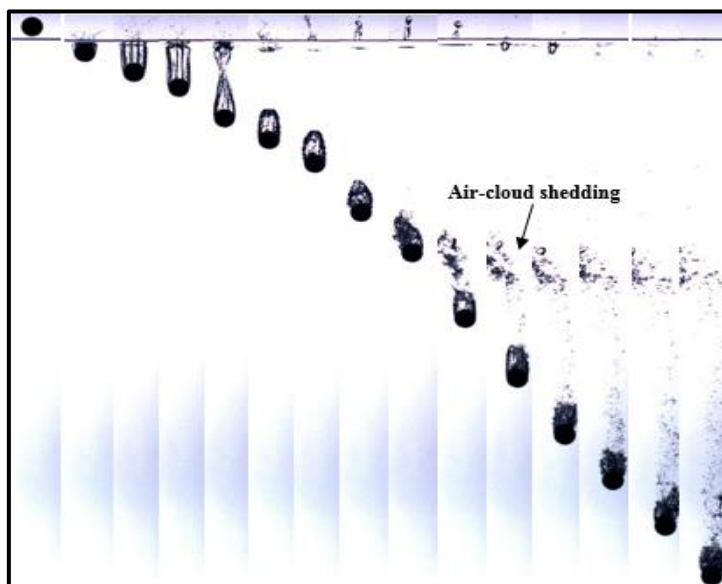
همان‌طور که در فصل ۲ نیز اشاره شد. یکی از کلیدی‌ترین دلایل شکل‌گیری و یا عدم شکل‌گیری کاواک خاصیت آب‌گریزی و یا آب‌دوستی سطح پرتابه است. درواقع با افزایش زاویه تماس بین سطح جسم و سیال، پرتابه خاصیت آب‌گریزی پیدا می‌کند. در گوی‌های دارای دی‌مپل‌های سطحی، هوا در داخل دی‌مپل‌ها به دام می‌افتد و به دلیل خاصیت آب‌گریزی هوا سطح گوی‌ها با توجه به تعداد دی‌مپل‌ها دارای خاصیت آب‌گریزی می‌شوند. بر اثر ورود چهار گوی $S_{3,8}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ و به دلیل خاصیت آب‌گریزی سطح آن‌ها به واسطه دی‌مپل‌های سطحی، کاواک‌هایی در محدوده رژیم جدایش نیمه عمیق ایجاد می‌گردد. رفتار و روند شکل‌گیری کاواک در این چهار گوی کاملاً مشابه هم است و تنها در مشخصات فیزیکی کاواک مانند طول، قطر، زمان و عمق نقطه جدایش کاواک باهم تفاوت دارند. برای مثال همان‌طور که در شکل ۴-۱۰ قابل مشاهده است در اثر ورود گوی $S_{3,8}$ در آب ابتدا قطرات آب به صورت شعاعی به اطراف پرتاب می‌شوند و به دلیل خاصیت آب‌گریزی سطح گوی به آن نمی‌چسبند و از آن دور می‌شود و در ادامه با افزایش عمق گوی هوا در پشت گوی وارد آب می‌شود و یک کاواک متقارن شکل می‌گیرد و ۵۶ هزارم ثانیه پس از برخورد گوی به سطح آب، گوی به نقطه جدایش کاواک می‌رسد و کاواک به دو بخش مجزا تقسیم می‌گردد. قسمت بالای کاواک به سمت سطح آزاد آب حرکت کرده و یک ورتینگتون جت عمودی شکل می‌گیرد و پس از ۱۳۰ هزارم ثانیه پس از برخورد به بالاترین ارتفاع خود می‌رسد و پس از آن سقوط کرده و میرا می‌شود (شکل ۴-۱۰ خ-ج)). پس از نقطه جدایش کاواک، قسمت پایین کاواک نیز به گوی چسبیده و به همراه گوی به سمت پایین حرکت می‌کند (شکل ۴-۱۱). با افزایش عمق، کاواک به صورت ابر هوا، شروع به فروریزش می‌کند و به مرور از حجم آن کاسته می‌شود روند فروریزش کاواک را می‌توان در شکل ۴-۱۲ مشاهده کرد.



شکل ۴-۱۰: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{3,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 17.29 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 20, W=271.44, Re = 31398, U_0 = 1.4[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$



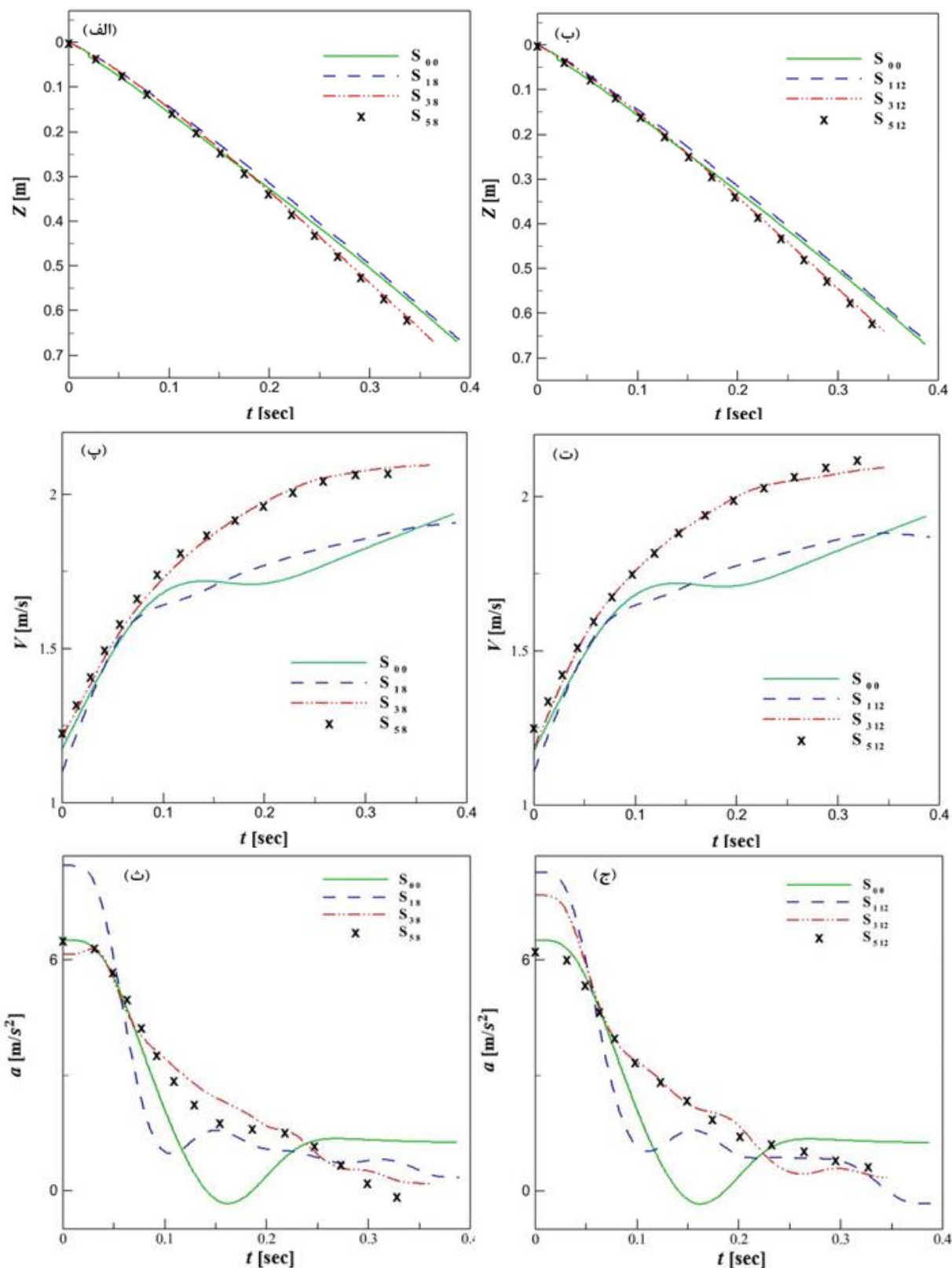
شکل ۴-۱۱: تصویر روند توسعه کاواک توسط گوی فلزی $S_{3,8}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی متر (تصویر نوع ۲)
 $(Ca = 17.29 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 20, W=271.44, Re = 31398, U_0 = 1.4[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$



شکل ۴-۱۲: تصویر روند فروریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{3,8}$ در آب (تصویر نوع ۳)

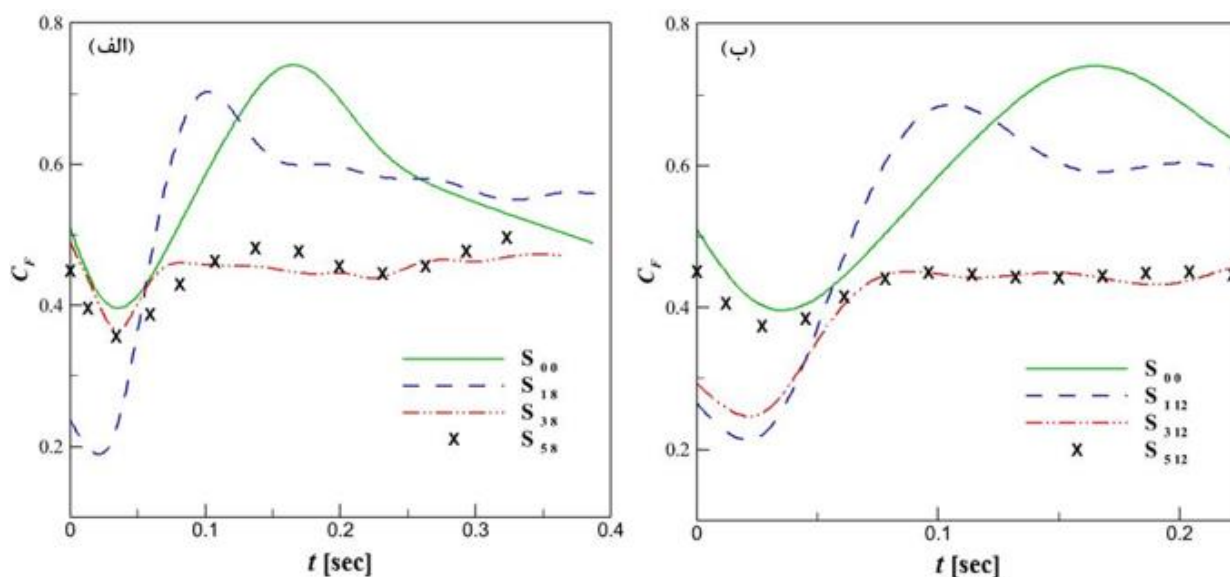
$$(Ca = 17.29 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 20, W=271.44, Re = 31398, U_0 = 1.4[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$$

در شکل ۴-۱۳ (الف-پ) به ترتیب نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان برای گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ نمایش داده شده است. دو گوی $S_{0,0}$ و $S_{1,8}$ که در زمان ورود به آب کاواکی تشکیل نداده‌اند مسیر حرکت در استخر آب را در بیشترین زمان و دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ مسیر حرکت را در کمترین زمان طی کرده‌اند. همچنین بر طبق نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب در ۴-۱۳ (پ و ث) گوی‌های $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ دارای بیشترین سرعت و شتاب و دو گوی $S_{0,0}$ و $S_{1,8}$ دارای کمترین سرعت و شتاب در زمان طی کردن مسیر در استخر آب را داشته‌اند. از بررسی نتایج می‌توان به تأثیر تشکیل کاواک در افزایش سرعت گوی‌ها در آب پی برد. در شکل ۴-۱۳ (ب-ت-ج) به ترتیب نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان برای چهار گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ نمایش داده شده است. بر اساس نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان دو گوی $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ که در هنگام ورود به آب کاواک تشکیل داده‌اند مسیر حرکت گوی در استخر آب را در کمترین زمان و دو گوی $S_{0,0}$ و $S_{1,12}$ زمان مسیر حرکت را در بیشترین زمان طی کرده‌اند. بر طبق نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب دو گوی $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ بیشترین سرعت و شتاب و دو گوی $S_{0,0}$ و $S_{1,12}$ که در زمان ورود به آب کاواک تشکیل نداده‌اند کمترین سرعت و شتاب را در زمان طی کردن مسیر حرکت در استخر آب به خود اختصاص داده‌اند. در این ارتفاع در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی، سرعت متوسط گوی $S_{5,12}$ نسبت به گوی $S_{0,0}$ ۸ درصد افزایش یافته است.



شکل ۴-۱۳: (الف) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (ب) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (پ) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$ (ت) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$ (ث) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (ج) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$

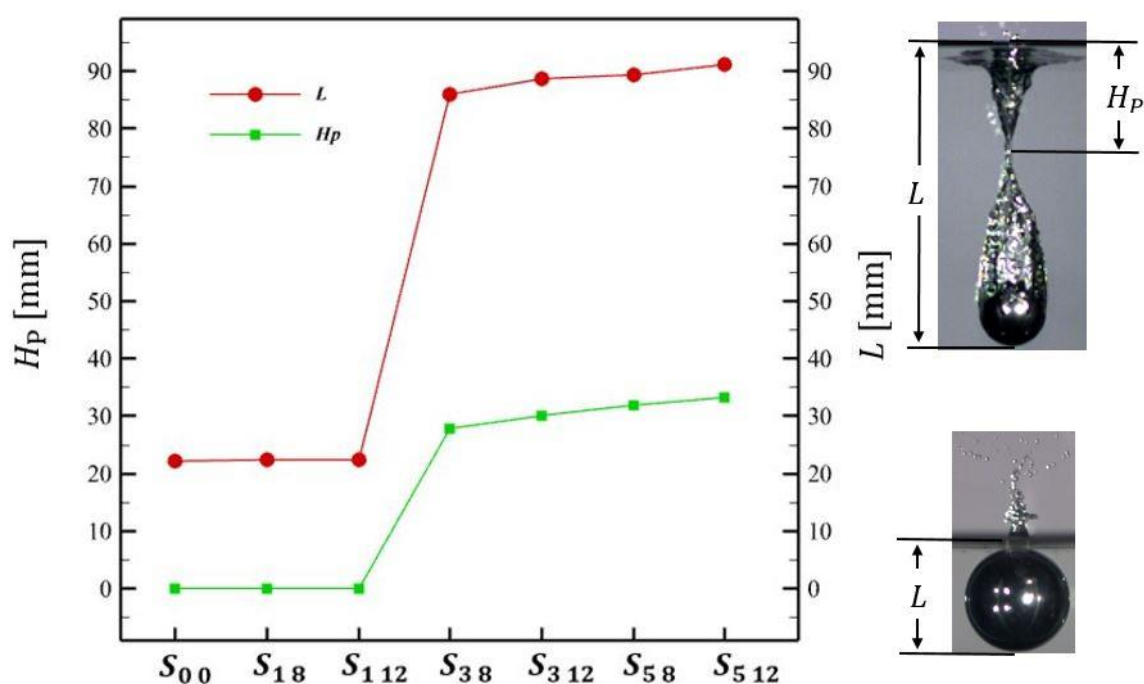
نیروی هیدرودینامیکی نحوه رفتار هیدرودینامیکی پرتابه در طول مسیر حرکت در سیال را نشان می‌دهد. به همین جهت می‌توان از ضریب نیروی هیدرودینامیکی در بررسی رفتار گوی‌ها در آب استفاده کرد. در شکل ۴-۱۴ (الف و ب) به ترتیب نمودارهای تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان چهار گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ و چهار گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۴ (الف) مشاهده می‌شود دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ به دلیل تغییرات سرعت کمتر، به واسطه تشکیل کاواک دارای تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی کمتر و نزدیک به هم دارند و دو گوی $S_{0,0}$ و $S_{1,8}$ تغییرات و مقدار ضریب هیدرودینامیکی بیشتری دارند. همچنین بر طبق شکل ۴-۱۴ (ب) دو گوی $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نزدیک به هم دارند و ضریب نیروی هیدرودینامیکی این دو نسبت به دو گوی دیگر کمتر و تغییرات کمتری دارد. و دو گوی $S_{0,0}$ و $S_{1,12}$ به دلیل تغییرات سرعت زیاد به واسطه عدم تشکیل کاواک دارای مقدار بیشتر و تغییرات زیاد ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به دو گوی دیگر است.



شکل ۴-۱۴: (الف) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$

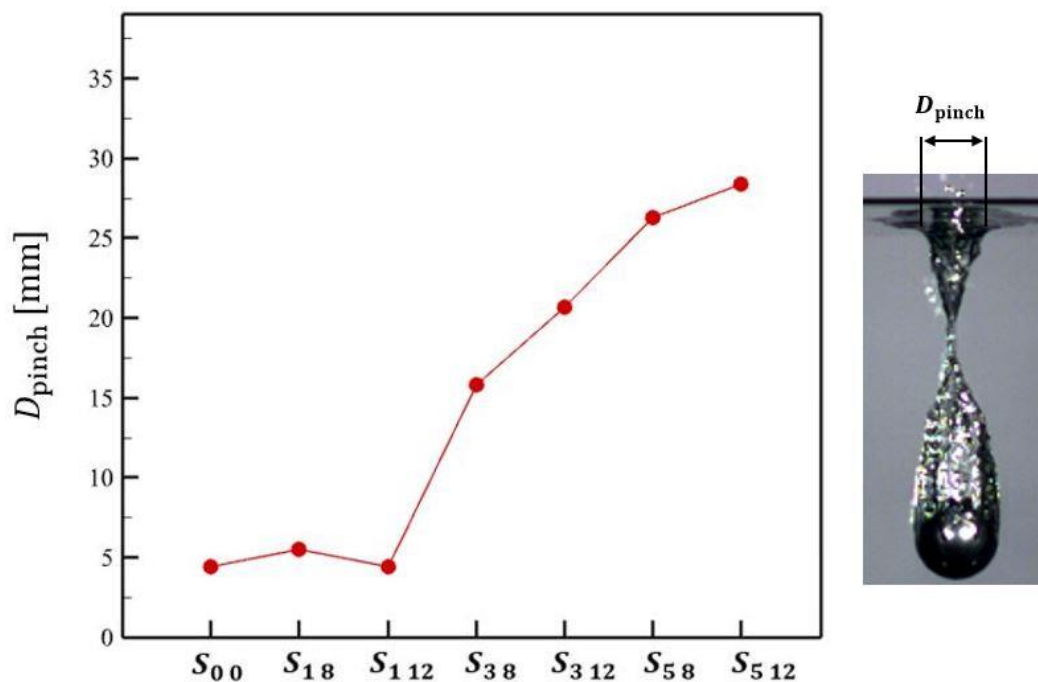
(ب) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$

در شکل ۴-۱۵ نتایج طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک، هفت گوی مورد مطالعه از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر ارائه شده است. با توجه به نتایج طول کاواک در شکل ۴-۱۵ به جزء سه گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ که کاواک تشکیل نداده‌اند. در چهار گوی دیگر با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌ها طول کاواک نیز افزایش پیدا کرده است. در مورد طول نقطه جدایش کاواک نیز با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌ها طول نقطه جدایش کاواک نیز افزایش یافته است به جزء سه گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ که به دلیل عدم تشکیل کاواک، طول نقطه جدایش کاواک در آن‌ها صفر است.



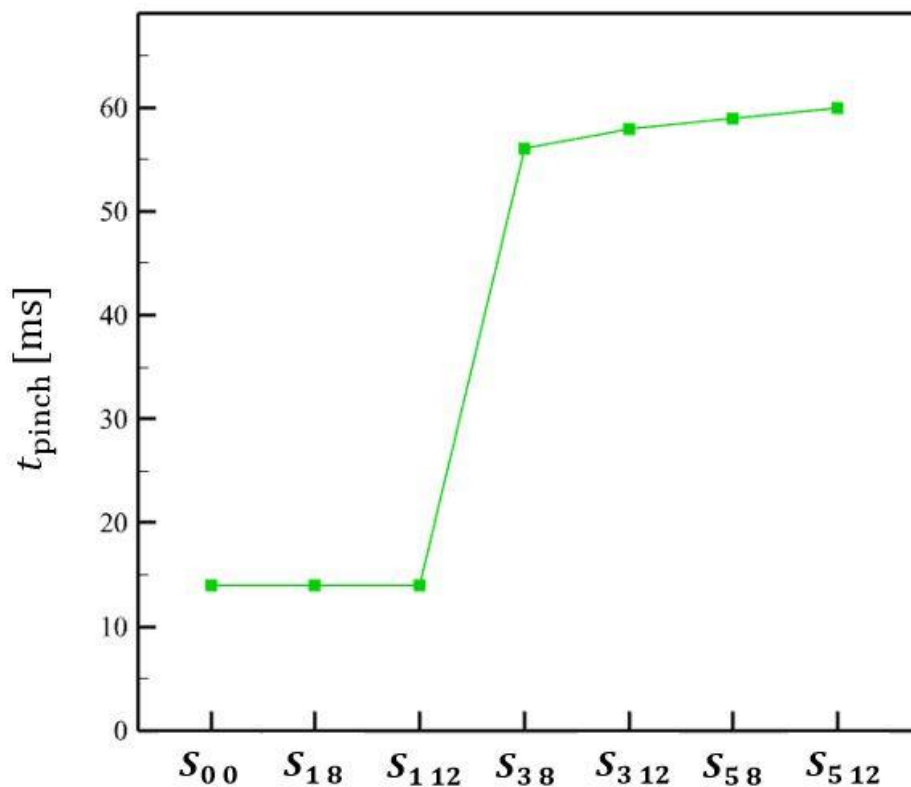
شکل ۴-۱۵: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر

قطر کاواک در گوی‌های مورد آزمایش نیز در نمودار شکل ۴-۱۶ نمایش داده شده است. بر طبق نمودار با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌ها بر روی سطح گوی‌ها قطر کاواک نیز افزایش پیدا کرده است به جزء گوی $S_{1,12}$ که نسبت به گوی $S_{1,8}$ مقدار کمی کاهش قطر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶: نمودار قطر کواک در زمان جدایش کواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر

زمان نقطه جدایش کواک نیز در شکل ۴-۱۷ به نمایش در آمده است. در سه گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ که در زمان ورود به آب کواکی تشکیل نداده‌اند زمان نقطه جدایش کواک مشابهی باهم دارند. اما در چهار گوی دیگر با افزایش دیمپل‌های سطحی بر روی سطح گوی‌ها، زمان نقطه جدایش کواک نیز بیشتر شده است.

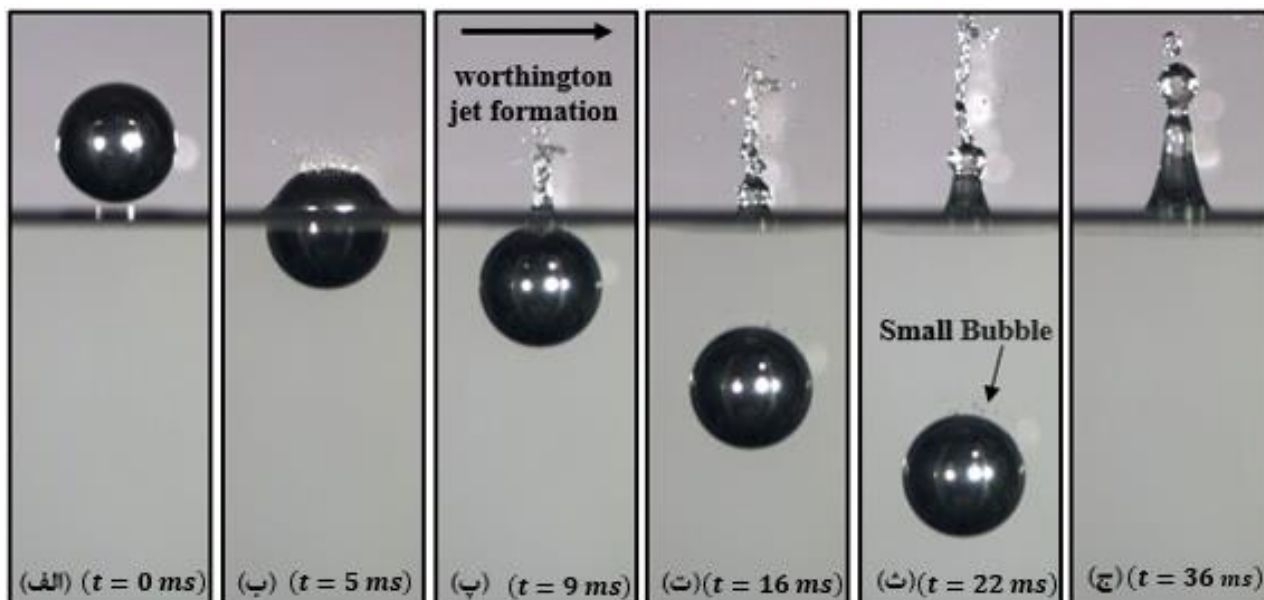


شکل ۴-۱۷: نمودار زمان نقطه جدایش کواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر

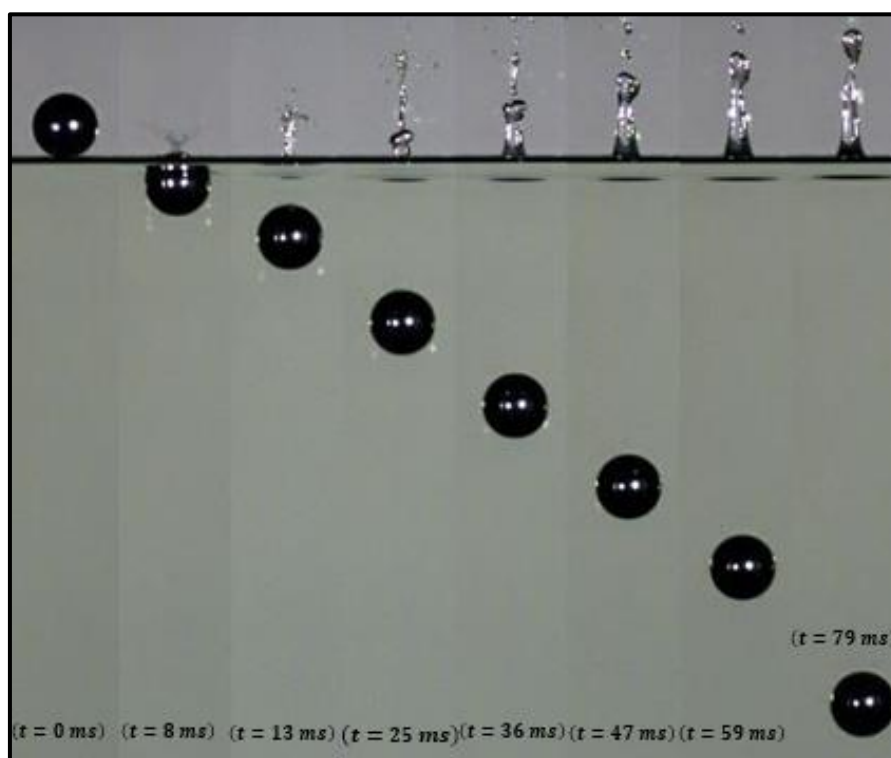
۴-۳ نتایج رهاسازی گوی‌های فلزی از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر

تأثیر ایجاد دیمپل‌های سطحی بر سرعت، شتاب و رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی با قطر ۲۰ میلی‌متر در ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر، در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. گوی‌ها با سرعتی در حدود $2/426$ متر بر ثانیه وارد آب می‌شوند. مقادیر اعداد بی‌بعد برای گوی‌ها فلزی به این صورت $Fr=60$ ، $Re=54408$ و $Ca=29.96 \times 10^{-3}$ ، $Bo=13.58$ ، $W=815.08$ است. با توجه به مشخصات و ویژگی‌های کاواک‌های ایجاد شده توسط گوی‌ها در آب، کاواک‌ها در محدوده رژیم‌های جدایش نیمه عمیق و عمیق است و به‌طور کلی کاواک‌های قابل‌توجه‌تری نسبت به کاواک‌های ایجاد شده در ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر ایجاد گردید. همچنین در اثر ورود گوی‌هایی که در ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر کاواک تشکیل نداده بودند در این ارتفاع کاواک مشاهده گردید؛ و نکته دیگر آنکه در اثر ورود گوی بدون دیمپل در آب مانند دو ارتفاع رهاسازی قبل کاواک تشکیل نگردید.

همان‌طور که در شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود. پس از ورود گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ ، در ابتدا جت شعاعی شروع به شکل گرفتن می‌کند؛ اما به دلیل آب‌گریز نبودن سطح گوی، به آن می‌چسبد و پس از جدا شدن گوی از سطح آزاد آب یک ورتینگتون جت عمودی در بالای سطح آزاد آب شکل می‌گیرد و پس از ۸۴ هزارم ثانیه پس از برخورد گوی به سطح آب به بالاترین ارتفاع خود می‌رسد و سپس شروع به سقوط و میرا شدن می‌کند همچنین پس از ورود گوی در آب حباب‌های بسیار کوچک به سطح گوی می‌چسبند و با افزایش عمق گوی از آن جدا می‌شوند (شکل ۴-۱۸(ث)). در شکل ۴-۱۹ رفتار گوی $S_{0,0}$ در طی مسیر حرکت در استخر آب، از فاصله دورتر نمایش داده شده است همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌گردد گوی با افزایش عمق مقداری از مسیر خود منحرف می‌شود.



شکل ۴-۱۸: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 29.96 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 60, W=815.08, Re = 54408, U_0 = 2.426[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$



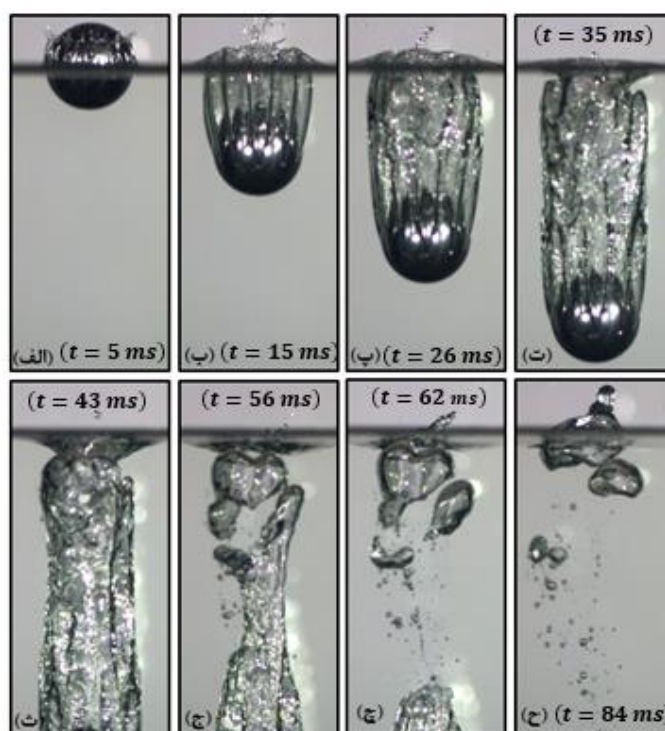
شکل ۴-۱۹: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی متر (تصویر نوع ۲)

$(Ca = 29.96 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 60, W=815.08, Re = 54408, U_0 = 2.426[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

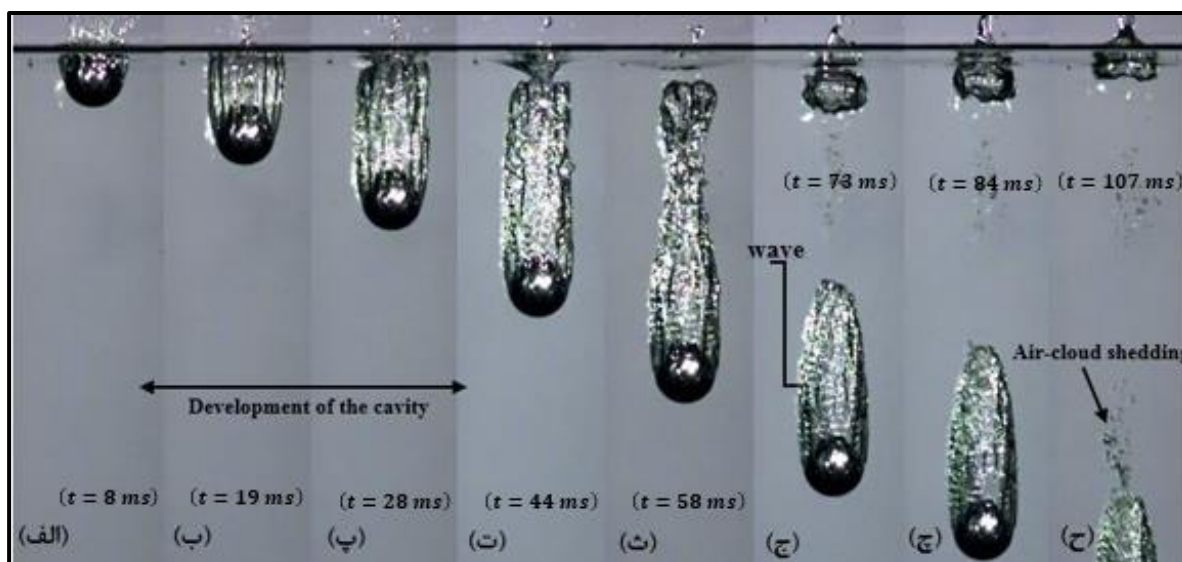
در اثر ورود دو گوی دارای دیمپل‌های سطحی $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ کاواک‌هایی در محدوده رژیم جدایش نیمه عمیق شکل می‌گیرد در حالی که در دو ارتفاع رهاسازی قبل این دو گوی کاواکی تشکیل نداده بودند. کاواک ایجاد شده توسط این دو گوی تفاوت نیز دارند گوی $S_{1,8}$ کاواک کوچک‌تر و متقارن‌تری نسبت به گوی $S_{1,12}$ تشکیل

می‌دهد. در شکل ۴-۲۰ روند شکل‌گیری کاواک توسط گوی $S_{1,12}$ نمایش داده شده است. پس از ورود گوی $S_{1,12}$ در آب، ابتدا یک جت شعاعی شکل می‌گیرد و در ادامه یک پرده پاشش آب بسیار کوچک شکل می‌گیرد و به سرعت بسته می‌شود در ادامه با افزایش عمق گوی، هوا به داخل آب کشیده می‌شود و کاواک نسبتاً بزرگی ایجاد می‌گردد و در حدود ۴۶ هزارم ثانیه پس از برخورد کاواک به دو بخش تقسیم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-۲۰ (ج) مشاهده می‌گردد نقطه جدایش در کاواک به صورت واضح صورت نمی‌گیرد و کاواک در نقطه جدایش تقارن محوری ندارد. پس از جدایش، قسمت بالای کاواک به سمت سطح آزاد آب حرکت می‌کند و یک ورتینگتون جت بسیار کوچک و نامتقارن ایجاد می‌کند (شکل ۴-۲۰ (ح)). پس از نقطه جدایش قسمت اصلی کاواک به گوی چسبیده و همراه گوی به سمت پایین حرکت می‌کند در شکل ۴-۲۱ روند توسعه و شکل‌گیری کاواک را مشاهده می‌کنید مطابق شکل موج‌هایی بر روی دیواره کاوک نیز مشاهده می‌شود. با افزایش عمق، کاواک شروع به فروریزش می‌کند فروریزش از نوع فروریزش ابری هوا است (شکل

۴-۲۱ (ح)).



شکل ۴-۲۰: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 29.96 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 60, W=815.08, Re = 54408, U_0 = 2.426[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

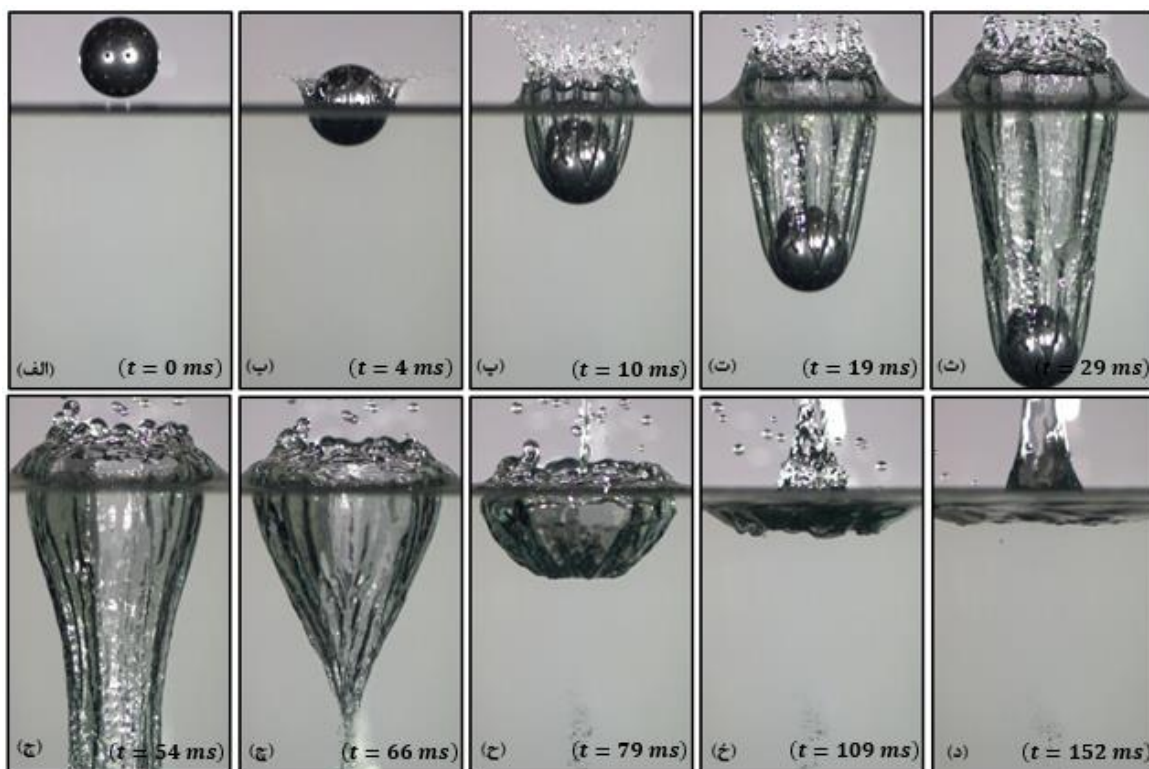


شکل ۴-۲۱: تصویر روند توسعه و فروریزش کاواک توسط گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب (تصویر نوع ۲)

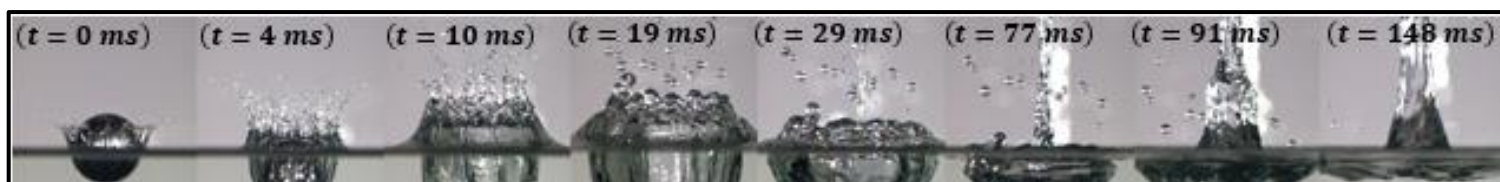
$$(Ca = 29.96 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 60, W=815.08, Re = 54408, U_0 = 2.426[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$$

در اثر ورود چهار گوی فلزی دیگر در آب، کاواک‌های قابل توجه‌تر و بزرگ‌تری ایجاد می‌گردد. با توجه به مشخصات و ویژگی‌های کاواک‌های ایجاد شده توسط چهار گوی $S_{3,8}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ همگی کاواک‌ها در محدوده رژیم جدایش عمیق قرار دارند. تفاوت کاواک‌های ایجاد شده در طول و قطر کاواک و مشخصات نقطه جدایش است اما روند شکل‌گیری و توسعه کاواک در چهار گوی تا حد زیادی باهم مشابه است. برای نمونه در شکل ۴-۲۲ (الف-ج) روند شکل‌گیری کاواک در اثر ورود گوی $S_{5,12}$ مشاهده می‌شود. پس از برخورد گوی به سطح آب، ابتدا یک جت شعاعی ایجاد می‌گردد و به دلیل خاصیت آب‌گریزی سطح گوی به آن نمی‌چسبند و در ادامه یک پرده پاشش آب زیبا به شکل ظروف شیشه‌ای ایجاد می‌گردد. با افزایش عمق گوی در آب ۶۲ هزارم ثانیه پس از برخورد، جدایش در کاواک اتفاق می‌افتد و کاواک به دو بخش مجزا تقسیم می‌گردد (شکل ۴-۲۲ (چ-د)). قسمت بالای کاواک پس از جدایش به سمت سطح آزاد آب حرکت می‌کند و پس از شکافتن سطح آب یک ورتینگتون جت عمودی بزرگ ایجاد می‌کند. در شکل ۴-۲۳ روند شکل‌گیری پرده پاشش آب و ورتینگتون جت در بالای سطح آب قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۴-۲۴ روند شکل‌گیری و توسعه کاواک را از فاصله دورتر مشاهده می‌شود پس از نقطه جدایش قسمت اصلی کاواک چسبیده به گوی به سمت پایین حرکت می‌کند و شروع به فروریزش و کوچک شدن می‌کند. در شکل ۴-۲۵ از فاصله‌ای دورتر، مسیر حرکت گوی در استخر آب مشاهده می‌گردد مطابق شکل ریبیل‌هایی بر روی دیواره

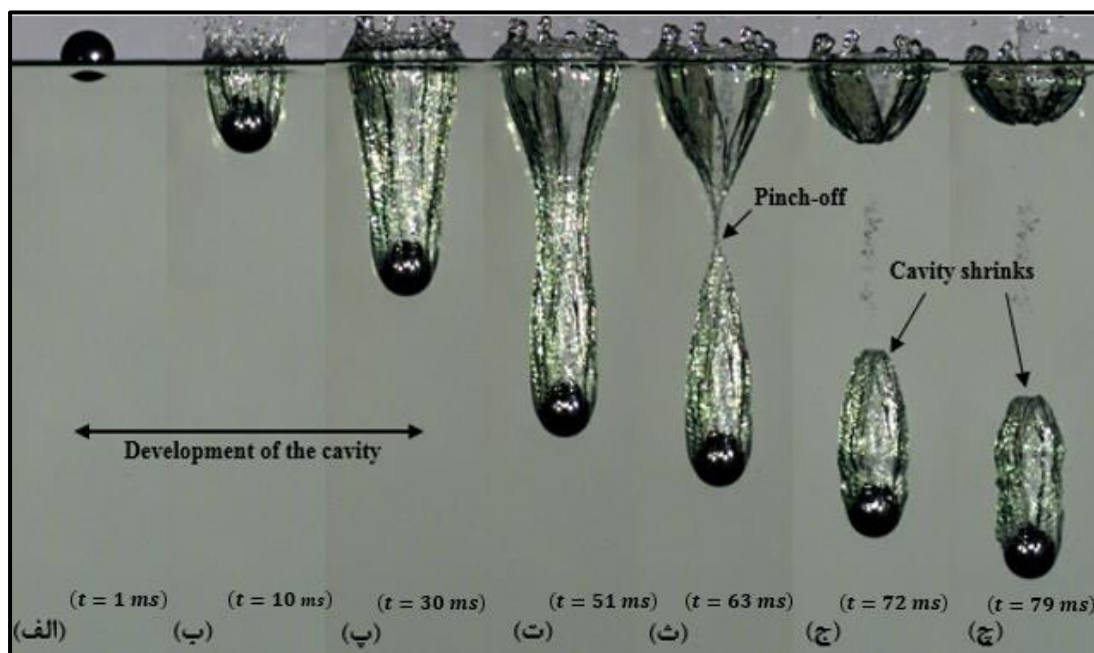
کاوک نیز مشاهده می‌شود. همان‌طور که فصل ۲ نیز اشاره شد دلیل ایجاد رپل‌ها، نوسانات فشار با فرکانس پایین به واسطه فروریزش کاواک است. همچنین نحوه فروپاشی و فروریزش کاواک نیز در شکل ۴-۲۵ به نمایش در آمده است دیواره کاواک در این قسمت شروع به فروپاشی رو به پایین می‌کند. نکته قابل توجه دیگر این است که شکل‌گیری کاواک باعث پایداری حرکت گوی در آب و جلوگیری از منحرف شدن آن می‌کند در صورتی که گوی $S_{0,0}$ به دلیل عدم تشکیل کاواک با افزایش عمق مقداری از مسیر خود منحرف می‌شود.



شکل ۴-۲۲: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 29.96 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 60, W=815.08, Re = 54408, U_0 = 2.426[ms^{-1}], D_0 = 20[mm])$

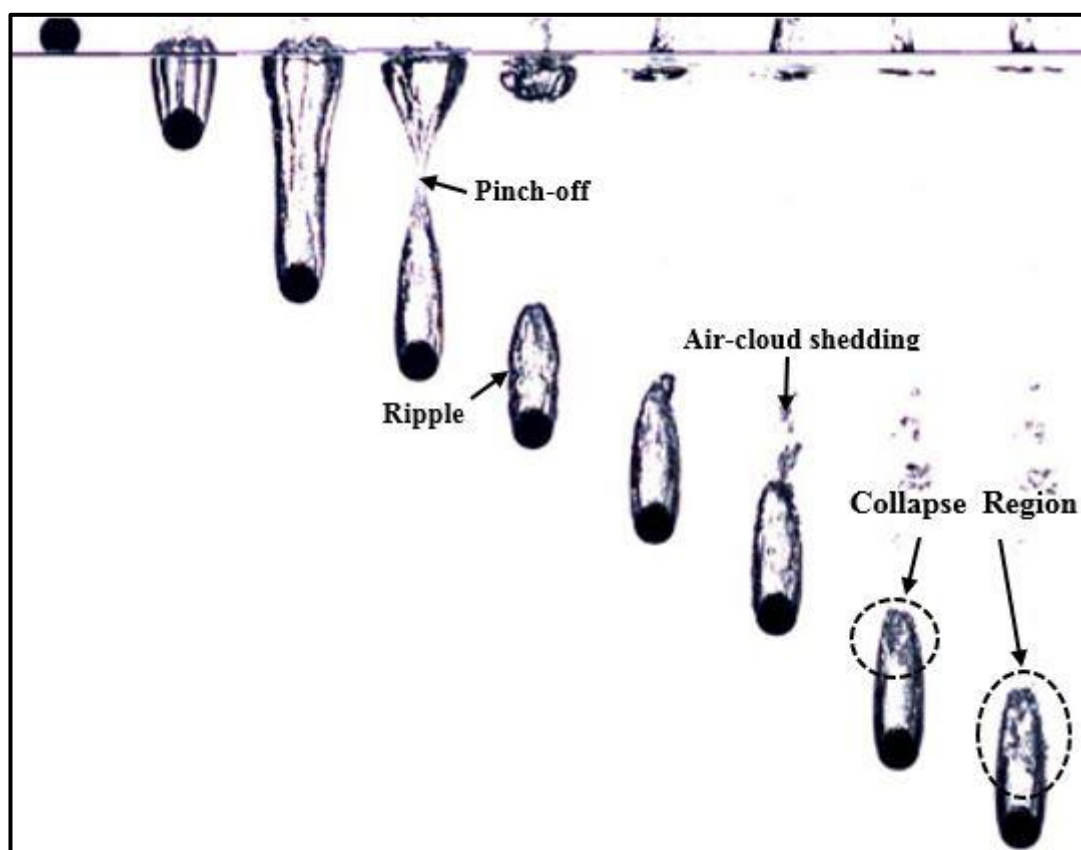


شکل ۴-۲۳: روند شکل‌گیری پرده پاشش آب و ورتینگتون جت در اثر ورود گوی $S_{5,12}$



شکل ۴-۲۴: تصویر روند توسعه و شکل‌گیری کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب (تصویر نوع ۲)

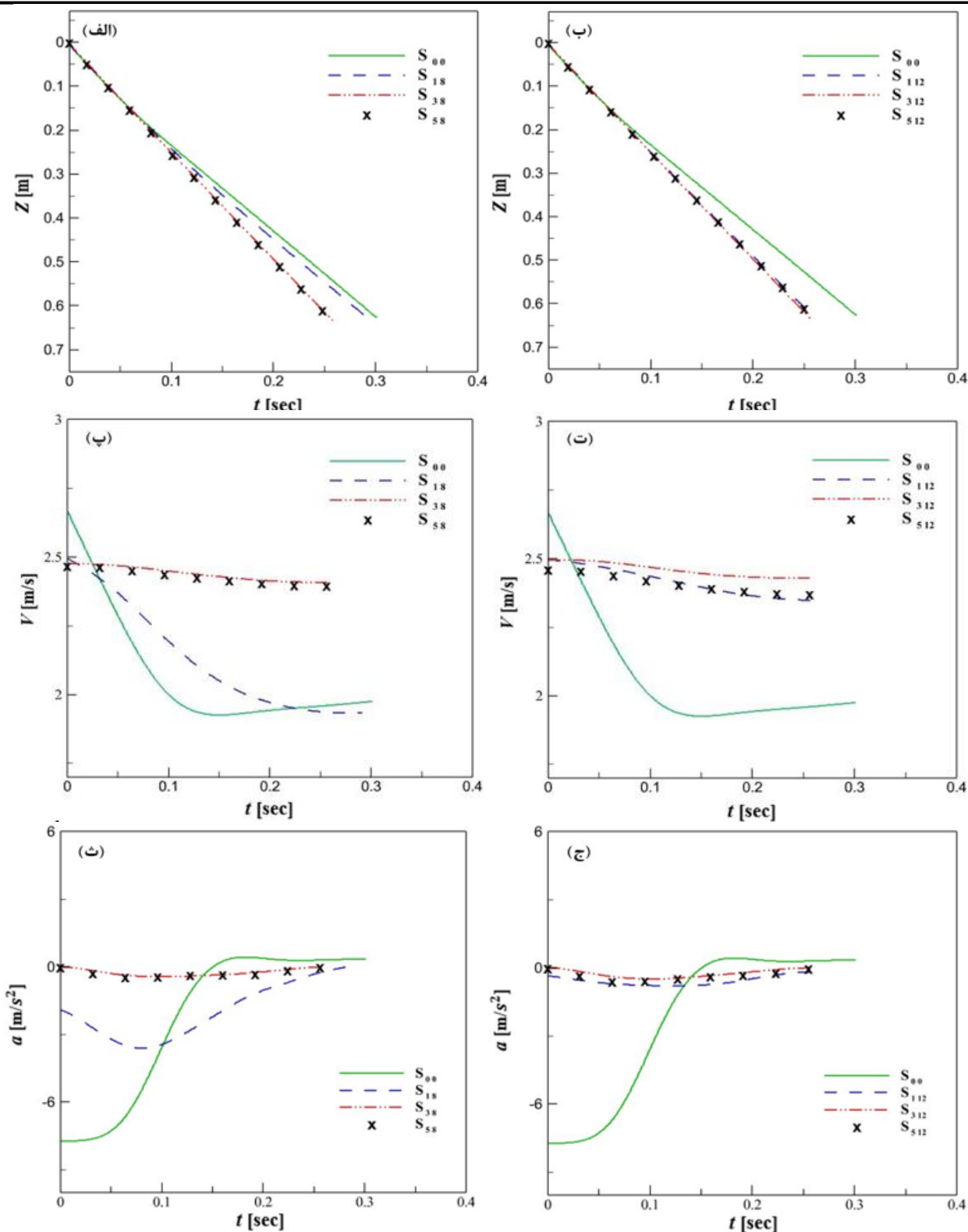
($Ca = 29.96 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 60$, $W=815.08$, $Re = 54408$, $U_0 = 2.426[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)



شکل ۴-۲۵: تصویر روند شکل‌گیری و فرو ریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب (تصویر نوع ۳)

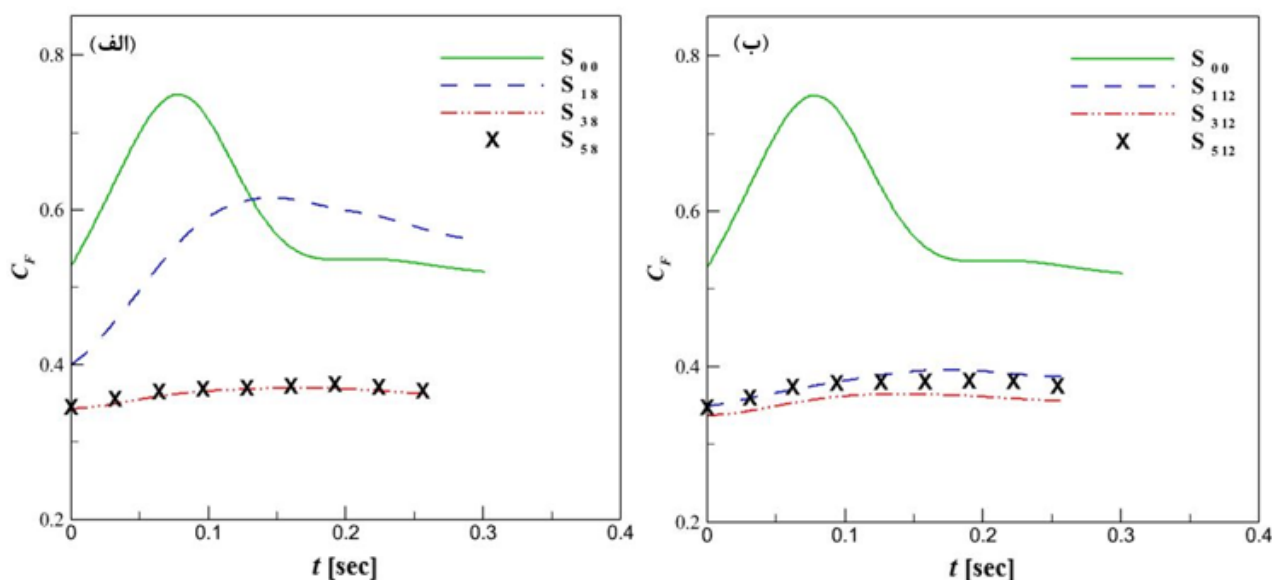
($Ca = 29.96 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 60$, $W=815.08$, $Re = 54408$, $U_0 = 2.426[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)

در شکل ۴-۲۶ (الف-پ-ث) به ترتیب نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب گوی‌های دارای دیمپل‌های سطحی $S_{3,8}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{5,8}$ و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ ارائه شده است. بر طبق نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان، دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ مسیر حرکت گوی در استخر آب را در کمترین زمان و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ مسیر حرکت را در بیشترین زمان طی کرده‌اند. گوی $S_{1,8}$ به نسبت دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ مسیر حرکت را در زمان بیشتری طی کرده است. همان‌طور که کاواک کوچک‌تری نسبت به این دو گوی ایجاد کرده است. با بررسی نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب مشاهده می‌شود که گوی‌های $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ سرعت و شتاب نزدیک به هم و بیشتری نسبت به دو گوی دیگر دارند. گوی $S_{0,0}$ نیز در اکثر لحظات سرعت و شتاب کمتری نسبت به سه گوی دیگر دارد. نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان برای سه گوی دارای دیمپل‌های سطحی $S_{3,12}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{5,12}$ و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ به ترتیب در شکل ۴-۲۶ (ب-ت-ج) نمایش داده شده است. بر طبق نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان، سه گوی دارای دیمپل تقریباً هم‌زمان مسیر حرکت در استخر آب را طی می‌کنند اما با اختلاف ناچیز گوی $S_{3,12}$ مسیر حرکت را در کمترین زمان و گوی $S_{0,0}$ مسیر حرکت را در بیشترین زمان طی کرده‌اند. همین موضوع نشان دهنده تأثیر شکل‌گیری کاواک در افزایش سرعت پرتابه‌ها است. بر اساس نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب گوی $S_{3,12}$ بیشترین سرعت و شتاب و گوی $S_{0,0}$ کمترین سرعت و شتاب را در حین طی کردن مسیر در استخر آب را دارند. با بررسی سرعت گوی‌ها در زمان‌های مختلف در این ارتفاع مشخص شد که، در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی سرعت متوسط گوی $S_{3,12}$ نسبت به گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ ۱۸ درصد افزایش یافته است.



شکل ۴-۲۶: (الف) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,8}$, $S_{3,8}$, $S_{5,8}$. (ب) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,12}$, $S_{3,12}$, $S_{5,12}$. (پ) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,8}$, $S_{3,8}$, $S_{5,8}$. (ت) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,12}$, $S_{3,12}$, $S_{5,12}$. (ث) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,8}$, $S_{3,8}$, $S_{5,8}$. (ج) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,12}$, $S_{3,12}$, $S_{5,12}$.

نمودارهای تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی به نسبت زمان در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است. بر اساس نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ (شکل ۴-۲۷ الف)) گوی‌های $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ دارای کمترین مقدار و تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی در بین چهار گوی است. همچنین گوی $S_{0,0}$ دارای بیشترین تغییرات و مقدار ضریب نیروی هیدرودینامیکی است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد با مقایسه رفتار گوی‌ها در نمودارهای تغییرات سرعت نسبت به زمان می‌توان دریافت که گوی‌هایی که تغییرات ضریب سرعت کمتری دارند تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نیز در آن‌ها کمتر است.

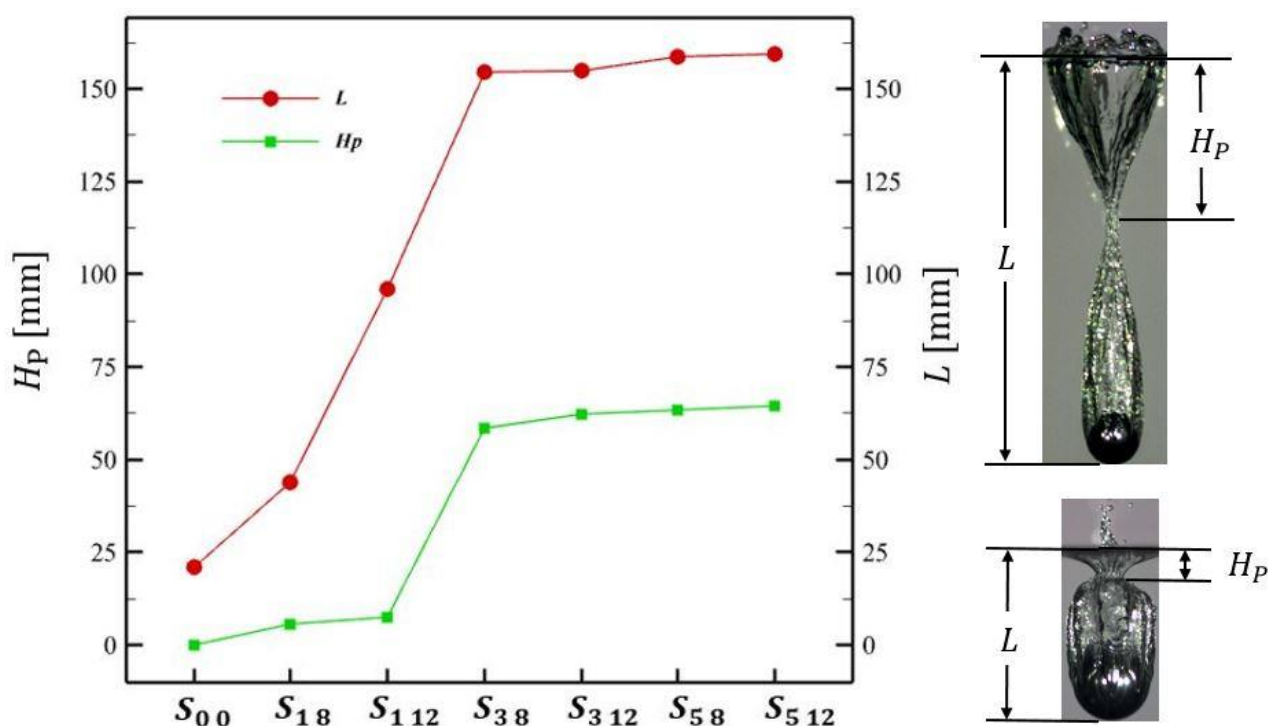


شکل ۴-۲۷: (الف) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$

(ب) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$

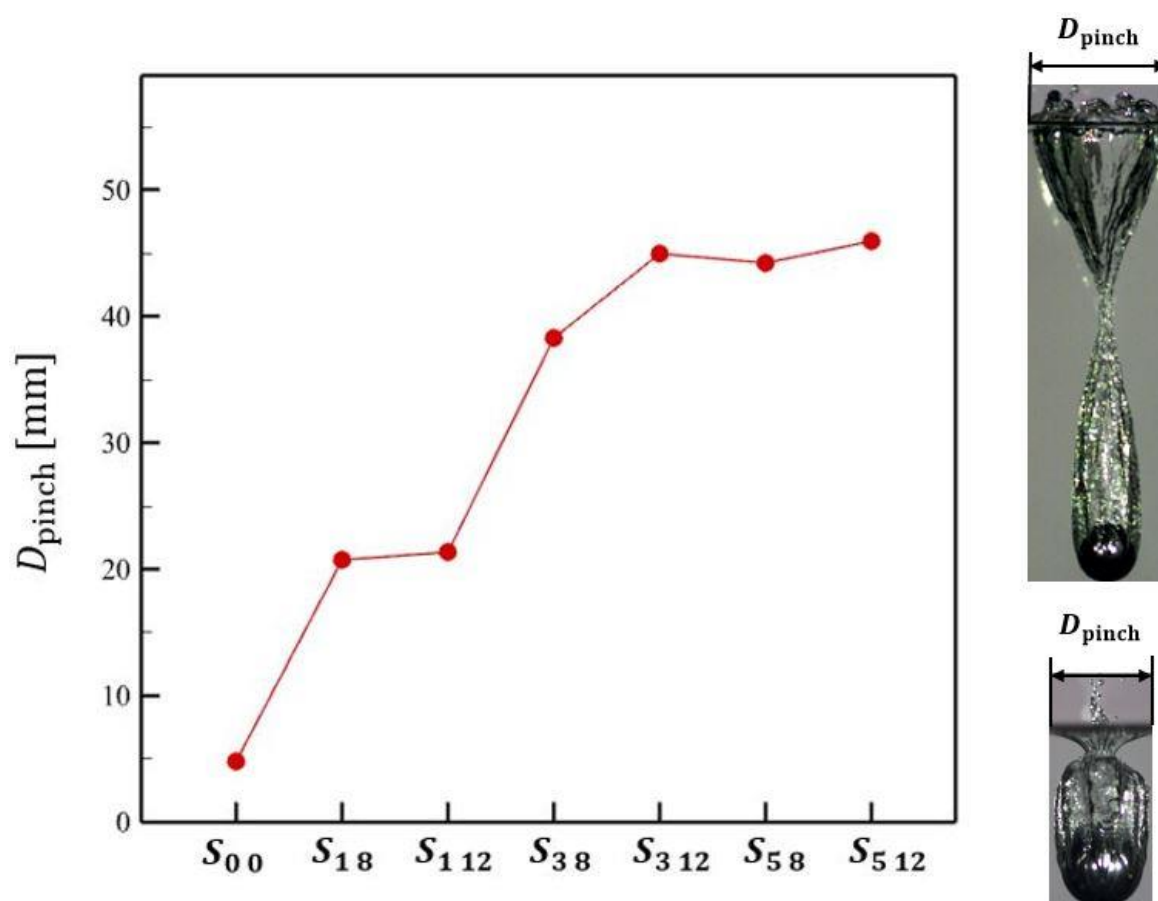
طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک برای هفت گوی مورد مطالعه در شکل ۴-۲۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود با افزایش دیمپل‌های سطحی طول کاواک افزایش پیدا کرده است. در چهار گوی $S_{3,8}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ طول کاواک نسبت به دو گوی دیگر جهش ناگهانی داشته است. دلیل این موضوع آن است که رژیم جدایش در این چهار گوی نسبت به دو گوی قبل از خود تغییر کرده و به رژیم جدایش عمیق تبدیل شده در حالی که در دو گوی $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ کاواک‌ها در محدوده رژیم جدایش نیمه عمیق شکل گرفته‌اند. همچنین طول نقطه جدایش کاواک نیز رفتاری مشابه طول کاواک از خود نشان

می‌دهد با این تفاوت که مقدار طول نقطه جدایش در گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ به علت عدم تشکیل کاواک صفر است.



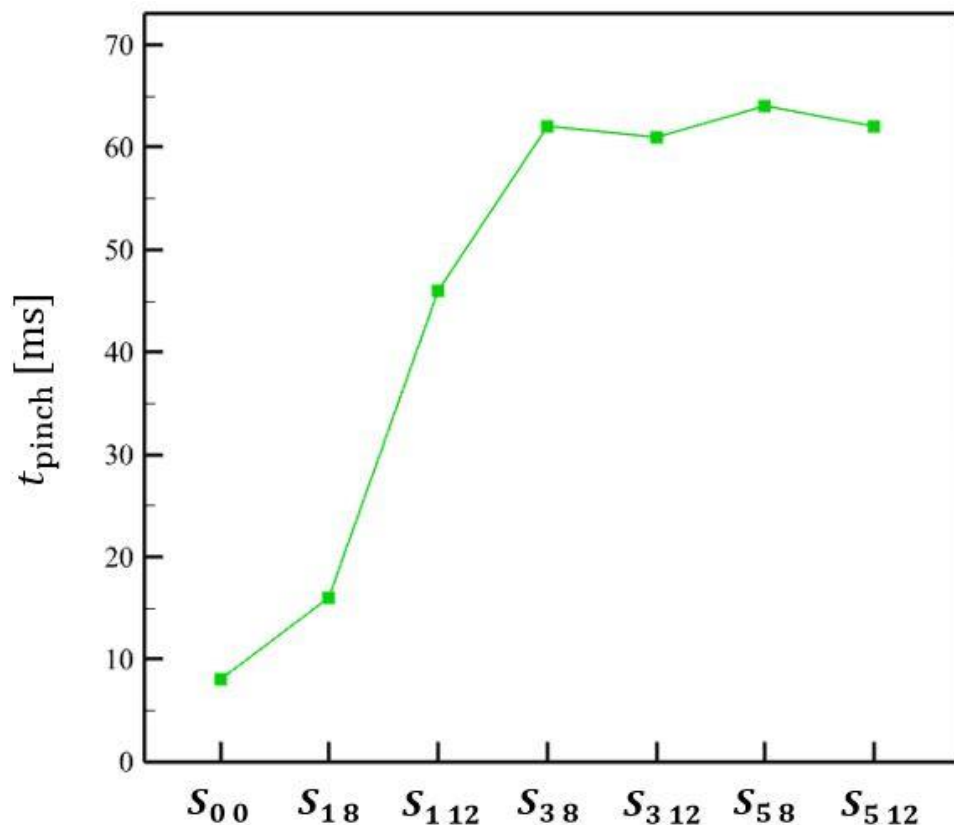
شکل ۴-۲۸: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر

در شکل ۴-۲۹ نیز نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌گردد با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌های سطحی بر روی گوی‌های فلزی در ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متری، قطر کاواک نیز افزایش یافته است به جزء یک مورد که در گوی $S_{5,8}$ به مقدار بسیار جزئی قطر کاواک نسبت به گوی پیش از خود کاهش نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۹: نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر

زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد مطالعه در ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر در نمودار شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. بر طبق نتایج با افزایش تعداد دیمپل‌ها زمان نقطه جدایش کاواک نیز افزایش یافته است. به استثنای دو گوی $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ که نسبت به دو گوی قبل از خود به مقدار جزئی زمان نقطه جدایش کاواک کمتر شده است.

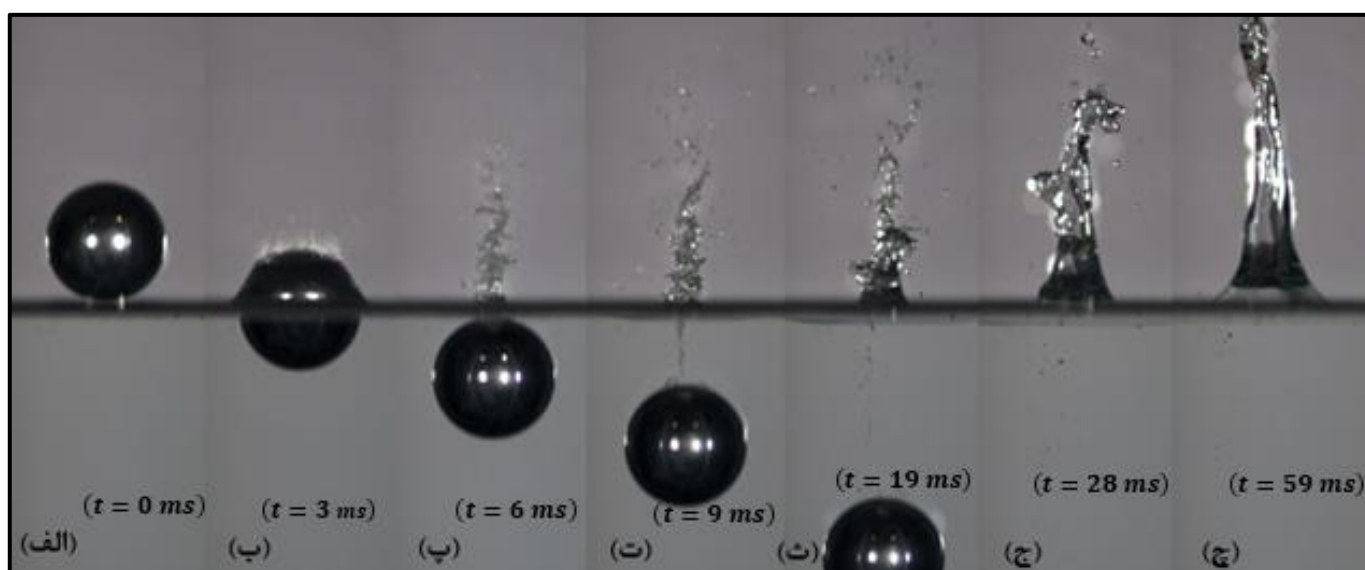


شکل ۴-۳: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر

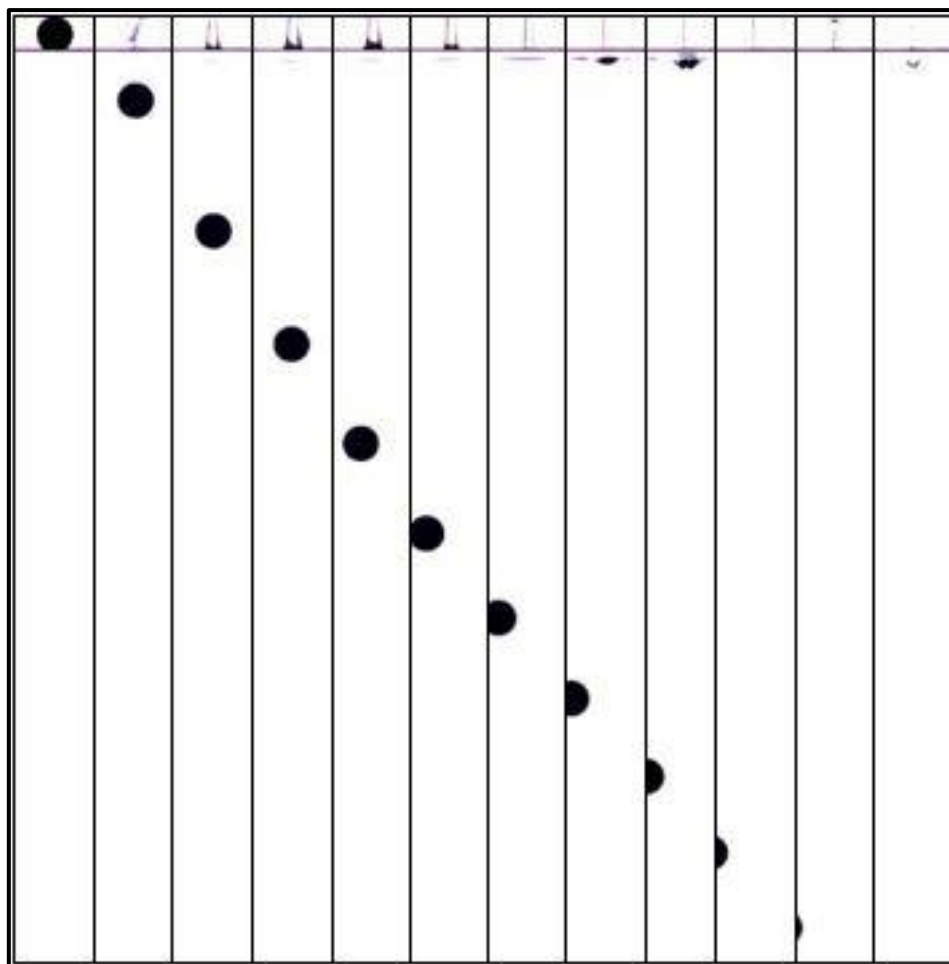
۴-۴ نتایج رهاسازی گوی‌های فلزی از ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر

در این قسمت تأثیر دیمپل‌های سطحی بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. گوی‌های مورد مطالعه با سرعت $3/835$ متر بر ثانیه به سطح آب برخورد می‌کنند. اعداد بی بعد برای گوی‌ها به صورت $Fr = 150$, $Ca = 47.36 \times 10^{-3}$, $W = 2036.8$, $Bo =$ 13.58 و $Re = 86008$ است. گوی بدون دیمپل سطحی، همانند چند ارتفاع قبل هیچ‌گونه کاواکی تشکیل نمی‌دهد و سه گوی $S_{1,8}$, $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ نسبت به ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متر کاواک‌های قابل‌توجه‌تری ایجاد کردند که در محدوده رژیم جدایش نیمه عمیق قرار دارند. روند شکل‌گیری کاواک در این سه گوی باهم شباهت زیادی دارد و تنها در مشخصات ابعادی باهم تفاوت دارند. سه گوی $S_{3,12}$, $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ نیز کاواک‌هایی مطابق با رژیم جدایش عمیق ایجاد می‌کنند. و رفتار هیدرودینامیکی مشابهی باهم دارند. اما در مشخصاتی نظیر طول و قطر کاواک و نقطه جدایش باهم تفاوت دارند. همان‌طور که در شکل ۴-۳۱ مشاهده می‌گردد با ورود گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ در آب در ابتدا قطرات آب به صورت شعاعی به اطراف پرتاب می‌

شوند و یک جت شعاعی ایجاد می‌کنند و به دلیل خاصیت آب‌دوستی سطح گوی جت شعاعی به سطح گوی می‌چسبد و با پایین رفتن گوی در سطح آب بسته می‌شود و یک ورتینگتون جت عمودی رو به بالا شروع به شکل‌گیری می‌کند. و بیشتر از ۹ سانتی‌متر ارتفاع می‌گیرد و سپس شروع به سقوط و میرا شدن می‌کند. گوی در کمتر از ۵ هزارم ثانیه کاملاً در آب فرو می‌رود و بدون تشکیل کاواک از سطح آب جدا می‌شود. فقط مقدار کمی هوا به صورت حباب‌های کوچک همراه با گوی وارد آب می‌شوند و با افزایش عمق گوی از سطح آن جدا می‌شوند. در شکل ۴-۳۲ نحوه طی کردن مسیر گوی $S_{0,0}$ را در استخر آب از فاصله بیشتر مشاهده می‌گردد. مطابق شکل، گوی مدتی پس از ورود به استخر آب از مسیر خود منحرف می‌شود.



شکل ۴-۳۱: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 47.36 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 150, W=2036.8, Re = 86008, U_0 = 3.83[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

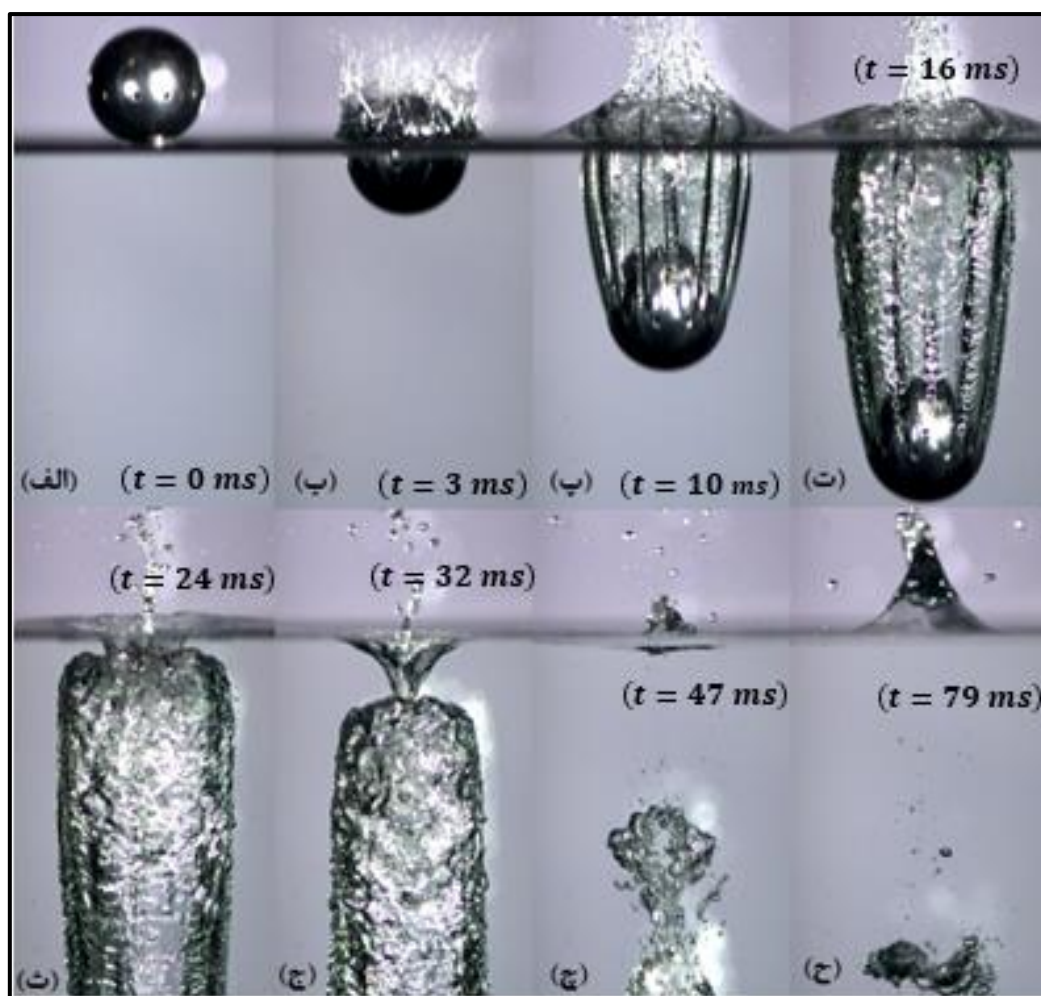


شکل ۴-۳۲: تصویر نحوه طی کردن مسیر گوی فلزی $S_{0,0}$ در استخر آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی متر (تصویر نوع ۳)

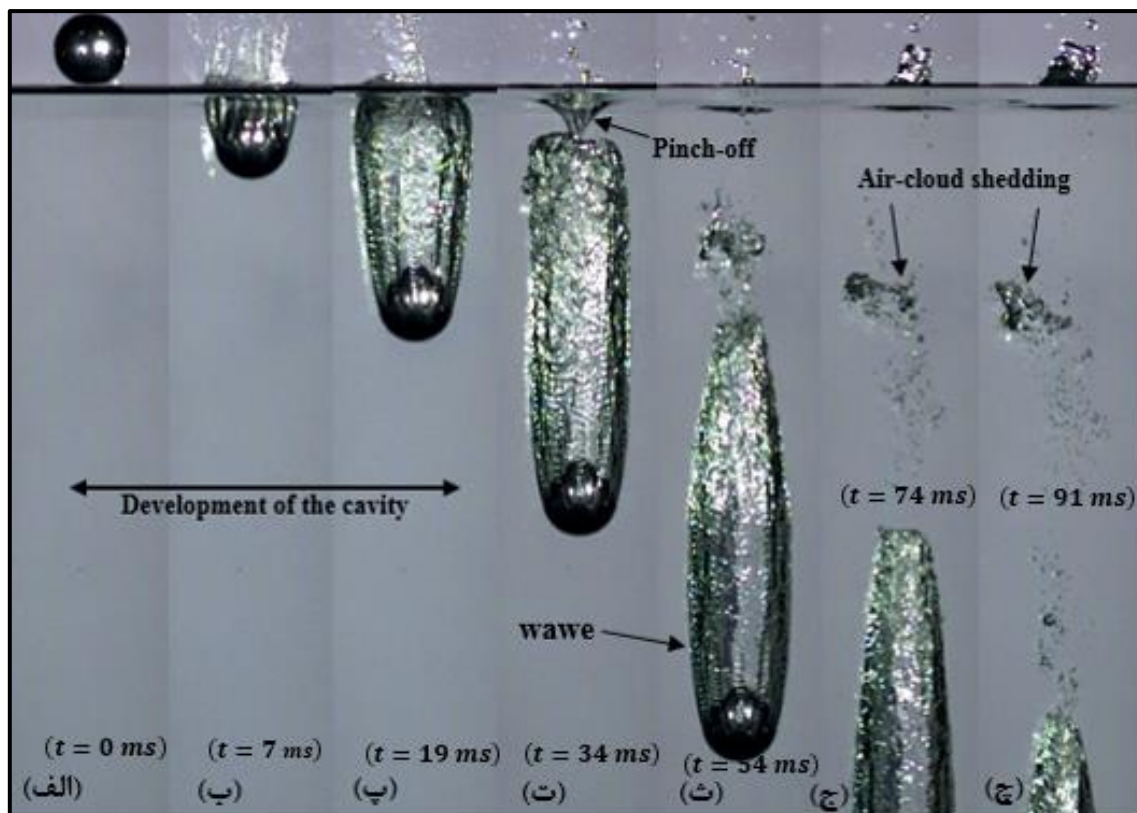
$$(Ca = 47.36 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 150, W=2036.8, Re = 86008, U_0 = 3.83[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$$

با ورود سه گوی دارای دیمپل‌های سطحی $S_{1,8}$ ، $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ به درون آب کاواک‌هایی با مشخصات رژیم جدایش نیمه عمیق ایجاد می‌گردد. روند توسعه و شکل‌گیری کاواک‌ها در این سه گوی تا حد زیادی مشابه هم است و تنها در مشخصات نقطه جدایش کاواک باهم متفاوت‌اند. برای نمونه روند شکل‌گیری کاواک توسط گوی $S_{1,12}$ بررسی می‌شود. پس از برخورد گوی به سطح آب جت شعاعی شروع به شکل گرفتن می‌کند به واسطه خاصیت آب‌گریزی سطح گوی جت شعاعی از گوی دور می‌شود و به‌مرور تبدیل به یک پرده پاشش آب می‌شود و پس از مدت کوتاهی پرده پاشش آب بسته می‌شود (شکل ۴-۳۳ (الف-ث)). با ورود گوی به آب هوا در پشت گوی وارد آب می‌شود و کاواک شروع به شکل‌گیری می‌کند. پس از ۳۳ هزارم ثانیه پس از برخورد، گوی به نقطه جدایش می‌رسد و کاواک به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود (۴-۳۳ (ج-ح)). قسمت

بالای نقطه جدایش به سمت سطح آب حرکت می‌کند و یک ورتینگتون جت مخروطی شکل می‌گیرد و مدت کوتاهی پس از آن در سطح آب میرا می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-۳۴ روند توسعه کاواک را از فاصله دورتر مشاهده می‌گردد. کاواک در پایین نقطه جدایش متصل به گوی به سمت پایین حرکت می‌کند و با فروریزش کاواک به‌مرور از حجم آن کاسته می‌شود. موج‌هایی نیز در دیواره کاواک مشاهده می‌شود.



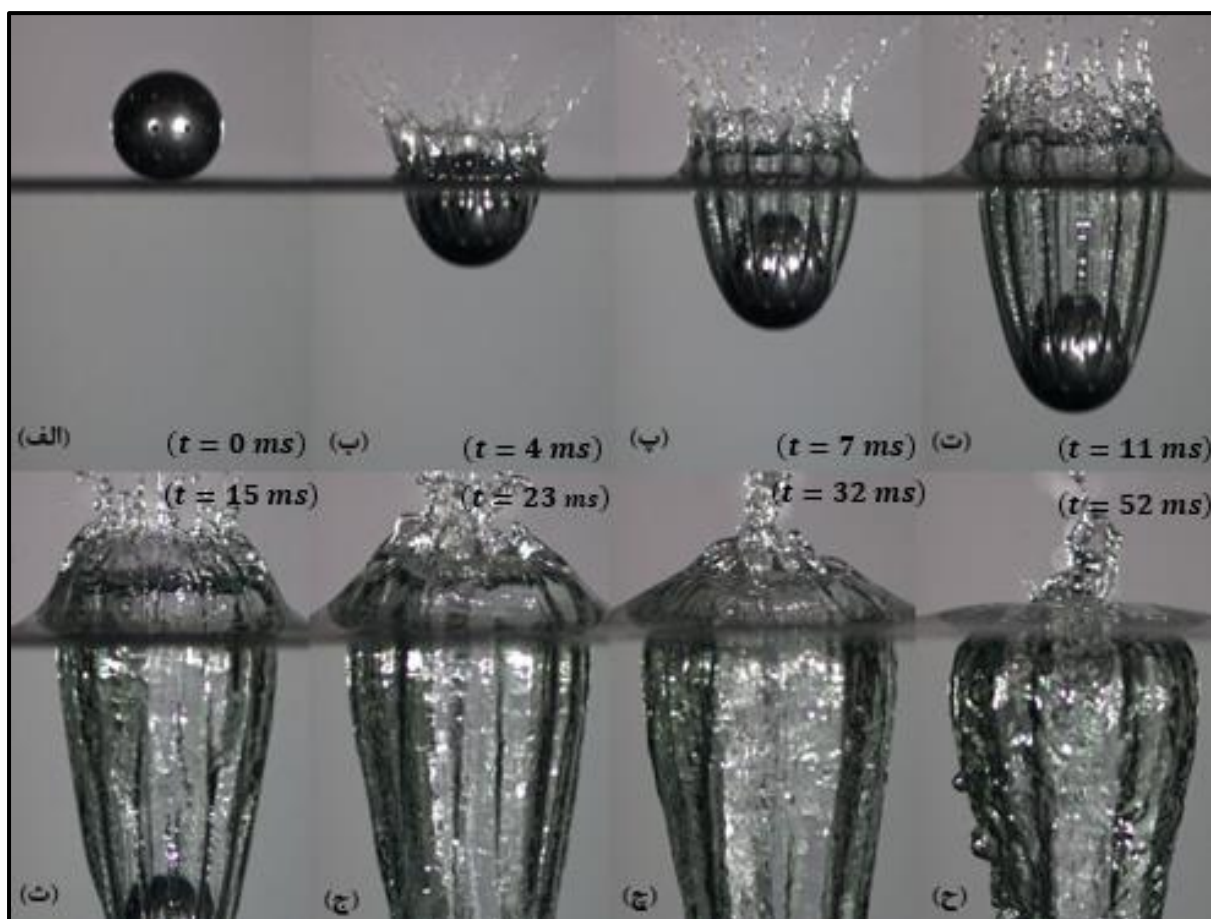
شکل ۴-۳۳: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱)
 $(Ca = 47.36 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 150, W=2036.8, Re = 86008, U_0 = 3.83[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$



شکل ۴-۳۴: تصویر روند توسعه کاواک توسط گوی فلزی $S_{1,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۲)
 $(Ca = 47.36 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 150, W=2036.8, Re = 86008, U_0 = 3.83[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$

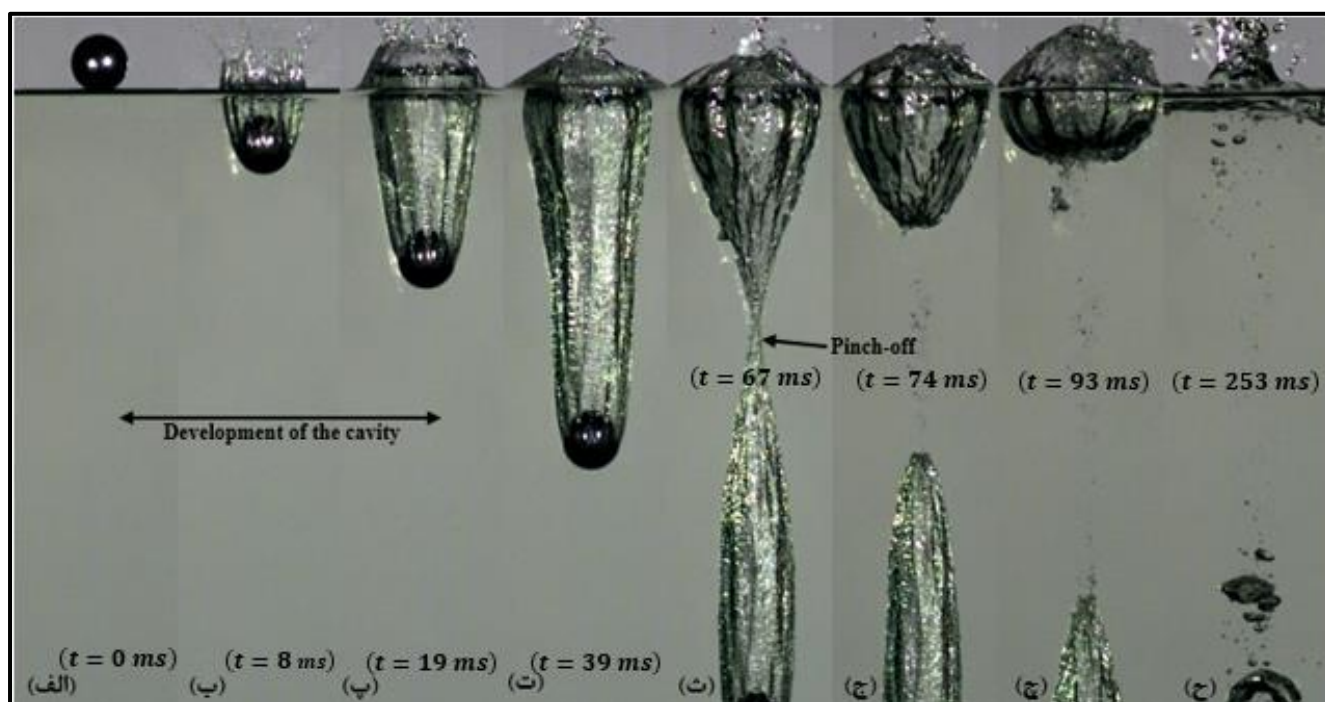
سه گوی فلزی $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ نیز رفتاری مشابه دارند و کاواک‌هایی با ویژگی‌های رژیم جدایش عمیق به وجود می‌آورند. اما در مشخصات ابعادی کاواک‌ها و در شکل ظاهری پرده پاشش آب مقداری باهم متفاوت‌اند. برای مثال پرده پاشش آب در گوی $S_{5,12}$ نسبت به دو گوی دیگر بزرگ‌تر و زیباتر است. برای نمونه در ادامه رفتار هیدرودینامیکی گوی $S_{3,12}$ در درون آب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدت بسیار کوتاهی پس از برخورد گوی به سطح آب، قطرات آب به صورت شعاعی به اطراف پرتاب می‌شوند و جت شعاعی به دلیل خاصیت آب‌گریزی از سطح گوی دور می‌شود و به سطح آن نمی‌چسبد. و همان‌طور که در فصل ۳ اشاره گردید هوا فرصت پیدا می‌کند در پشت گوی وارد آب شود و توسط مکانیسم نفوذ هوا باعث شکل‌گیری کاواک شود. همان‌طور که در شکل ۴-۳۵ مشاهده می‌گردد در سطح آب جت شعاعی به سمت بالا حرکت می‌کند و یک پرده پاشش آب گنبدی شکل ایجاد می‌کند. در زمان بسیار کوتاه پرده پاشش آب بسته می‌شود و در سطح آب میرا می‌شود. با افزایش عمق گوی در استخر آب کاواک بزرگی در آب شکل می‌گیرد و پس از ۶۵ هزارم ثانیه به نقطه جدایش می‌رسد و کاواک را به دو بخش مجزا تفکیک می‌کند کاواک در قسمت بالای

نقطه جدایش با تشکیل یک ورتینگتون جت در مرکز خود به سمت سطح آب حرکت می‌کند و با رسیدن به سطح آب پرده پاشش آب را می‌شکافد و یک جت عمودی تشکیل می‌دهد. در شکل ۴-۳۶ نیز از فاصله بیشتر روند توسعه و شکل‌گیری کاواک مشاهده می‌گردد. کاواک در قسمت پایین نقطه جدایش همراه گوی به سمت پایین حرکت و شروع به فروپاشی می‌کند. همچنین در تصویر ۴-۳۷ روند شکل‌گیری کاواک از فاصله دورتر مشاهده می‌شود. فروریزش کاواک نیز به صورت حبابی شکل صورت می‌گیرد. در طول مسیر حرکت گوی در استخر آب هیچ‌گونه انحراف از مسیر مشاهده نمی‌شود. با مقایسه رفتار گوی بدون دیمپل و گوی‌های دارای دیمپل می‌توان به تأثیر دیمپل‌های سطحی در جلوگیری از انحراف از مسیر و پایداری حرکت گوی پی برد.



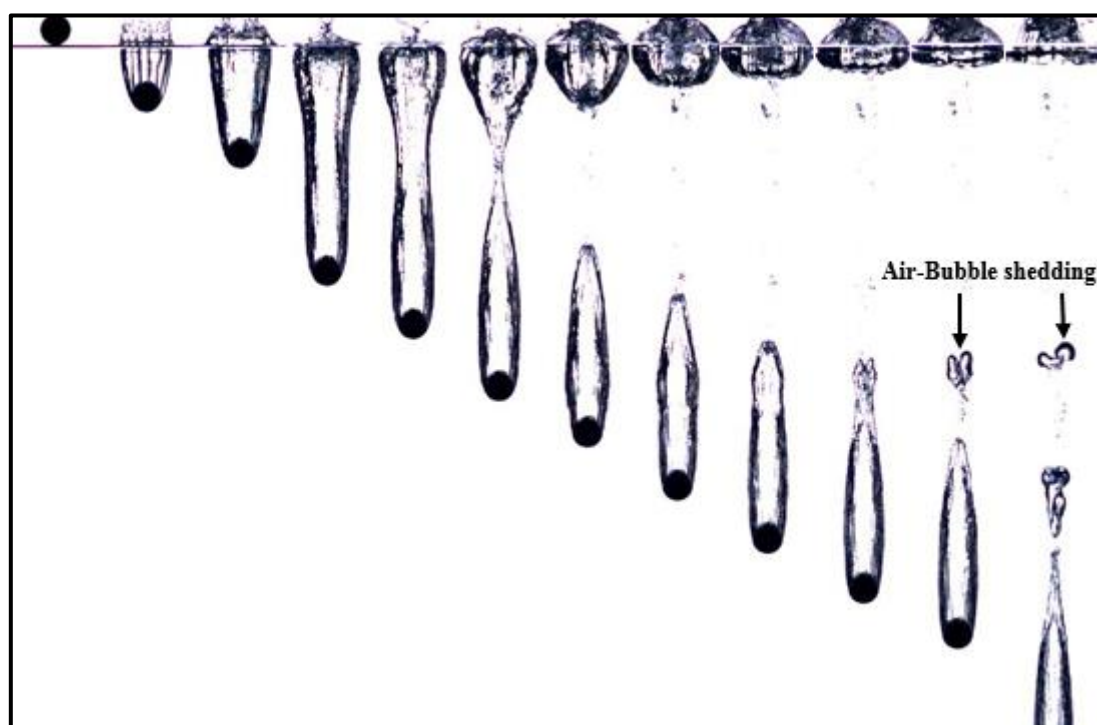
شکل ۴-۳۵: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{3,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۱)

$$(Ca = 47.36 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 150, W=2036.8, Re = 86008, U_0 = 3.83[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$$



شکل ۴-۳۶: تصویر روند توسعه کاواک توسط گوی فلزی $S_{3,12}$ در آب از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر (تصویر نوع ۲)

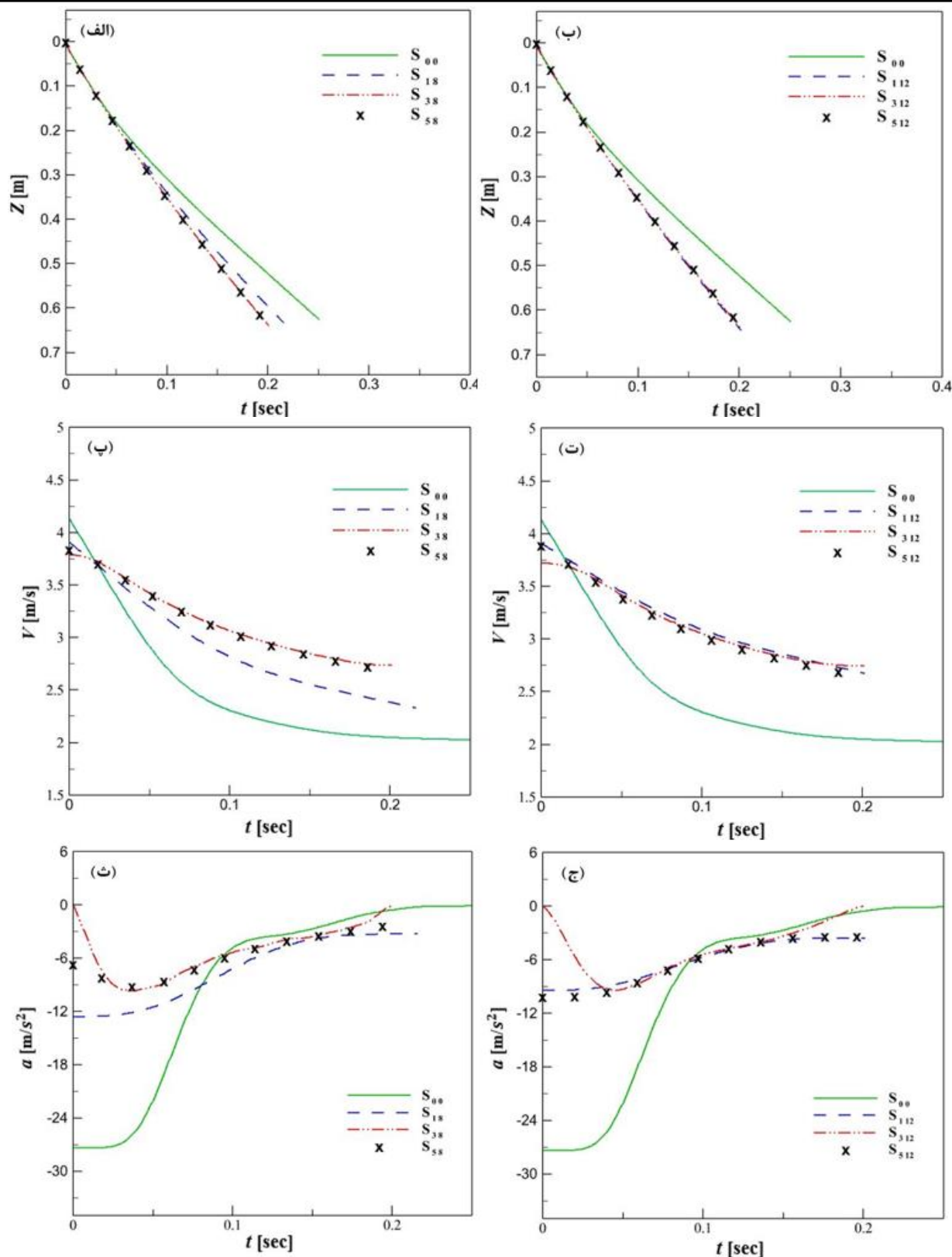
($Ca = 47.36 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 150$, $W=2036.8$, $Re = 86008$, $U_0 = 3.83[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)



شکل ۴-۳۷: تصویر روند شکل‌گیری و فروریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{3,12}$ در آب (تصویر نوع ۳)

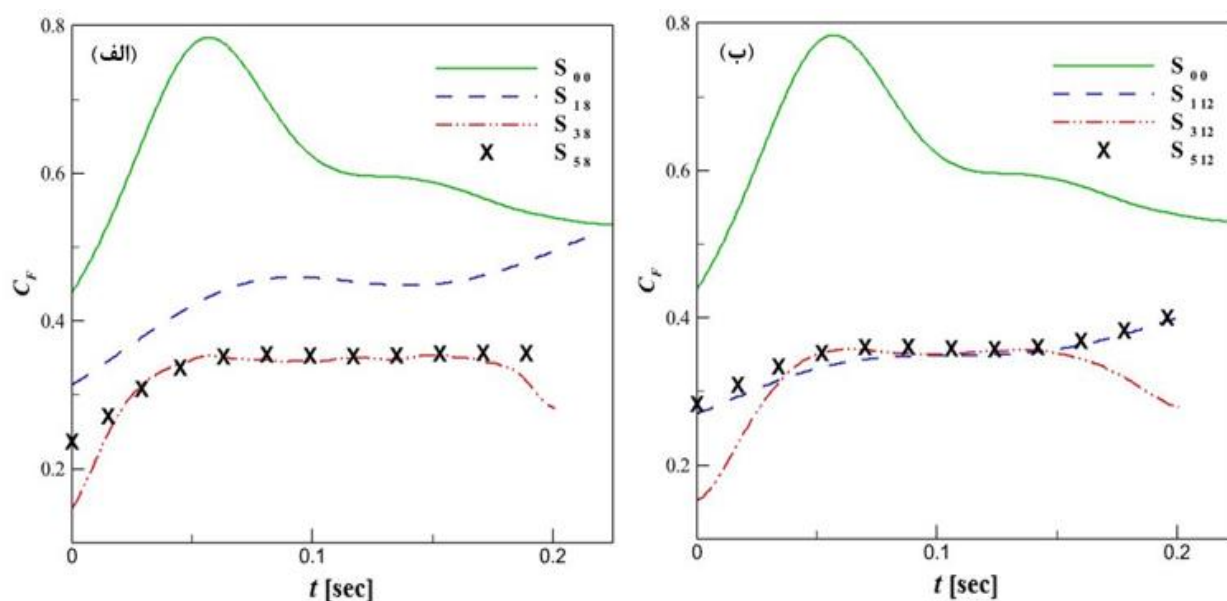
($Ca = 47.36 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 150$, $W=2036.8$, $Re = 86008$, $U_0 = 3.83[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)

در نمودارهای شکل ۴-۳۸ تغییرات مکان، سرعت، و شتاب هفت گوی مورد مطالعه به نمایش در آمده است. مطابق نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان در شکل ۴-۳۸ (الف) دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ مسیر حرکت در استخر آب را همزمان باهم و در زمانی کوتاه‌تر نسبت به دو گوی دیگر طی کرده‌اند. گوی بدون دیمپل نیز مسیر حرکت را در بیشترین زمان نسبت به سه گوی دیگر طی کرده است. همچنین مطابق نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب (شکل ۴-۳۸ (پ و ث)) دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ سرعت و شتاب تقریباً برابر هم دارند و نسبت به دو گوی دیگر سرعت و شتاب بیشتری دارند. گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ نیز در اکثر لحظات سرعت و شتاب کمتری نسبت به سه گوی دیگر دارد. دلیل تغییرات سرعت در گوی $S_{0,0}$ نیز می‌تواند به علت تغییر مسیر گوی در استخر آب باشد. گوی $S_{1,8}$ در این قسمت کاواک کوچک‌تری نسبت به دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ ایجاد می‌کند و کمتر بودن سرعت این گوی نسبت به دو گوی دیگر منطقی به نظر می‌آید. مطابق نمودار تغییرات مکان برای چهار گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ در شکل ۴-۳۸ (ب)، سه گوی دارای دیمپل تقریباً همزمان باهم مسیر حرکت در استخر آب را طی می‌کنند و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ نیز مسیر حرکت را در بیشترین زمان طی کرده است. همچنین مطابق نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب (شکل ۴-۳۸ (ت و ج)) سه گوی دارای دیمپل تقریباً سرعت برابر دارند ولی با اختلاف بسیار ناچیز گوی $S_{3,12}$ شتاب بیشتری نسبت به سه گوی دیگر دارد. همچنین گوی $S_{0,0}$ در اکثر لحظات سرعت و شتاب کمتری نسبت به گوی‌های دارای دیمپل دارد. با بررسی سرعت گوی‌ها در این ارتفاع مشاهده شد که، در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی سرعت متوسط گوی $S_{3,12}$ نسبت به گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ ، ۲۱ درصد افزایش یافته است.



شکل ۴-۳: (الف) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,8}$, $S_{3,8}$, $S_{5,8}$. (ب) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,12}$, $S_{3,12}$, $S_{5,12}$. (پ) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,8}$, $S_{3,8}$, $S_{5,8}$. (ت) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,12}$, $S_{3,12}$, $S_{5,12}$. (ث) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,8}$, $S_{3,8}$, $S_{5,8}$. (ج) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$, $S_{1,12}$, $S_{3,12}$, $S_{5,12}$.

در شکل ۴-۳۹ نمودارهای تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی مربوط به ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر، برای هفت گوی مورد مطالعه ارائه شده است. بر اساس نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی مربوط به چهار گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ (شکل ۴-۳۹ الف)، گوی $S_{0,0}$ دارای بیشترین تغییرات و مقدار ضریب نیروی هیدرودینامیکی در بین چهار گوی را دارد و دو گوی $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ کمترین میزان تغییرات و مقدار ضریب نیروی هیدرودینامیکی در بین چهار گوی را دارند. همچنین بر طبق نمودار شکل (۴-۳۹ ب) گوی‌های $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ مقدار و تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نزدیک به هم دارند. ولی با اختلاف جزئی گوی $S_{5,12}$ کمترین تغییرات و گوی $S_{3,12}$ کمترین مقدار ضریب نیروی هیدرودینامیکی در بین چهار گوی را دارند. گوی $S_{0,0}$ نیز بیشترین تغییرات و مقدار ضریب نیروی هیدرودینامیکی را به خود اختصاص داده است.



شکل ۴-۳۹: (الف) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$

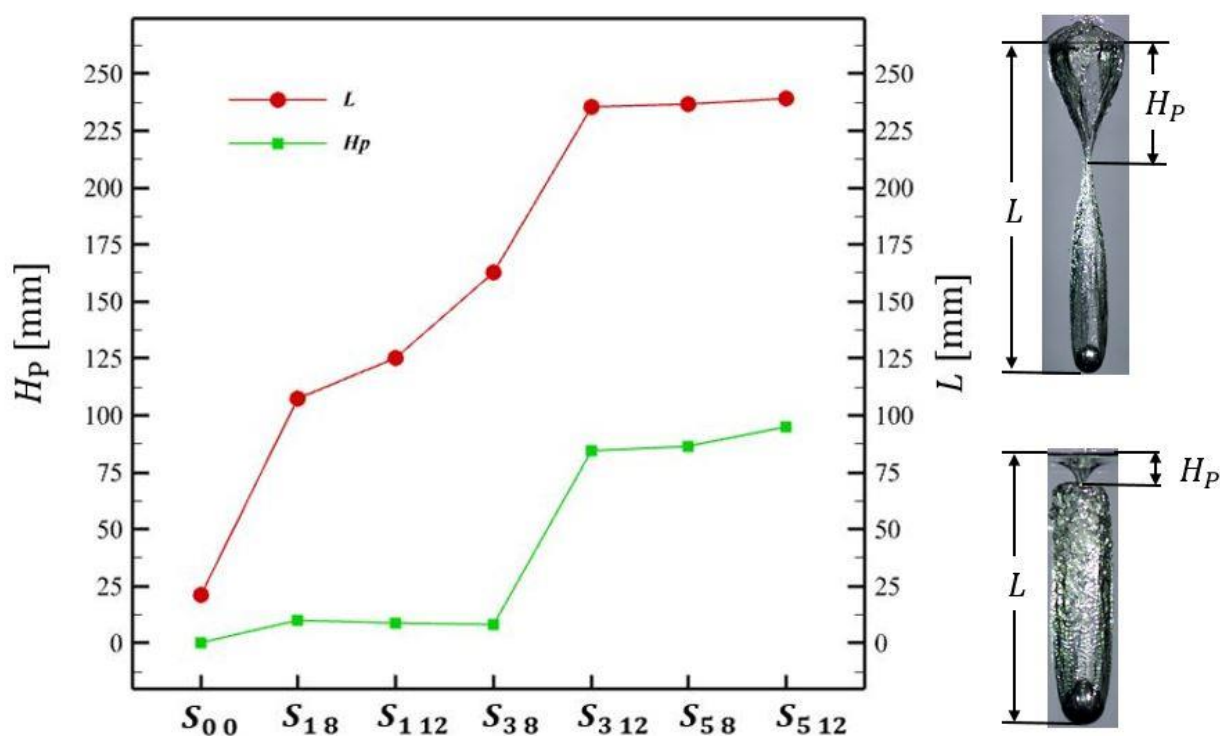
(ب) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$

در نمودار شکل ۴-۴۰ طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک برای هر هفت گوی مورد مطالعه نمایش داده شده است. با توجه به نتایج، طول کاواک در گوی‌ها با افزایش دیمپل‌های سطحی افزایش پیدا کرده است. همچنین در سه گوی $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ نسبت به سه گوی قبل از خود جهش در طول کاواک مشاهده می‌شود که به دلیل تشکیل شدن کاواک‌های بلندتر به واسطه تغییر رژیم کاواک‌ها از رژیم جدایش نیمه عمیق

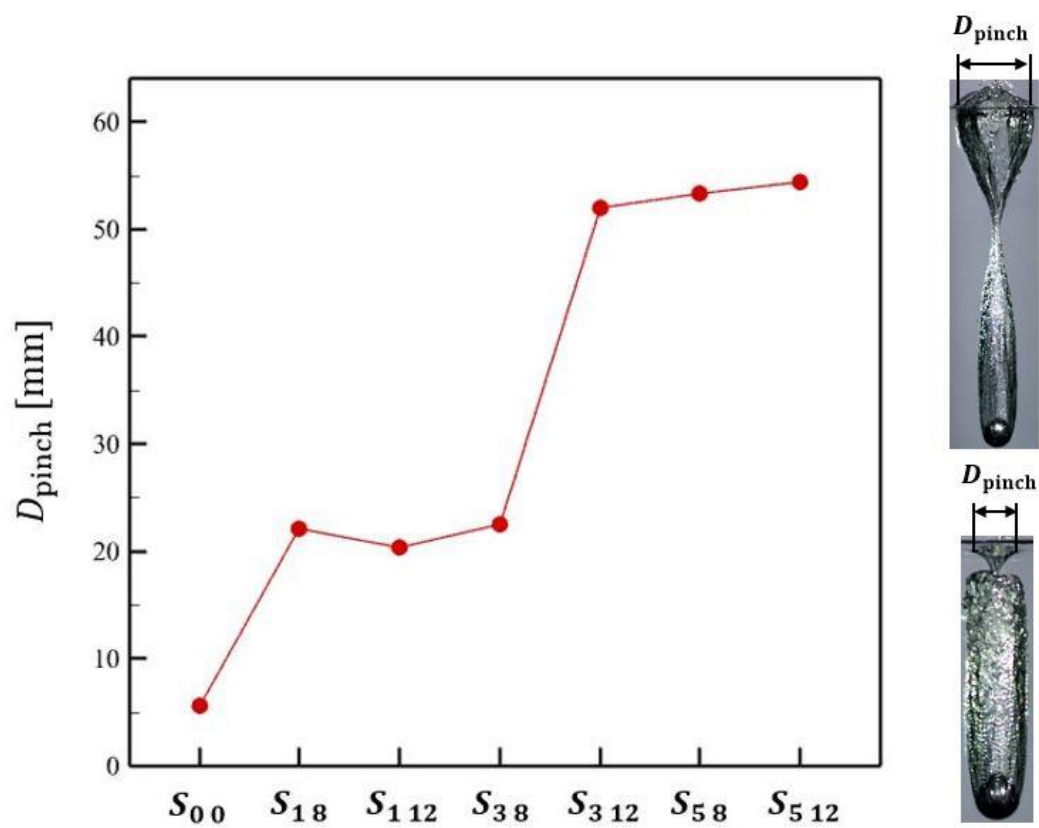
به رژیم جدایش عمیق است. طول نقطه جدایش کاواک‌ها نیز با افزایش تعداد دیمپل‌ها افزایش می‌یابد به جزء دو استثناء که در دو گوی $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ به مقدار بسیار جزئی نسبت به گوی‌های قبل از خود کاهش طول مشاهده می‌شود. در سه گوی $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ مطابق طول کاواک در طول نقطه جدایش نیز به دلیل تغییر رژیم جدایش جهش در طول نقطه جدایش نسبت به سه گوی قبل از خود اتفاق افتاده است.

در نمودار شکل ۴-۴۱ هم، قطر کاواک در لحظه جدایش برای گوی‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است. با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌های سطحی قطر کاواک‌ها نیز افزایش پیدا کرده است به جزء گوی $S_{1,12}$ که نسبت به گوی $S_{1,8}$ کاهش قطر نشان می‌دهد.

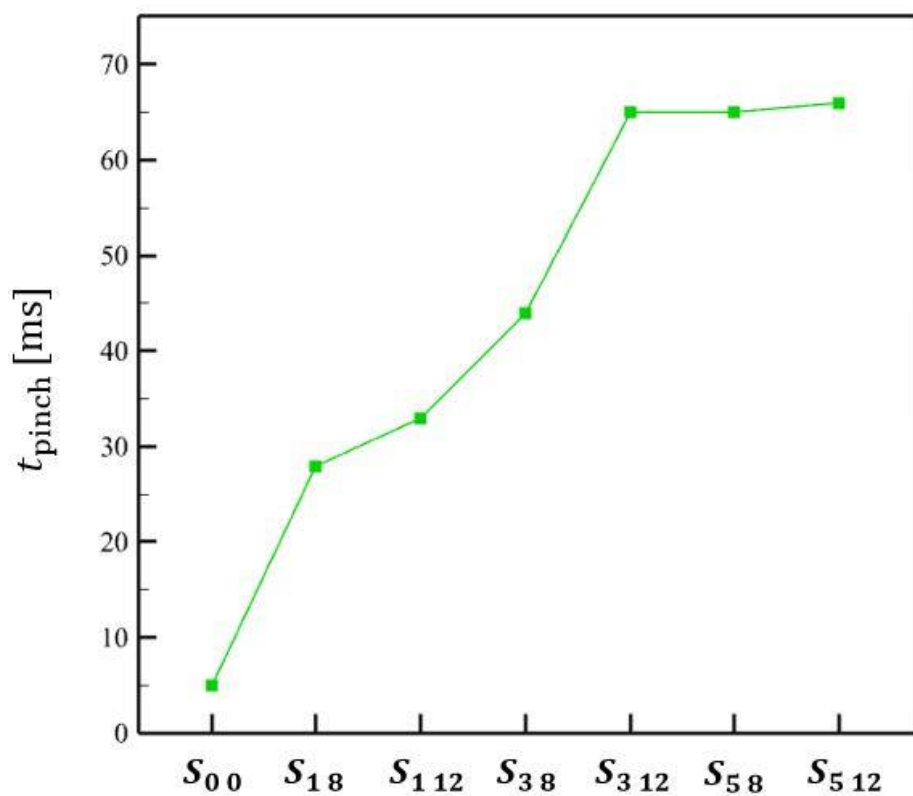
در شکل ۴-۴۲ نیز نمودار زمان جدایش کاواک برای گوی مورد مطالعه ارائه شده است. زمان نقطه جدایش نیز با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌ها افزایش یافته است به استثناء دو گوی $S_{3,12}$ و $S_{5,8}$ که زمان نقطه جدایش باهم برابر است.



شکل ۴-۴۰: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر



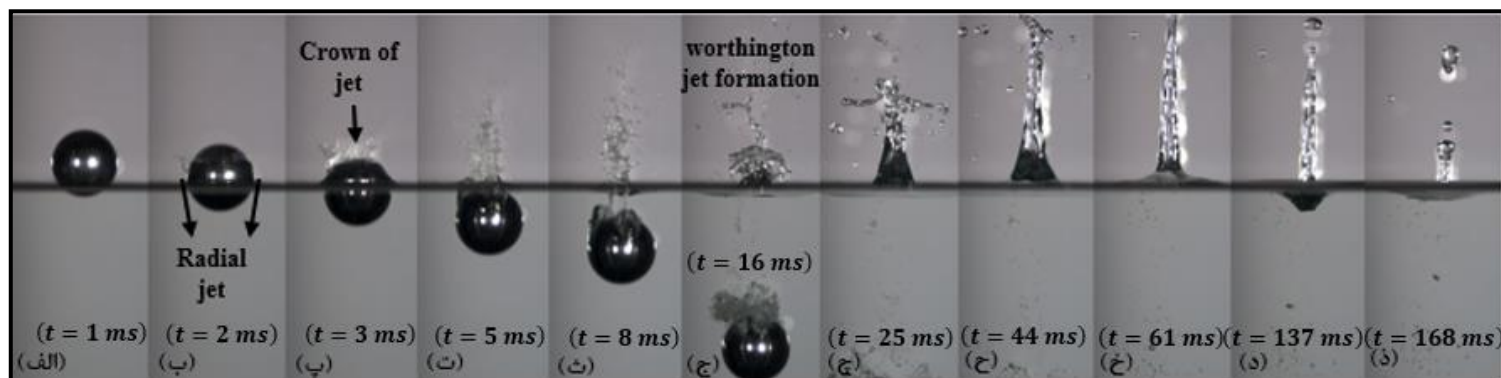
شکل ۴-۴۱: نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر



شکل ۴-۴۲: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۷۵ سانتی‌متر

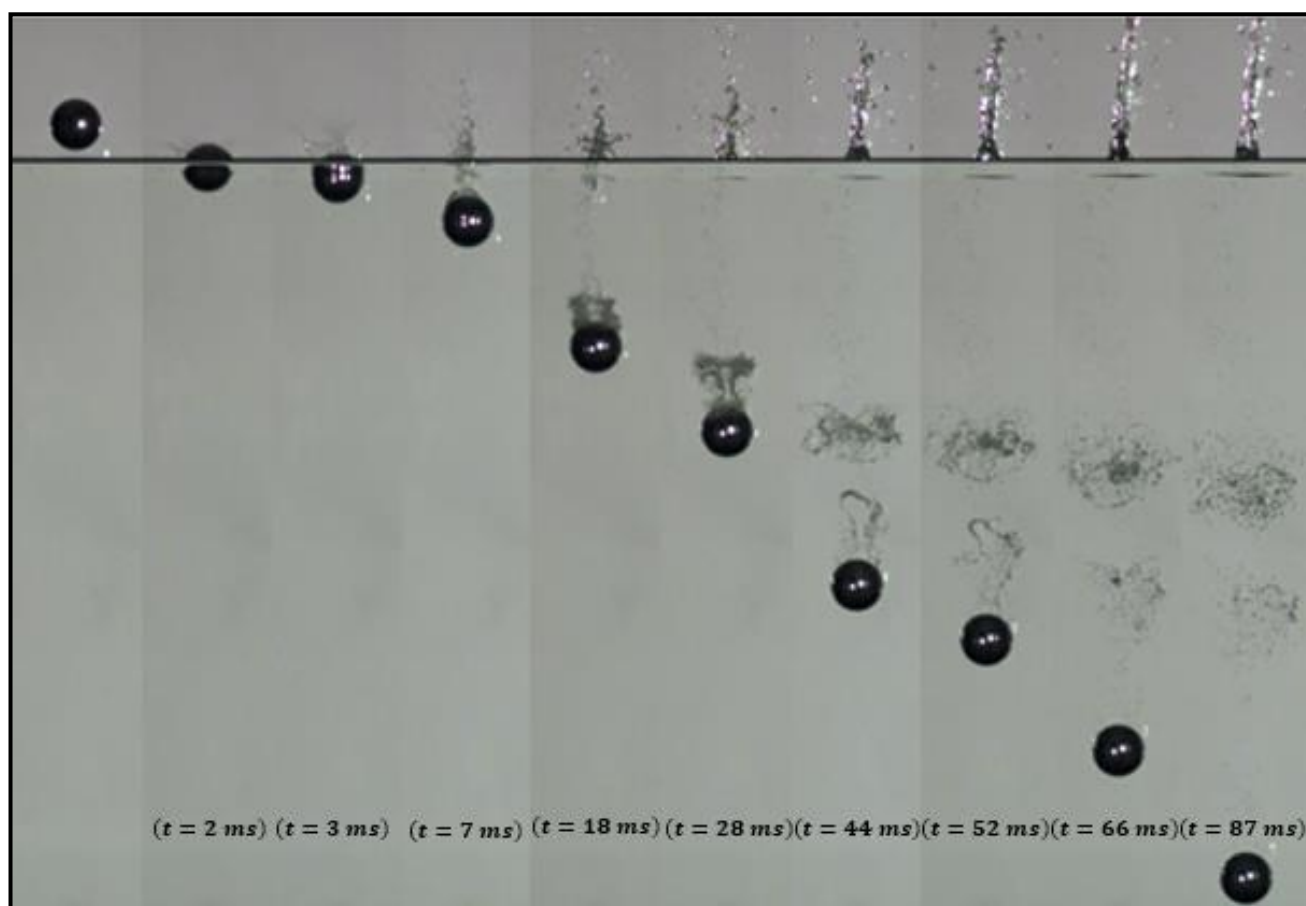
۴-۵ نتایج رهاسازی گوی‌های فلزی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر

در این قسمت به ارائه نتایج تأثیر دیمپل‌های سطحی بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی پرداخته شده است. گوی‌ها از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر، با سرعتی در حدود ۴/۴۲۹ متر بر ثانیه به سطح آب برخورد کرده و وارد آب می‌شوند. مقادیر اعداد بی‌بعد برای گوی‌ها برابر است با $Fr = 200$ ، $Ca = 54.69 \times 10^{-3}$ ، $Re = 99118$ و $Bo = 13.58$ ، $W = 2716.65$. مقدار اعداد بی‌بعد برای هفت گوی فلزی برابر است اما کاواک تشکیل شده توسط گوی‌ها باهم متفاوت‌اند. کاواک‌های تشکیل شده توسط سه گوی $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ شباهت زیادی به هم دارند و تنها در مشخصات کاواک مانند طول و قطر کاواک زمان و طول نقطه جدایش باهم متفاوت‌اند. کاواک‌های تشکیل شده توسط سه گوی $S_{1,8}$ ، $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ نیز به هم شباهت زیادی دارند. رفتار گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ با گوی‌های دیگر کاملاً متفاوت است و هوای بسیار کمی را وارد آب می‌کند. در اثر ورود گوی‌های دارای دیمپل‌های سطحی در این ارتفاع رژیم‌های جدایش نیمه عمیق و عمیق مشاهده گردید. در حالی که در گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ کاواک نامتقارن و بسیار کوچک تشکیل شد. پس از ورود گوی بدون دیمپل سطحی $S_{0,0}$ یک جت شعاعی از نقطه تماس گوی و سطح آب به سمت بیرون تشکیل می‌گردد و با سرعت بسیار زیاد به سمت بالا حرکت می‌کند (شکل ۴-۴۳ (الف-ت)). به دلیل آب‌دوستی سطح گوی مقدار جزئی هوا وارد آب می‌گردد و پس از جدا شدن کاواک از سطح آزاد آب ورتینگتون جت با سرعت زیاد به سمت بالا حرکت می‌کند و پس از ۱۱۰ هزارم ثانیه میرا شده و در آب سقوط می‌کند (شکل ۴-۴۳ (ث-ذ)). همان‌طور که در شکل ۴-۴۴ مشاهده می‌شود در اثر ورود گوی یک کاواک جزئی تشکیل می‌گردد و حداقل هوا را به داخل آب می‌کشاند و پس از مدت کوتاهی در آب دچار فروریزش شده و از بین می‌رود.



شکل ۴-۴: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۱)

$$(Ca = 54.69 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 200, W=2716.65, Re = 99118.7, U_0 = 4.429[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$$

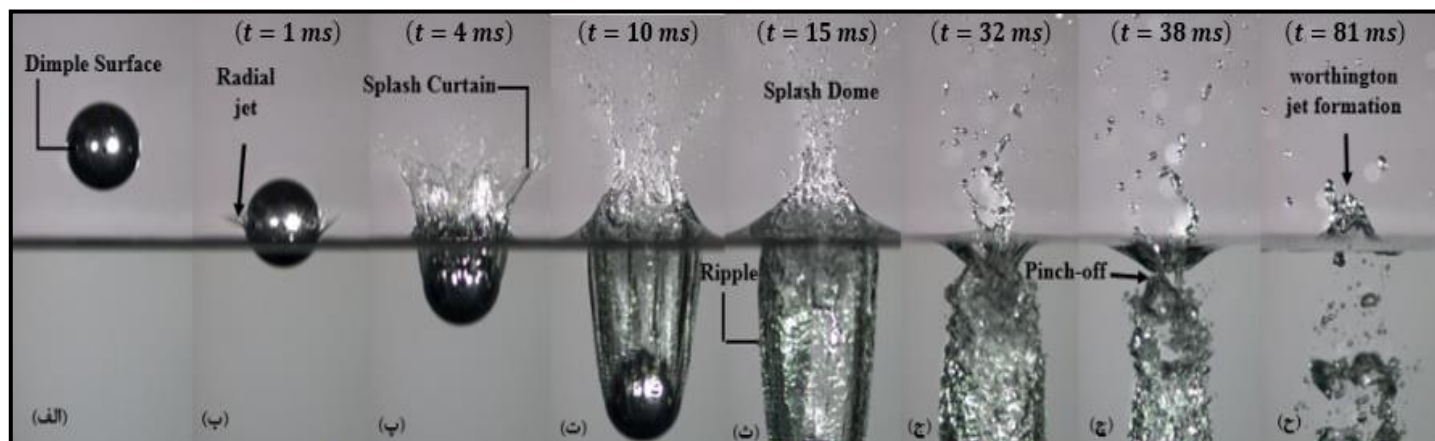


شکل ۴-۴: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{0,0}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۲)

$$(Ca = 54.69 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 200, W=2716.65, Re = 99118.7, U_0 = 4.429[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$$

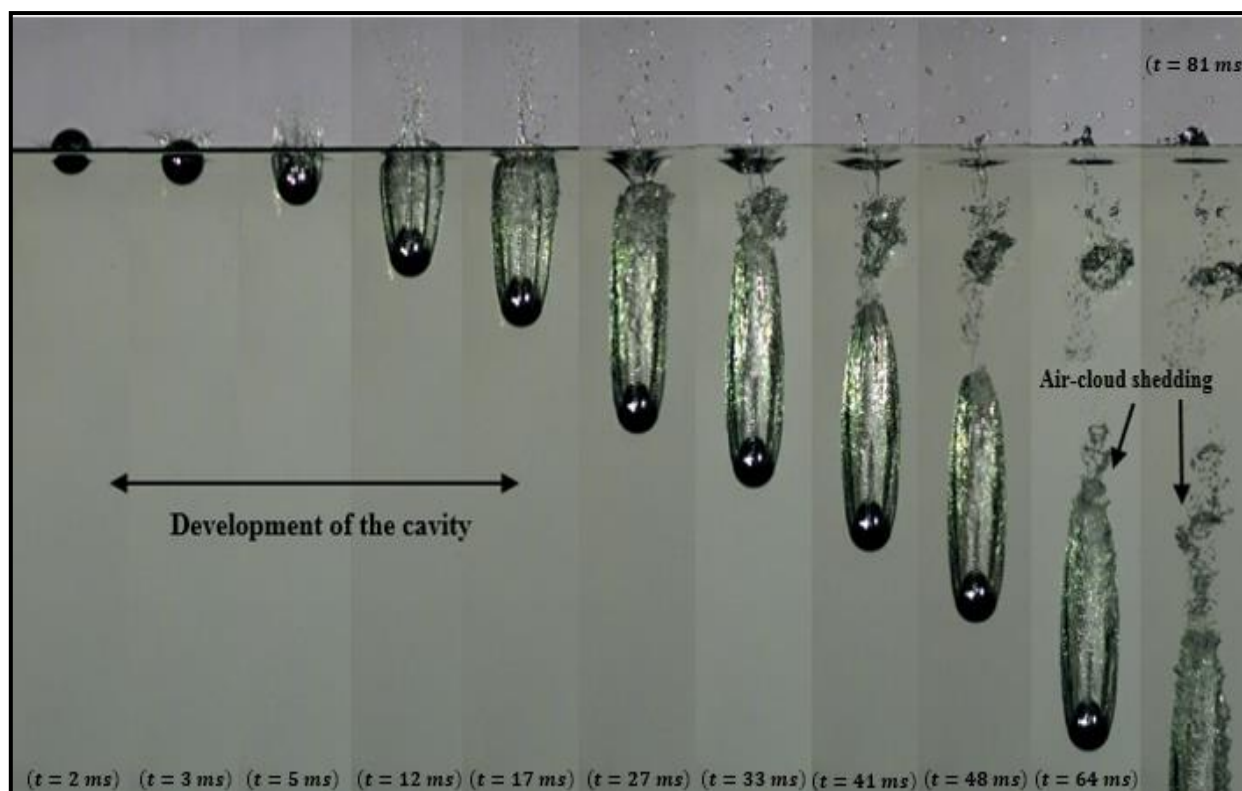
پس از ورود گوی‌های فلزی با سرعت ۴/۴۲۹ متر بر ثانیه در آب، با نمادهای $S_{1,8}$ ، $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ کاواک‌های قابل ملاحظه‌ای به نسبت گوی بدون دیمپل تشکیل می‌گردد، علت آن خاصیت آب‌گریزی سطح گوی‌ها است که به واسطه دیمپل‌های سطحی روی گوی‌ها است. کاواک‌های ایجاد شده توسط سه گوی فلزی $S_{1,8}$ ، $S_{1,12}$

و $S_{3,8}$ تا حد بسیار زیادی شبیه به هم هستند و تنها تفاوت آن‌ها در مشخصه‌های کاواک از جمله طول و قطر کاواک و زمان و عمق نقطه جدایش کاواک است. کاواک‌های تشکیل شده توسط این سه گوی فلزی مشابه رژیم جدایش نیمه عمیق است. به عنوان نمونه پس از برخورد گوی با نماد $S_{1,8}$ به سطح آب ابتدا یک جت شعاعی تشکیل می‌شود و قطرات آب به اطراف و بالا پرتاب می‌شوند در ادامه جت شعاعی رشد پیدا کرده و پرده پاشش آب شکل می‌گیرد و پس از مدت کوتاهی بسته می‌شود و در سطح آب میرا می‌شود (شکل ۴-۴۵ (الف-ث)). به دلیل خاصیت آب‌گریزی سطح گوی، خط تماس آب به سطح گوی می‌چسبد و باعث می‌شود هوا در پشت گوی به دام بیفتد و کاواک شکل بگیرد. در دیواره کاواک ریزموج‌هایی نیز مشاهده می‌شود (شکل ۴-۴۵ (ت-ث)). با افزایش عمق نفوذ گوی در آب در زمانی کمتر از ۲۷ هزارم ثانیه جدایش در کاواک اتفاق می‌افتد و گوی به دو قسمت تقسیم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-۴۵ (ج-چ) مشاهده می‌گردد و از مشخصه‌های رژیم جدایش نیمه عمیق، نیز است جدایش در نزدیک سطح آب اتفاق می‌افتد. در قسمت بالای نقطه جدایش، کاواک به سمت سطح آزاد آب حرکت می‌کند سطح آب را می‌شکافد و یک ورتینگتون جت عمودی کوچک ایجاد می‌کند (شکل ۴-۴۵ (ح)). همان‌طور که در شکل (۴-۴۶) مشاهده می‌شود در قسمت پایین نقطه جدایش و با افزایش عمق کاواک، کاواک شروع به فرو ریزش می‌کند. و به مرور از حجم کاواک کاسته می‌شود. فرو ریزش کاواک، از نوع فرو ریزش ابری است.



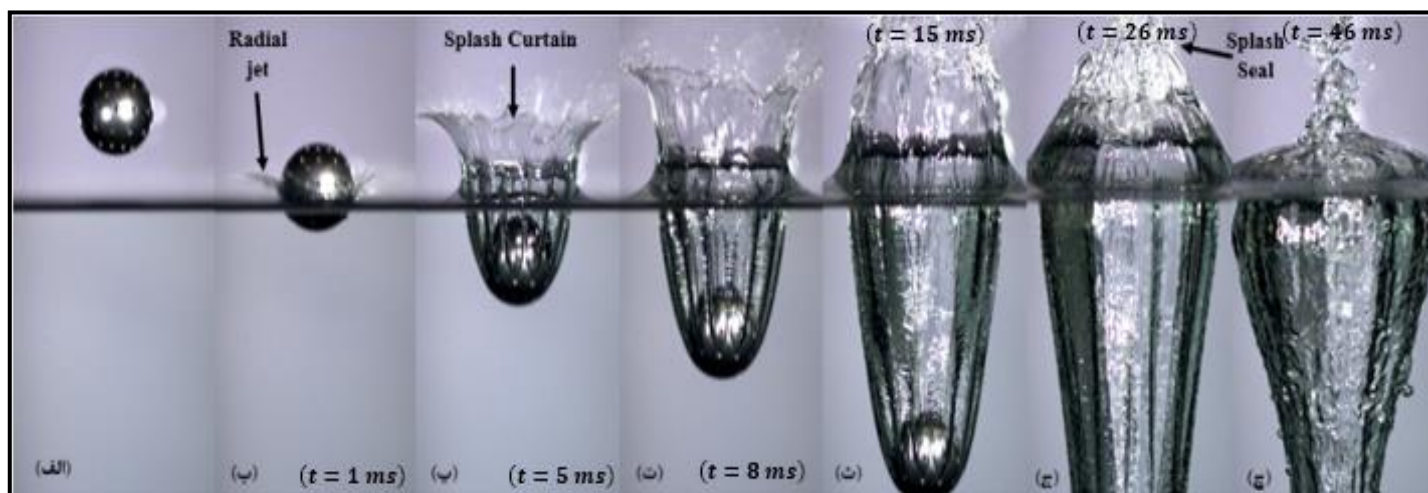
شکل ۴-۴۵: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری (تصویر نوع ۱)

$$(Ca = 54.69 \times 10^{-3}, Bo = 13.58, Fr = 200, W=2716.65, Re = 99118.7, U_0 = 4.429[\text{ms}^{-1}], D_0 = 20[\text{mm}])$$



شکل ۴-۴۶: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{1,8}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۲)

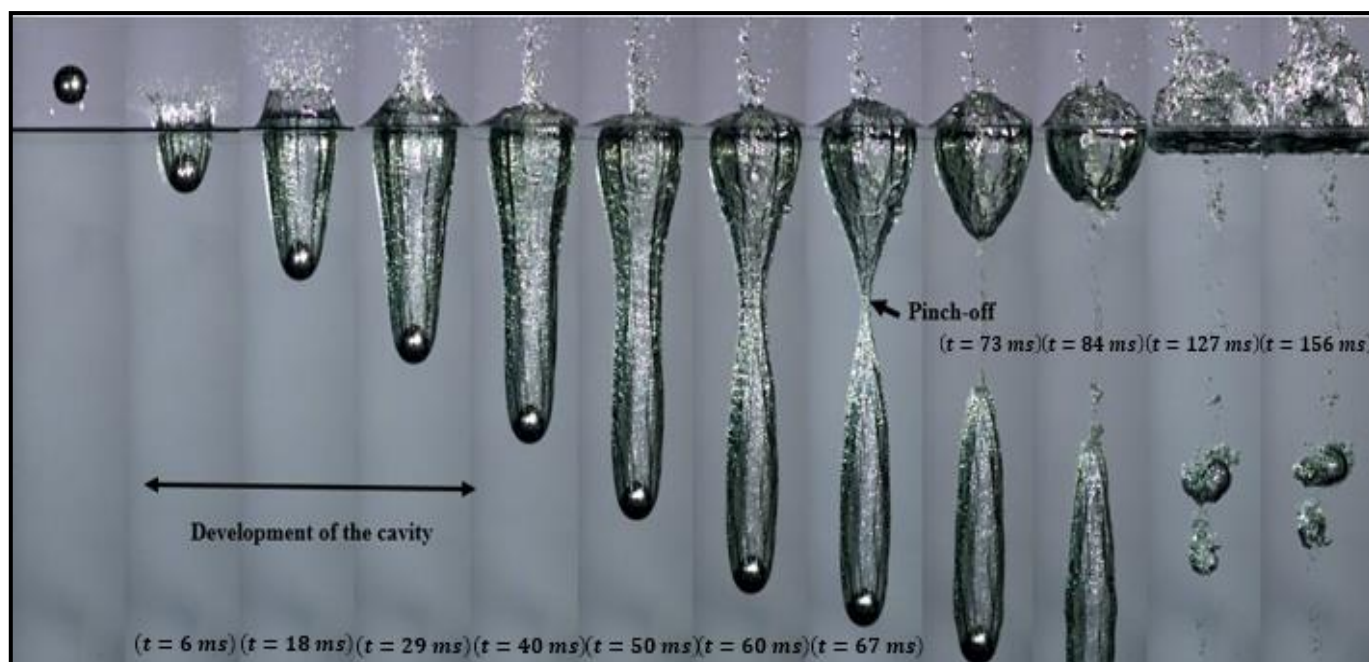
($Ca = 54.69 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 200$, $W=2716.65$, $Re = 99118.7$, $U_0 = 4.429[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)



شکل ۴-۴۷: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۱)

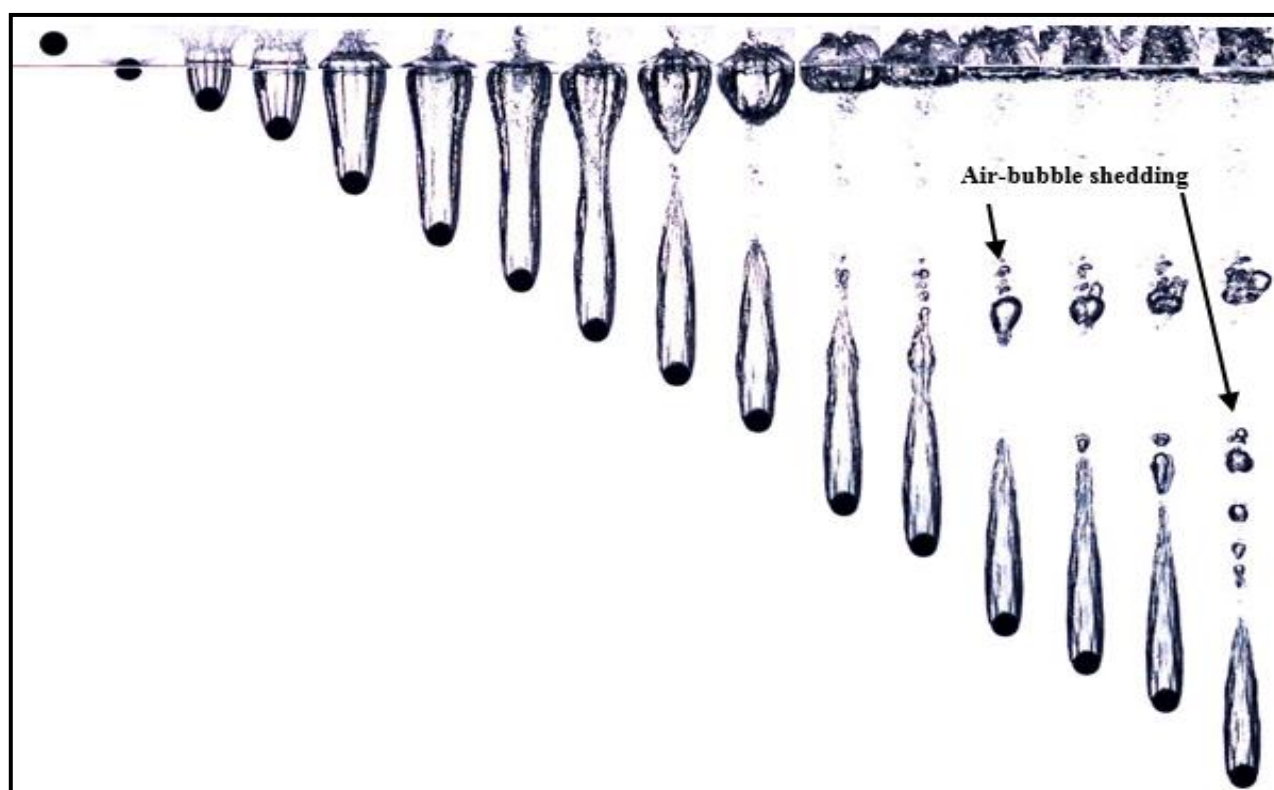
($Ca = 54.69 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 200$, $W=2716.65$, $Re = 99118.7$, $U_0 = 4.429[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)

رفتار سه گوی فلزی دارای دیمپل‌های سطحی با نمادهای $S_{5,12}$ و $S_{5,8}$ و $S_{3,12}$ پس از ورود به آب تا حد زیادی باهم مشابه هستند و مراحل شکل‌گیری کاواک در این سه گوی یکسان است. و تنها از لحاظ مشخصات فیزیکی کاواک از جمله طول و قطر کاواک و زمان و عمق نقطه جدایش کاواک باهم تفاوت دارند. مشخصات کاواک ایجاد شده توسط این سه گوی با ویژگی‌های رژیم جدایش عمیق مطابقت دارد. برای نمونه همان‌طور که در شکل ۴-۴۷ (الف-پ) مشاهده می‌گردد پس از برخورد گوی فلزی با نماد $S_{5,12}$ به سطح آب، در ابتدا یک جت شعاعی تشکیل می‌شود و به دلیل آب‌گریزی سطح گوی آب از سطح آن دور می‌شود و رو به بالا حرکت می‌کند و در ادامه و در کمتر از ۱۴ هزارم ثانیه پس از برخورد گوی به سطح آب، پرده پاشش آب بسیار زیبا و گنبدی شکل تشکیل می‌شود و پس از چند هزارم ثانیه پرده پاشش آب بسته می‌شود (شکل ۴-۴۷ (پ-چ)). با افزایش عمق گوی فلزی به صورتی که در شکل ۴-۴۸ مشاهده می‌شود، در آب کاواک قابل توجه و با طول بلندی ایجاد می‌گردد. و ۶۶ هزارم ثانیه پس از برخورد کاواک به نقطه جدایش می‌رسد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید جدایش بافاصله بیشتری از سطح آب اتفاق می‌افتد و این از تفاوت‌های رژیم جدایش عمیق و نیمه عمیق است. قسمت بالای نقطه جدایش کاواک، به سمت سطح آزاد آب حرکت می‌کند و با پرده پاشش آب میرا می‌شود. در قسمت زیرین نقطه جدایش قسمت اصلی کاواک به سمت پایین حرکت می‌کند؛ و با افزایش عمق، دچار فروریزش می‌شود از قسمت بالای کاواک قطعه‌های از کاواک به صورت حباب هوا از آن جدا می‌شود و به مرور از حجم کاواک می‌کاهد (شکل ۴-۴۹). بر روی دیواره کاواک ریزموج و رپل نیز دیده می‌شود که به دلیل فروریزش و نوسانات فشار است.



شکل ۴-۴: توالی تصویر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری (تصویر نوع ۲)

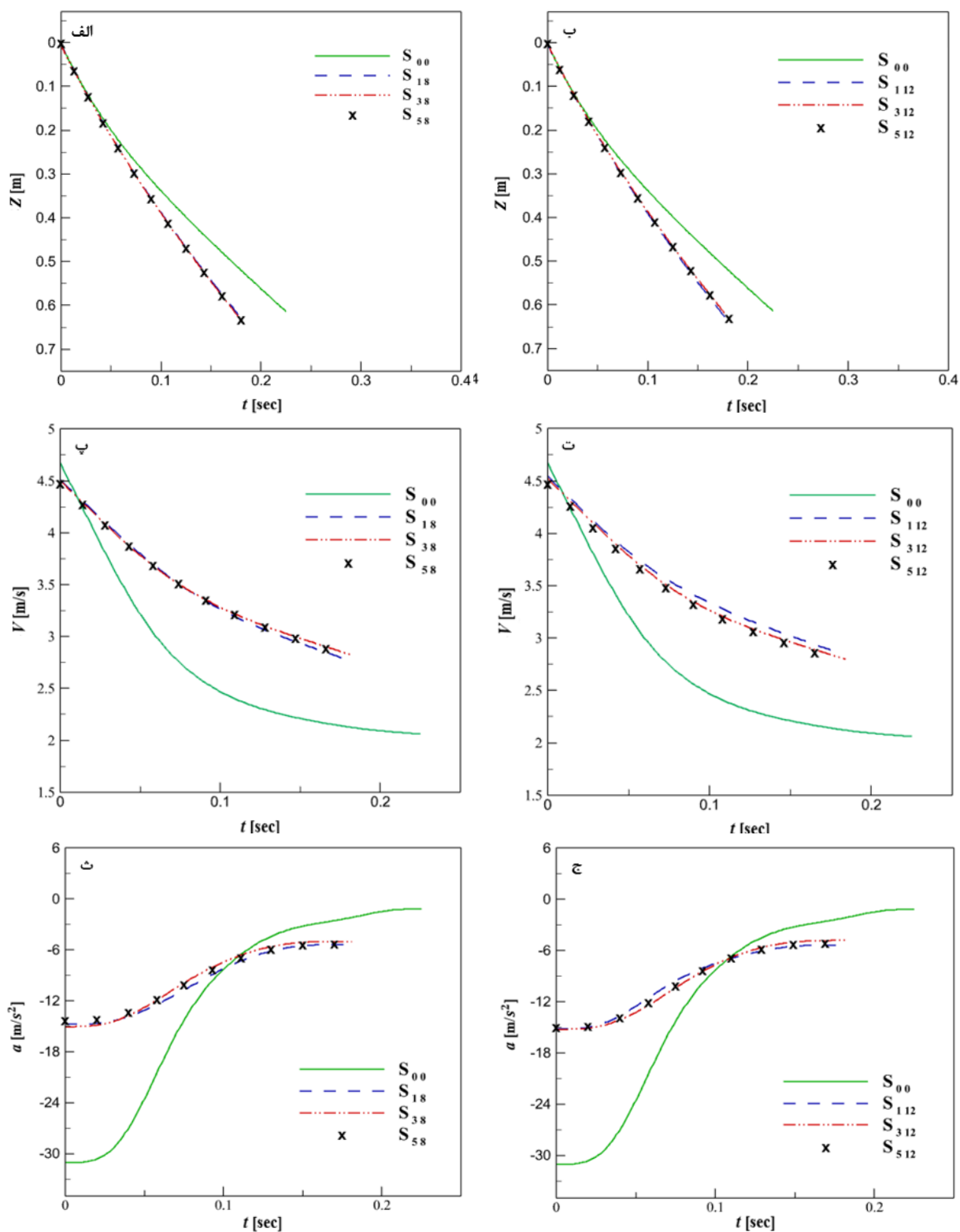
($Ca = 54.69 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 200$, $W=2716.65$, $Re = 99118.7$, $U_0 = 4.429[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)



شکل ۴-۴: تصویر روند شکل گیری و فروریزش کاواک در اثر ورود گوی فلزی $S_{5,12}$ در آب (تصویر نوع ۳)

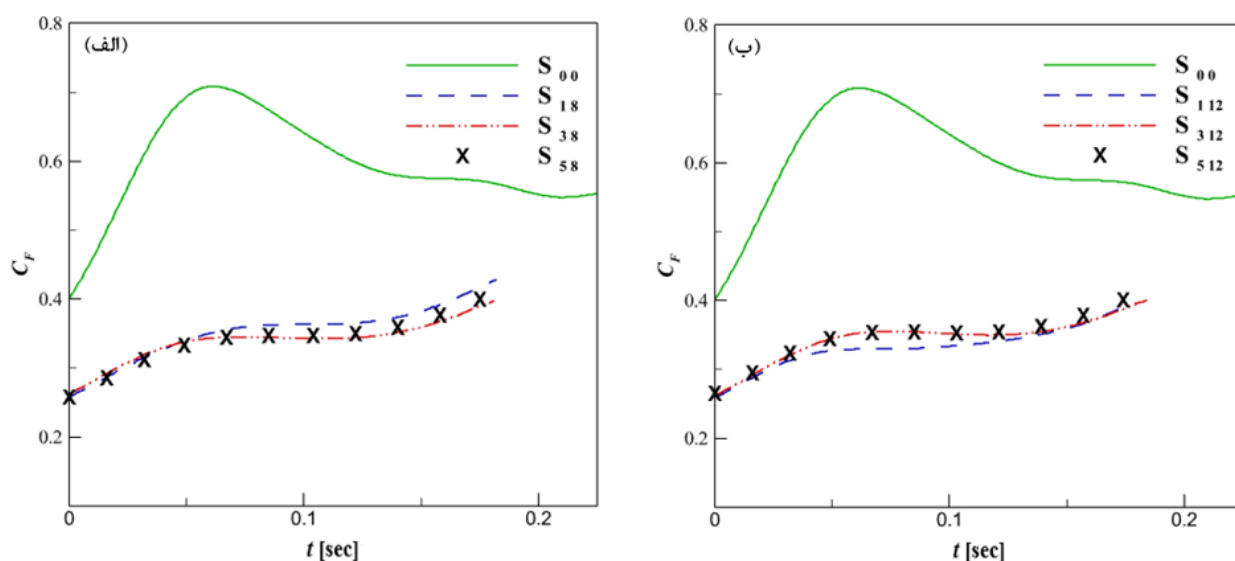
($Ca = 54.69 \times 10^{-3}$, $Bo = 13.58$, $Fr = 200$, $W=2716.65$, $Re = 99118.7$, $U_0 = 4.429[\text{ms}^{-1}]$, $D_0 = 20[\text{mm}]$)

نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان در ارتفاع رهاسازی ۱۰۰ سانتی متری در استخر آب در شکل ۴-۵۰ نمایش داده شده است. در شکل ۴-۵۰ (الف) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان برای سه گوی دارای دیمپل‌های سطحی $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ مشاهده می‌شود که گوی با نماد $S_{1,8}$ مسیر حرکت گوی در استخر آب را در کمترین زمان و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ مسیر حرکت گوی را در بیشترین زمان طی کرده است. در نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب، نسبت به زمان، این چهار گوی در شکل ۴-۵۰ (پ و ث) مشاهده می‌گردد سه گوی $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ سرعت و شتاب بسیار نزدیک به هم دارند اما گوی با نماد $S_{3,8}$ بیشترین سرعت و شتاب و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ کمترین سرعت و شتاب را در بین چهار گوی موردنظر دارند. در شکل ۴-۵۰ (ب، ت و ج) نمودارهای تغییرات مکان، سرعت و شتاب نسبت به زمان، برای چهار گوی $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ نمایش داده شده است. بر طبق نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ تقریباً با زمان بسیار نزدیک به هم مسیر حرکت گوی در استخر آب را طی می‌کنند و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ مسیر حرکت گوی را در بیشترین زمان نسبت به سه گوی دیگر طی کرده است. همچنین بر طبق نمودارهای تغییرات سرعت و شتاب نسبت به زمان گوی $S_{1,12}$ بیشترین سرعت و شتاب و گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ کمترین سرعت و شتاب را در طی حرکت گوی در استخر آب داشته‌اند. در این ارتفاع در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی، سرعت متوسط گوی $S_{1,12}$ نسبت به گوی $S_{0,0}$ ۲۳ درصد افزایش پیدا کرده است.



شکل ۴-۵: الف) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (ب) نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (پ) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$ (ت) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$ (ث) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ ، $S_{5,8}$ (ج) نمودار تغییرات شتاب نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ ، $S_{5,12}$

نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ در شکل ۴-۵۱ (الف) و نمودار ضریب هیدرودینامیکی گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ در شکل ۴-۵۱ (ب) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۵۱ (الف) مشاهده می‌کنید ضریب نیروی هیدرودینامیکی سه گوی $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$ بسیار نزدیک به هم هستند همان‌طور که تغییرات سرعت این سه گوی (شکل ۴-۵۰ (ب)) بسیار نزدیک به هم است. در صورتی که ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی $S_{0,0}$ از سه گوی دیگر بیشتر و دارای تغییرات بیشتری است. همان‌طور که تغییرات سرعت آن نسبت به سه گوی دیگر بیشتر است. بر طبق شکل ۴-۵۱ (ب) گوی‌های $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$ دارای ضریب نیروی هیدرودینامیکی نزدیک به هم هستند اما گوی $S_{1,12}$ با اختلاف بسیار کم کمترین ضریب نیروی هیدرودینامیکی را نسبت به سه گوی دیگر دارد. همچنین گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ دارای بیشترین ضریب نیروی هیدرودینامیکی و بیشترین تغییرات ضریب را نسبت به سه گوی دیگر دارد.

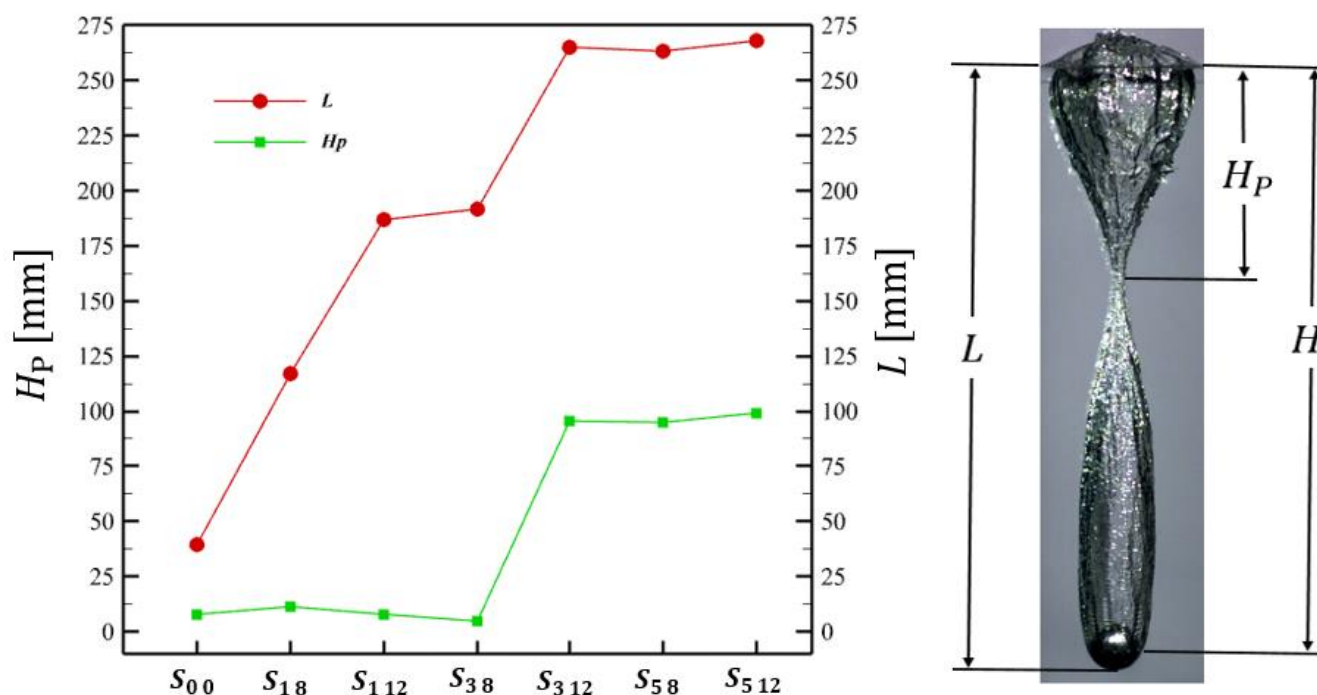


شکل ۴-۵۱: (الف) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{3,8}$ و $S_{5,8}$

(ب) نمودار تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی نسبت به زمان گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,12}$ ، $S_{3,12}$ و $S_{5,12}$

طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک برای هفت گوی مورد آزمایش در ارتفاع رهاسازی ۱۰۰ سانتی‌متر در شکل ۴-۵۲ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در نمودار طول کاواک مشاهده می‌شود با افزایش تعداد و ردیف‌های دیمپل‌های سطحی، طول کاواک افزایش پیدا کرده است به جزء یک استثناء، در گوی $S_{5,8}$ طول کاواک نسبت به گوی $S_{3,12}$ به مقدار کمی کاهش پیدا کرده است. با توجه به شکل ۴-۵۲ در چهار گوی

$S_{0,0}$ ، $S_{1,8}$ ، $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ به دلیل رخ دادن رژیم جدایش نیمه عمیق، جدایش کاواک در نزدیک سطح آب اتفاق افتاده و طول نقطه جدایش بسیار کم است. اما در سه گوی دیگر با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌های سطحی طول نقطه جدایش کاواک با تغییر رژیم به رژیم جدایش عمیق افزایش چشمگیری پیدا کرده است.

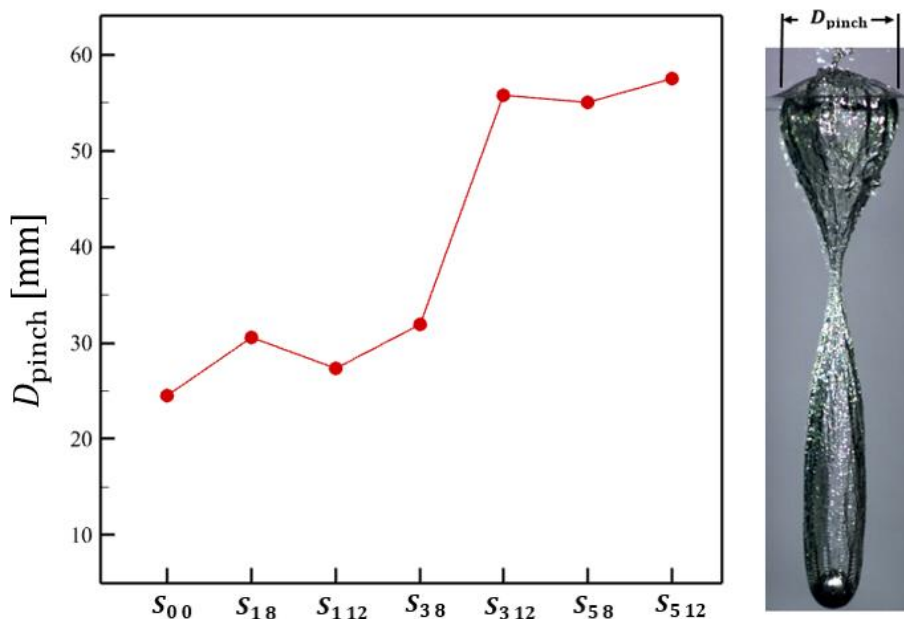


شکل ۴-۵۲: نمودار طول کاواک و طول نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰۰ سانتی‌متر

نمودار قطر کاواک در زمان جدایش، در شکل ۴-۵۳ ارائه شده، با افزایش ردیف و تعداد دیمپل‌های سطحی

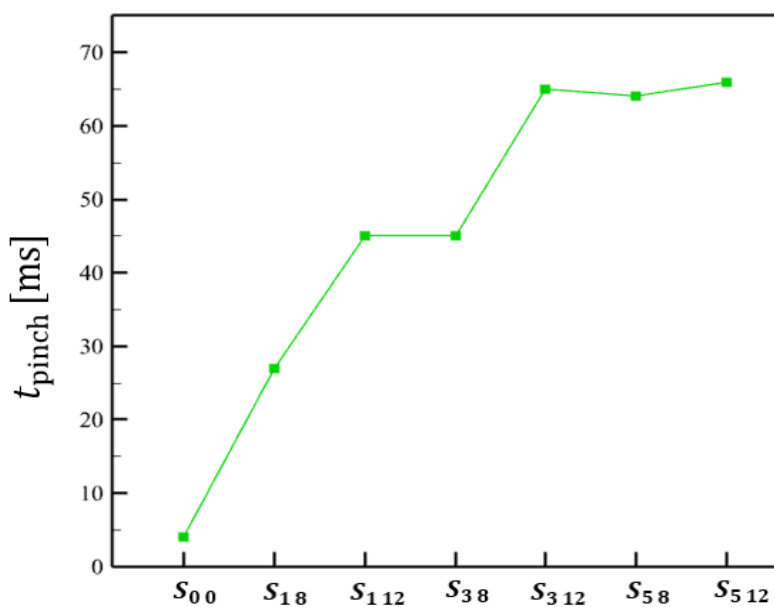
بر روی سطح گوی‌ها قطر کاواک‌ها افزایش پیدا کرده است. به جزء دو مورد در گوی‌های $S_{1,12}$ و $S_{5,8}$ که

نسبت به گوی‌های قبل از خود مقدار کمی کاهش قطر نشان می‌دهند.



شکل ۴-۵۳: نمودار قطر کاواک در زمان جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰۰ سانتی‌متر

نمودار زمان نقطه جدایش کاواک گوی‌های مورد آزمایش در شکل ۴-۵۴ ارائه شده است. بر طبق نمودار با افزایش دیمپل‌های سطحی به استثناء گوی $S_{5,8}$ زمان نقطه جدایش کاواک افزایش پیدا کرده است. با مقایسه نمودار طول کاواک (شکل ۴-۵۲) و زمان نقطه جدایش کاواک می‌توان گفت تا حد زیادی زمان نقطه جدایش کاواک تابعی از طول کاواک است.



شکل ۴-۵۴: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک در گوی‌های مورد آزمایش از ارتفاع رهاسازی ۱۰۰ سانتی‌متر

فصل ۵: نتیجه گیری

۵-۱ بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر تأثیر ایجاد دیمپل‌های سطحی در الگوهای متفاوت، بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌های فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. گوی‌های مورد مطالعه هفت عدد می‌باشند یک گوی بدون دیمپل سطحی و شش گوی دارای دیمپل‌های سطحی در الگوها و تعداد متفاوت هستند. گوی‌ها در نه ارتفاع متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که نتایج پنج ارتفاع در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. گوی‌ها کاواک‌هایی در سه رژیم برخورد شبه استاتیک، جدایش نیمه عمیق و جدایش عمیق تشکیل داده‌اند.

نتایج به دست آمده در این مطالعه به شرح ذیل است:

- در اثر ورود گوی‌ها در آب از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری همگی گوی‌ها کاواک‌هایی با مشخصات و ویژگی‌های رژیم شبه استاتیک ایجاد کردند. جدایش کاواک در این ارتفاع بر روی سطح گوی‌ها ایجاد گردید. تغییرات سرعت در طی مسیر حرکت در استخر آب گوی‌ها بسیار نزدیک به هم است و می‌توان گفت سرعت گوی‌ها در این ارتفاع باهم برابر است.
- در ارتفاع رهاسازی ۱۰ سانتی‌متر در اثر ورود گوی بدون دیمپل و دو گوی $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ کاواک تشکیل نگردید. در گوی‌های دیگر با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌ها و به دلیل خاصیت آب‌گریزی سطح آن‌ها کاواک‌هایی منطبق بر ویژگی‌های رژیم جدایش نیمه عمیق ایجاد شد. گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ با کمترین سرعت و گوی $S_{5,12}$ با بیشترین سرعت مسیر حرکت در استخر آب را طی کردند. در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی سرعت متوسط گوی $S_{5,12}$ نسبت به گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ ، ۸ درصد افزایش یافته است. با ورود گوی $S_{5,12}$ در آب طولانی‌ترین کاواک در بین کاواک‌های به وجود آمده توسط گوی‌های مورد آزمایش ایجاد گردید. دلیل به وجود آمدن کاواک در گوی‌های فلزی دارای دیمپل، به دام افتادن هوا در داخل دیمپل‌ها است. در واقع به دلیل خاصیت آب‌گریزی هوا، هوای به دام افتاده در دیمپل‌ها سطح گوی را دارای خاصیت آب‌گریزی می‌کند. و بعد از برخورد گوی به سطح آب، آب از گوی دور می‌شود و باعث می‌شود هوا در پشت گوی توسط مکانیسم نفوذ هوا وارد آب شود و باعث شکل‌گیری کاواک شود.

پس از ورود گوی‌ها در آب از ارتفاع رهاسازی ۳۰ سانتی‌متری، به‌استثناء گوی بدون دیمپل تمامی گوی‌ها کاواک تشکیل داده‌اند. دو گوی $S_{1,8}$ و $S_{1,12}$ کاواک‌هایی در محدوده رژیم جدایش نیمه عمیق ایجاد کردند و در چهار گوی دیگر با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌ها همگی کاواک‌هایی قابل توجه و منطبق بر ویژگی‌های رژیم جدایش عمیق تشکیل دادند. در این ارتفاع گوی $S_{3,12}$ بیشترین سرعت و گوی بدون دیمپل سطحی کمترین سرعت را در زمان طی کردن مسیر در استخر آب داشته‌اند. با مقایسه سرعت گوی‌ها در این ارتفاع مشخص شد در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی سرعت متوسط گوی $S_{3,12}$ نسبت به گوی بدون دیمپل $S_{0,0}$ ، ۱۸ درصد افزایش یافته است. همچنین گوی $S_{5,12}$ در بین هفت گوی مورد مطالعه طولانی‌ترین کاواک را مانند ارتفاع قبل ایجاد کرده است.

در ارتفاع ۷۵ سانتی‌متری گوی‌ها با سرعتی در حدود ۳/۸۳ متر بر ثانیه وارد آب شده‌اند و به‌استثناء گوی بدون دیمپل تمامی گوی‌ها کاواک تشکیل داده‌اند. سه گوی $S_{1,8}$ ، $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ کاواک‌هایی با مشخصات رژیم جدایش نیمه عمیق ایجاد کرده‌اند. با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌ها در گوی‌های $S_{3,12}$ ، $S_{5,8}$ و $S_{5,12}$ کاواک‌هایی در محدوده رژیم جدایش عمیق ایجاد گردید. در بین گوی‌ها، دو گوی $S_{3,12}$ و $S_{1,12}$ تقریباً بیشترین سرعت را داشته‌اند و مانند حالت‌های قبل گوی $S_{0,0}$ کمترین سرعت را در طی مسیر داشته است. همچنین با مقایسه سرعت گوی‌ها مشخص شد که در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی، سرعت متوسط گوی $S_{3,12}$ نسبت به گوی $S_{0,0}$ ، ۲۱ درصد افزایش پیدا کرده است. مانند دو ارتفاع گذشته گوی $S_{5,12}$ طولانی‌ترین کاواک را در بین گوی‌های دیگر ایجاد کرده است. نکته دیگر آنکه گوی بدون دیمپل در طی مسیر حرکت در آب از مسیر خود منحرف شد در صورتی‌که گوی‌های دارای دیمپل هیچ‌گونه انحرافی از مسیر نداشته‌اند.

در اثر ورود گوی‌ها از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری تمامی گوی‌ها کاواک تشکیل داده‌اند. گوی $S_{0,0}$ کاواک بسیار کوچک و نامتقارن تشکیل داده است. در گوی‌های دارای دیمپل‌های سطحی با افزایش تعداد و ردیف دیمپل‌های سطحی کاواک‌های قابل توجه‌تر و بزرگ‌تری ایجاد گردید. همانند ارتفاع قبل سه گوی $S_{1,8}$ ، $S_{1,12}$ و $S_{3,8}$ کاواک‌هایی در محدوده رژیم جدایش نیمه عمیق و سه گوی دیگر کاواک‌هایی در محدوده رژیم

جدایش عمیق تشکیل داده‌اند. در بین گوی‌ها گوی $S_{1,12}$ با اختلاف ناچیز در کمترین زمان و گوی بدون دیمپل در بیشترین زمان مسیر حرکت را در استخر آب طی کرده‌اند. با مقایسه سرعت گوی‌ها مشاهده شد در اثر اعمال دیمپل‌های سطحی، سرعت متوسط گوی $S_{1,12}$ نسبت به گوی $S_{0,0}$ ۲۳ درصد افزایش یافته است. همانند سه ارتفاع قبل گوی $S_{5,12}$ بزرگ‌ترین کاواک را تشکیل داده است. همچنین در این ارتفاع بزرگ‌ترین پرده پاشش آب به شکل گنبد توسط گوی $S_{5,12}$ ایجاد شده است.

۵-۲ پیشنهادها

در جهت ارتقاء سطح کیفی پژوهش حاضر و انجام مطالعه‌ی جامع‌تر در راستای موضوع این پایان‌نامه، پیشنهادهایی به شرح ذیل مطرح می‌گردد.

- بررسی رفتار گوی‌های دارای دیمپل با سرعت بالا در آب
- بررسی تأثیر هم‌زمان دیمپل‌های سطحی و پوشش‌های آب‌گریز بر رفتار هیدرودینامیکی پرتابه‌ها
- بررسی اثر دیمپل‌های سطحی در اجسام استوانه‌ای با سرهایی با اشکال مختلف
- بررسی تأثیر هم‌زمان دیمپل‌های سطحی و چرخش بر رفتار هیدرودینامیکی گوی‌ها



- [1] J. M. Aristoff, T. T. Truscott, A. H. Techet, and J. W. M. Bush, "The water entry of decelerating spheres," *Phys. Fluids*, vol. 22, no. 3, pp. 1–8, 2010, doi: 10.1063/1.3309454.
- [2] Z. Wei and C. Hu, "Experimental study on water entry of circular cylinders with inclined angles," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 722–738, 2015, doi: 10.1007/s00773-015-0326-1.
- [3] M. Ahmadzadehtalatapeh and M. Mousavi, "A Review on the Drag Reduction Methods of the Ship Hulls for Improving the Hydrodynamic Performance," *Int. J. Marit. Technol.*, vol. 4, pp. 51–64, 2015.
- [4] R. Kantharia, "How Air Lubrication System for Ships Works?," *marineinsight*, 2020. <https://www.marineinsight.com/green-shipping/how-air-lubrication-system-for-ships-work/>.
- [5] Natalia Ermilova, "light torpedo MU-90," 2013. <https://en.topwar.ru/34580-vms-avstralii-zavershili-proceduru-prinyatiya-na-vooruzhenie-legkoy-torpedy-mu-90.html>.
- [6] C. M. Seddon and M. Moatamedi, "Review of water entry with applications to aerospace structures," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 7, pp. 1045–1067, 2006, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.09.002.
- [7] C. Duez, C. Ybert, C. Clanet, and L. Bocquet, "Making a splash with water repellency," *Nat. Phys.*, vol. 3, no. 3, pp. 180–183, 2007, doi: 10.1038/nphys545.
- [8] M. M. Mansoor, I. U. Vakarelski, J. O. Marston, T. T. Truscott, and S. T. Thoroddsen, "Stable-streamlined and helical cavities following the impact of Leidenfrost spheres," *J. Fluid Mech.*, vol. 823, pp. 716–754, 2017, doi: 10.1017/jfm.2017.337.
- [9] J. M. Aristoff and J. W. M. Bush, "Water entry of small hydrophobic spheres," *J. Fluid Mech.*, vol. 619, pp. 45–78, 2009, doi: 10.1017/S0022112008004382.
- [10] Q. Zhang, Z. Zong, T. Z. Sun, Z. Y. Chen, H. T. Li, and P. Online, "Experimental study of the evolution of water-entry cavity bubbles behind a hydrophobic sphere Experimental study of the evolution of water-entry cavity bubbles behind a hydrophobic sphere," *Phys. Fluids*, vol. 062109, no. June, p. 62109, 2020, doi: 10.1063/5.0011414.
- [11] D. Gilbarg and R. A. Anderson, "Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water," *J. Appl. Phys.*, vol. 19, no. 2, pp. 127–139, 1948.
- [12] T. Truscott, A. Techet, and D. Beal, "Shallow angle water entry of ballistic projectiles," 2009.
- [13] J. N. Gu, Z. H. Zhang, C. Wang, and W. J. Fan, "Experimental research for cavity and ballistics of a rotating bullet entraining water levelly," *Acta Armamentarii*, vol. 33, no. 5, pp. 540–544, 2012.
- [14] K. G. Bodily, S. J. Carlson, and T. T. Truscott, "The water entry of slender axisymmetric bodies," *Phys. Fluids*, vol. 26, no. 7, 2014, doi: 10.1063/1.4890832.

- [15] W. Zhang, Y. Qi, W. Huang, and Y. Gao, "Experimental investigation on underwater trajectory deviation of high-speed projectile with different nose shape," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1793, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1063/1.4971588.
- [16] R. C. Hurd, J. Belden, M. A. Jandron, D. Tate Fanning, A. F. Bower, and T. T. Truscott, "Water entry of deformable spheres," *J. Fluid Mech.*, vol. 824, pp. 912–930, 2017, doi: 10.1017/jfm.2017.365.
- [17] J.-C. C. Li, Y.-J. J. Wei, C. Wang, and W.-X. X. Xia, "Cavity formation during water entry of heated spheres," *Chinese Phys. B*, vol. 27, no. 9, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1088/1674-1056/27/9/094703.
- [18] C. Chen, Q. Ma, Y. Wei, and C. Wang, "Experimental study on the cavity dynamics in high-speed oblique water-entry," *Fluid Dyn. Res.*, vol. 50, no. 4, p. 45511, 2018.
- [19] N. B. Speirs, M. M. Mansoor, J. Belden, and T. T. Truscott, "Water entry of spheres with various contact angles," *J. Fluid Mech.*, vol. 862, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1017/jfm.2018.985.
- [20] N. B. Speirs *et al.*, "The water entry of a sphere in a jet," *J. Fluid Mech.*, vol. 863, no. May, pp. 956–968, 2019, doi: 10.1017/jfm.2018.931.
- [21] Y. Shi, G. Wang, and G. Pan, "Experimental study on cavity dynamics of projectile water entry with different physical parameters," *Phys. Fluids*, vol. 31, no. 6, p. 67103, 2019.
- [22] T. Von Karman, "The impact on seaplane floats during landing," *NACA Tech. Note*, vol. 321, 1929.
- [23] A. Hillman, "Vertical impact on a water surface by a 60 cone." Report submitted by the Mathematical Tables Project to the Office of~..., 1946.
- [24] N. Shiffman and D. C. Spencer, "The force of impact on a sphere striking a water surface," vol. 4, no. 4, pp. 379–417, 1951, doi: doi.org/10.1002/cpa.3160040402.
- [25] D. Battistin and A. Iafrati, "Hydrodynamic loads during water entry of two-dimensional and axisymmetric bodies," *J. Fluids Struct.*, vol. 17, no. 5, pp. 643–664, 2003.
- [26] T. Miloh, "On the initial-stage slamming of a rigid sphere in a vertical water entry," *Appl. Ocean Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 43–48, 1991, doi: 10.1016/S0141-1187(05)80039-2.
- [27] V. Duclaux, F. Caillé, C. Duez, C. Ybert, L. Bocquet, and C. Clanet, "Dynamics of transient cavities," *J. Fluid Mech.*, vol. 591, pp. 1–19, 2007.
- [28] Z. T. Guo, W. Zhang, and C. Wang, "Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles," *J. Hydrodyn.*, vol. 24, no. 2, pp. 217–225, 2012, doi: 10.1016/S1001-6058(11)60237-0.
- [29] A. Dymant, "Violent water entry of spheres," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 74, pp. 331–341, 2019, doi: 10.1016/j.euromechflu.2018.08.013.
- [30] R. Zhao, O. Faltinsen, and J. Aarsnes, "Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without flow separation," in *Proceedings of the 21st symposium on naval hydrodynamics*, 1996, pp. 408–423.
- [31] M. S. Park, Y. R. Jung, and W. G. Park, "Numerical study of impact force and ricochet behavior of high speed water-entry bodies," *Comput. Fluids*, vol. 32, no. 7, pp. 939–

- 951, 2003, doi: 10.1016/S0045-7930(02)00087-7.
- [32] F. Reseghetti, “Modeling and numerical simulation of the forces acting on a sphere during early-water entry,” *Ocean Eng.*, vol. 76, pp. 1–9, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.11.015>.
 - [33] J.-G. Gao, Z.-H. Chen, Z.-G. Huang, W.-T. Wu, and Y.-J. Xiao, “Numerical investigations on the oblique water entry of high-speed projectiles,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 362, p. 124547, 2019.
 - [34] Z. Guo, W. Zhang, X. Xiao, G. Wei, and P. Ren, “An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 49, pp. 43–60, 2012, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.04.004.
 - [35] M. R. Erfanian, M. Anbarsooz, N. Rahimi, M. Zare, and M. Moghiman, “Numerical and experimental investigation of a three dimensional spherical-nose projectile water entry problem,” *Ocean Eng.*, vol. 104, pp. 397–404, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.024.
 - [36] M. S. Derakhshanian, M. Haghdel, M. M. Alishahi, and A. Haghdel, “Experimental and numerical investigation for a reliable simulation tool for oblique water entry problems,” *Ocean Eng.*, vol. 160, no. March, pp. 231–243, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.080.
 - [37] Wikipedia, “Buoyancy,” 2008. <https://en.wikipedia.org/wiki/Buoyancy>.
 - [38] D. J. C. Gomes, N. C. De Souza, and J. R. Silva, “Using a monocular optical microscope to assemble a wetting contact angle analyser,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 46, no. 9, pp. 3623–3627, 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2013.07.010.
 - [39] N. Eustathopoulos, “Wetting by liquid metals—application in materials processing: The contribution of the grenoble group,” *Metals (Basel)*, vol. 5, no. 1, pp. 350–370, 2015, doi: 10.3390/met5010350.
 - [40] S. Kim, D. Kim, and H. Kim, “Effect of wettability on the water entry problem of aluminum spheres,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 1257–1263, 2020, doi: 10.1007/s12206-020-0224-2.
 - [41] T. T. Truscott, “Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles by,” *Ocean Eng.*, no. December, 2009.
 - [42] T. T. Truscott, B. P. Epps, and J. Belden, “Water entry of projectiles,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 46, no. September 2013, pp. 355–378, 2014, doi: 10.1146/annurev-fluid-011212-140753.
 - [43] N. Rott, “Note On The History Of The Reynolds Number,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–11, 1990, doi: 10.1146/annurev.fluid.22.1.1.
 - [44] A. Faghri and Y. Zhang, *Transport phenomena in multiphase systems*. Elsevier, 2006.
 - [45] J. Eshraghi, S. Jung, and P. P. Vlachos, “To Seal or Not To Seal Experimental observations Splash curtain modeling,” *Phys. Rev.*, vol. 5, no. 10, 2020, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.104001>.
 - [46] T. Sun, H. Wang, Z. Zong, G. Zhang, A. Wang, and C. Xu, “Splash formation and cavity dynamics of sphere entry through a viscous liquid resting on the water,” *AIP Adv.*, vol. 9, no. 7, 2019, doi: 10.1063/1.5109252.
 - [47] D. A. Watson, J. L. Stephen, and A. K. Dickerson, “Jet amplification and cavity

- formation induced by penetrable fabrics in hydrophilic sphere entry,” *Phys. Fluids*, vol. 30, no. 8, 2018, doi: 10.1063/1.5036655.
- [48] Q. Zhang, Z. Zong, T. Z. Sun, Z. Y. Chen, H. T. Li, and P. Online, “Experimental study of the evolution of water-entry cavity bubbles behind a hydrophobic sphere,” *Phys. Fluids*, vol. 32, no. 6, p. 62109, 2020, doi: 10.1063/5.0011414.
 - [49] T. Grumstrup, J. B. Keller, and A. Belmonte, “Cavity ripples observed during the impact of solid objects into liquids,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, no. 11, pp. 1–4, 2007, doi: 10.1103/PhysRevLett.99.114502.
 - [50] I. U. Vakarelski, D. Y. C. Chan, and S. T. Thoroddsen, “Leidenfrost vapour layer moderation of the drag crisis and trajectories of superhydrophobic and hydrophilic spheres falling in water,” *Soft Matter*, vol. 10, no. 31, pp. 5662–5668, 2014, doi: 10.1039/c4sm00368c.
 - [51] M. Lee, R. G. Longoria, and D. E. Wilson, “Cavity dynamics in high-speed water entry,” *Phys. Fluids*, vol. 9, no. 3, pp. 540–550, 1997, doi: 10.1063/1.869472.
 - [52] PCO, “HIGHSPEED CAMERAS,” 2020. <https://www.pco.de/highspeed-cameras/pcodimax-s1/>.
 - [53] Nikon, “macro lens,” 2020. <https://www.nikonusa.com/en/nikon-products/product/camera-lenses/af-s-vr-micro-nikkor-105mm-f%252f2.8g-if-ed.html>.
 - [54] ZEISS, “lens,” 2020. <https://www.zeiss.com/consumer-products/int/photography/classic/planar-1485.html>.
 - [55] H.-H. Shi and M. Itoh, “High-speed photography of supercavitation and multiphase flows in water entry,” no. 142, pp. 1–7, 2009.

Abstract

Increasing the efficiency of marine and watery equipment has been the subject of much industrial and engineering research in recent years. Making surface changes is one of the simple, inexpensive, long-lasting and non-polluting methods to change the hydrodynamic behavior of objects in fluids. In the present study, the effect of surface dimples on the hydrodynamic behavior of metal spheres with a diameter of 20 mm has been investigated. This study was performed experimentally with seven different spheres, including one sphere without dimples and six spheres with surface dimples. The hydrodynamic behavior of metal spheres in water was investigated by imaging using a high-speed camera at a rate of 1000 frames per second and image analysis was performed with software for image processing. Spheres at seven different release heights, in the range of dimensionless numbers, Froude number (1 to 200), Reynolds number (7019 to 99118), Weber number (13.58 to 2716.6), Bond number (13.58) and capillary number (0.00383 to 0.05469) have been studied in three cavity types of quasi-static, shallow seal and deep seal. A sphere without surface dimples forms a cavity more than 200 in Froude numbers only, and in Froude numbers it does not form less than that cavity and deviates in the path of motion in water. All spheres with surface dimples in the impact regimes with Froude numbers form more than 40 cavities and have a higher velocity in the path of movement in water and do not deviate from the path of movement and have good stability. Two spheres with surface dimples with five rows of dimples also form significant and large cavities in impact with Froude numbers greater than 10. Spheres with three and five rows of surface dimples form two spheres with one row of surface dimples in all impact regimes form more significant and larger cavities.

Keywords: Spheres with surface dimples; How cavities are formed; Concepts of water entry; Types of cavity regimes



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

**A Thesis submitted in partial Fulfillment of the Requirement for
The Degree of master of Science In
Mechanical Engineering**

Experimental investigation of surface dimples on hydrodynamic behavior of falling spherical bodies inside water

By :Hossein Shokri

**Supervisor:
Dr. Pooria Akbarzadeh**

October 2021