

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوزنگ - زنجان



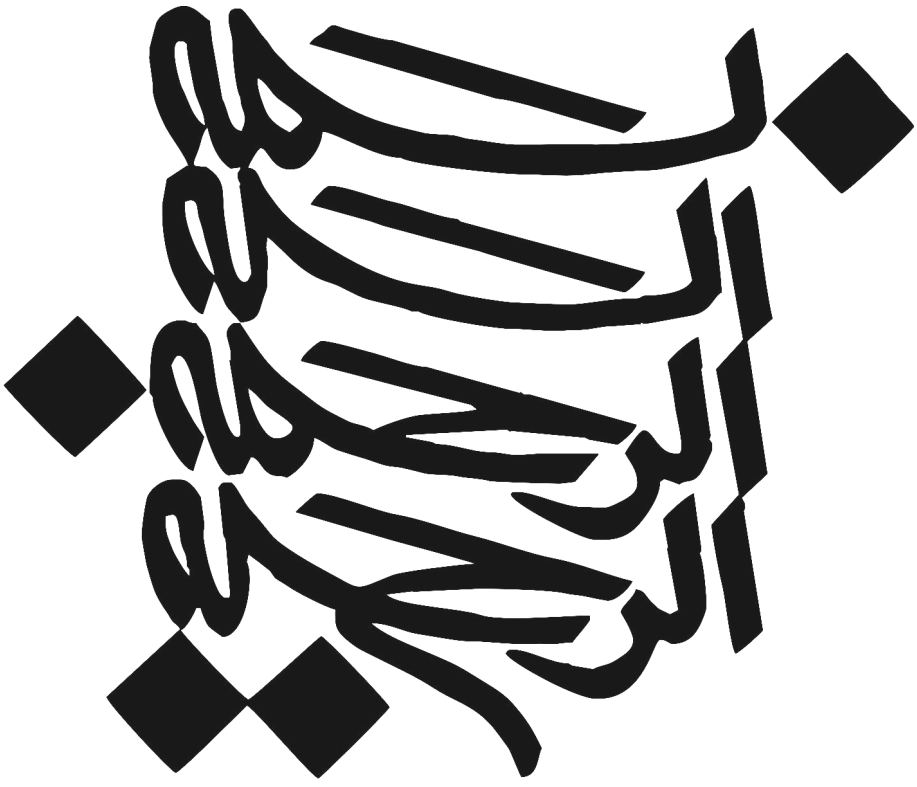
مطالعه‌ی تجربی تولید حباب در اثر ناپایداری کمانش و ماریچش در شاره‌های وشکسان

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

محمد حسن خاتمی

استاد راهنما: دکتر مهدی حبیبی

خرداد ۱۳۹۰



تقدیم به پدر، مادر و برادرانم.

قدردانی و تشکر

از تمامی دوستانی که مرا در طول مدت تحصیل یاری کردند تشکر می‌کنم.

چکیده

در این پایان نامه به صورت آزمایشگاهی به مطالعه‌ی حباب‌های تولید شده در اثر ماریپچش و کمانش در سیال وشکسان می‌پردازیم. حباب‌های مورد مطالعه را به دو دسته‌ی حباب‌های ناشی از تاشدن نوسانی روبان سیال وشکسان و حباب‌های ناشی از ماریپچش ریسمان سیال وشکسان تقسیم بندی می‌کنیم. در حالت تاشدن نوسانی روبان سیال چهار حالت کلی در الگوی حباب‌ها مشاهده می‌شوند که در تمامی وشکسانی‌های مورد آزمایش تولید می‌شوند. در تمامی این حالت‌ها حباب‌های تولید شده تک‌اندازه می‌باشند. ماریپچش ریسمان سیال به پنج حالت تقسیم می‌شود که در چهار حالت آن حباب تشکیل می‌شود حباب‌های تولید شده در تمامی حالت‌ها به جز حالت کمانش ثانویه‌ی ریسمان سیال تک‌اندازه می‌باشند. در حالت حباب‌های ناشی از ماریپچش ثانویه‌ی ریسمان سیال حباب‌های تولید شده از الگوی ماریپچه‌های فرما تبعییت می‌کنند که با ارایه‌ی مدلی ساده اشکال ایجاد شده توسط این حباب‌ها را تولید کردیم.

فهرست

چکیده	.....	پنج
مقدمه	.....	نه

۱ مروری بر کارهای انجام شده در مورد حباب‌ها

۱.۱	مقدمه	.....	۱
۲.۱	وشکسانی	.....	۲
۳.۱	سیال وشکسان	.....	۳
۴.۱	حرکت ماریپچه‌ای	.....	۴
۵.۱	کارهای انجام شده در مورد حباب‌ها	.....	۵
۱.۵.۱	حباب‌های ایجاد شده در اثر برخورد ریزمان سیال با سطح	.....	۵
۲.۵.۱	حباب‌های ناشی از تا شدن نوسانی روبان سیال	.....	۱۰

۲ حباب‌های ناشی از حرکت نوسانی روبان سیال

۱۲	.....	مقدمه	۱.۲
۱۳	.....	چیدمان آزمایشگاهی	۲.۲
۱۶	.....	انواع تاشدن	۱.۲.۲
۲۱	.....	حباب‌های ایجاد شده در روغن با وشکسانی cS ۸۹۰۰	۲.۲.۲
۲۷	.....	حباب‌های ایجاد شده در روغن با وشکسانی cS ۶۱۵۰	۳.۲.۲
۳۸	.....	حباب‌های ایجاد شده در روغن با وشکسانی cS ۳۴۵۰	۴.۲.۲
۴۷	.....	نمودار مکان تشکیل حباب‌ها	۳.۲
۴۸	.....	جمع‌بندی	۴.۲

۳ حباب‌های ناشی از برخورد ریسمان سیال وشکسان با سطح جامد

۵۰	.....	مقدمه	۱.۳
۵۱	.....	رویه‌ی آزمایشگاهی	۲.۳
۵۲	.....	حالت‌های ایجاد شده در اثر برخورد رشته‌ی سیال با سطح جامد و حباب‌های ناشی از آن‌ها	۳.۳
۵۲	.....	جریان ایستای محوری ریسمان سیال	۴.۳
۵۳	.....	حالت تاشدن نوسانی ریسمان سیال	۵.۳
۵۴	.....	حالت ماریپچش ریسمان سیال	۶.۳
۵۶	.....	حالت ماریپچش ثانویه‌ی ریسمان سیال	۷.۳
۵۸	.....	نوع ماریپچش‌های حباب‌های منظم وشبیه‌سازی آن‌ها	۱.۷.۳
۶۱	.....	حالت کماتش ثانویه‌ی ریسمان سیال	۸.۳

۶۵ ۹.۳ جمع بندی

۴ جمع بندی

۶۹ مراجع

مقدمه

ریختن سیال روی سطح از مشاهداتی است که به صورت معمول برای همه‌ی ما اتفاق می‌افتد. پدیده‌های جانبی که هنگام ریخته شدن سیال بر روی سطح اتفاق می‌افتد، توسط گروه‌های بسیاری به صورت تئوری، شبیه سازی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از پدیده‌های جانبی که هنگام ریخته شدن سیال بر روی سطح رخ می‌دهد، تولید حباب است.

حباب‌های تولید شده در صنایع، همچون صنایع شیشه و بلور، مواد غذایی، بهداشتی و آرایشی و تقریباً تمامی صنایعی که به نوعی با سیالات سر و کار دارند، مورد توجه است. در صنایع غذایی و بهداشتی وجود حباب‌های هوا در مواد تولیدی باعث ماندگاری کمتر مواد و فساد سریعتر آن‌ها می‌شود. به همین دلیل این صنایع به دنبال راهکارهایی برای عدم ایجاد حباب در خط تولید خود هستند. در صنایع شیشه و بلور وجود حباب‌ها می‌تواند باعث افزایش ضایعات کارخانه‌ها و در نتیجه کاهش سود آن‌ها شود. وجود حباب‌ها با ترکیب‌بندی‌های خاص باعث تولید وسایل تزئینی در صنایع شیشه و بلور شده و به افزایش سود کارخانه کمک می‌نماید. وجود حباب در صنایع موشکی هنگام پیر کردن مخزن موشک‌ها [۲۰] یا هنگام ذخیره سازی زباله‌های هسته‌ای در مخازن شیشه‌ای [۲۱] می‌تواند مشکلات جدی ایجاد کند.

برای مطالعه‌ی حباب‌ها در سیالات و شکسان، برای راحتی کار سیالی که استفاده می‌کنیم باید بدون تغییرات عمده‌ی چگالی و کشش سطحی، بازه‌ی وسیعی از شکسانی را داشته باشد؛ بدین دلیل ما از روغن سیلیکون استفاده می‌کنیم. برای انجام آزمایش ما از دو نوع شکاف (روزنه) خطی^۱ و دایروی^۲ برای خروج روغن استفاده می‌کنیم. این شکاف‌ها به دلیل شکل خاص خود شکل‌های معینی از شاره را هنگام خروج از شکاف ایجاد می‌کنند. سیال خارج شده از شکاف بصورت یک روبان سیال و سیال خارج شده از روزنه‌ی دایروی بصورت یک ریسمان سیال پایین می‌آید. صفحه‌ی سیال هنگام فرود به علت شکل خاص خود به روی خود تا می‌شود و ایجاد بالشتک می‌کند که در شرایط خاصی این بالشتک‌ها می‌توانند مقداری هوا را بین تاهای خود به دام اندازند و ایجاد حباب‌های منظم کنند. حال اگر از روزنه‌ی دایره‌ای استفاده کنیم، شاره‌ی استوانه‌ای تولید شده،

^۱ slit

^۲ circular

هنگام رسیدن به سطح ایجاد ماریپیج می‌کند، فرکانس ماریپیج با تغییرات ارتفاع و نرخ شارش تغییر می‌کند و این تغییرات در شرایط خاص باعث ایجاد حباب‌های منظم و غیر منظم در سیال پایین سطح می‌شود که کار ما مطالعه‌ی رفتار این حباب‌ها است.

در فصل اول این پایان‌نامه ابتدا تعاریف و مفاهیم اولیه‌ی مورد استفاده در پایان‌نامه را معرفی می‌کنیم، سپس به صورت خلاصه تعدادی از کارهای قبلی انجام شده بر روی حباب‌ها را مرور می‌کنیم. در فصل دوم کارهای آزمایشگاهی انجام شده بر روی حباب‌های ناشی از تاشدن روبان سیال را معرفی می‌کنیم. ابتدا به معرفی چیدمان آزمایشگاهی پرداخته سپس کارهایی را که بر روی حباب‌های ناشی از تاشدن روبان سیال انجام داده‌ایم بیان می‌کنیم. در فصل سوم کارهای آزمایشگاهی انجام شده بر روی حباب‌های ناشی از ماریپیچش ریسمان سیال را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این فصل نیز ابتدا چیدمان آزمایشگاهی خود را معرفی می‌کنیم، سپس حالت‌هایی را که در اثر برخورد ریسمان سیال با سطح ایجاد می‌شوند را معرفی کرده و حباب‌های ناشی از هر حالت را بررسی می‌کنیم. در این فصل مدل ساده‌ای برای مسیر حرکت حباب‌های منظم در حالت ماریپیچش ثانویه ارائه خواهد شد. در فصل چهارم که فصل آخرین پایان‌نامه است به جمع‌بندی کلی کارهای انجام شده بر روی حباب‌ها و نیز کارهایی که در آینده می‌توان انجام داد می‌پردازیم.

فصل اول

مروری بر کارهای انجام شده در مورد حبابها

۱.۱ مقدمه

بیشتر موادی که در زندگی روزمره خود با آنها سروکار داریم، در یکی از دو حالت جامد^۱ یا سیال^۲ دسته‌بندی می‌شوند. یک تکه از جامد شکل مخصوص به خود را دارد؛ به گونه‌ای که وقتی نیروی خارجی اعمال شده بر آن تکه جامد را از روی آن برمی‌داریم، به شکل قبلی خود که در حالت عادی^۳ در آن قرار دارد، باز می‌گردد. در مقابل، سیالات هیچ شکل مخصوصی ندارند و با اعمال نیرو جریان پیدا می‌کنند [۱].

Solid^۱

Fluid^۲

Rest^۳

۲.۱ وشکسانی

در بیشتر سیالاتی که با آن‌ها آشنایی داریم، اگر تغییر کوچکی در یک ناحیه از سیال ایجاد کنیم، این تغییر در محدوده‌ی کوچکی در همان ناحیه اعمال می‌شود. برای توضیح بیشتر این مساله به تعریف کمیتی در سیال به نام وشکسانی می‌پردازیم. در بیشتر سیالات مخصوصاً سیالات مهمی چون هوا، آب، نفت یا جیوه، تنش وارده بر سیال با نرخ تغییر شکل سیال رابطه‌ای خطی دارد. ما این سیالات را سیالات نیوتنی و ضریب تناسب این معادله را وشکسانی می‌نامیم.

فرض کنید که جریان موازی در امتداد صفحه‌ای تخت با سرعتی که در فاصله‌ی دور از صفحه U در جهت x قرار دارد، بردار y به صورت عمود بر صفحه و سرعت جریان $(U(y), 0)$ در دستگاه کارتزین (x, y) قرار دارد. میدان جریان $(U(y), 0)$ به صورت جریان تماسی موازی است.

برای دارا بودن این جریان تماسی، به این صفحه نیروی اصطکاکی که منشا آن جریان است وارد می‌شود. نیروی اصطکاک بر واحد سطح صفحه به صورت زیر داده می‌شود:

$$\sigma_f = \eta \frac{dU}{dy}$$

که به آن قانون اصطکاک وشکسانی نیوتن می‌گویند و در آن η ثابت وشکسانی دینامیک^۴ است [۲].

مقدار وشکسانی به ساختار شیمیایی ماده و تغییرات ترمودینامیکی سیال بستگی دارد. واحد وشکسانی دینامیک در SI برابر $kg.m.s^{-1}$ یا $Pa.s$ (پاسکال ثانیه) و واحد آن در دستگاه گوسی، پواز^۵ P است. در ادامه با وشکسانی سینماتیکی^۶ سیال، ν نیز آشنا می‌شویم که واحد آن در SI برابر با $m^2.s^{-1}$ و واحد آن در دستگاه گوسی $cm^2.s^{-1}$ یا استوکس^۷ S است.

Dynamic viscosity^۴

Poise^۵

Kinematic viscosity^۶

Stokes^۷

۳.۱ سیال وشکسان

اگر معادلات تشکیل دهنده برای سیال نیوتنی را در معادلات پایستگی جاگذاری کنیم به معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای می‌رسیم که به افتخار ناویر^۸ و استوکس^۹ به معادله‌ی ناویر-استوکس معروف است [۲]. معادله‌ی ناویر استوکس به صورت زیر است:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{\rho} \vec{F}$$

این معادله معادل قانون نیوتن در داخل سیالات است. این معادله و معادله‌ی پیوستگی:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

به عنوان یک جفت معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌ای قلمداد می‌شوند که قوانین فیزیکی وارد بر ذرات در سیال نیوتنی را بازگو می‌کنند که در آن جمله‌ی اول از سمت چپ جمله‌ی ناشی از شتاب، جمله‌ی دوم از سمت چپ ناشی از شتاب همرفتی، جمله‌ی اول معادله از سمت راست جمله‌ی ناشی از گرادیان فشار، جمله‌ی دوم جمله‌ی ناشی از وشکسانی و جمله‌ی آخر ناشی از نیروهای خارجی وارد بر ذرات سیال است. در اینجا $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ بیانگر وشکسانی سینماتیکی سیال است.

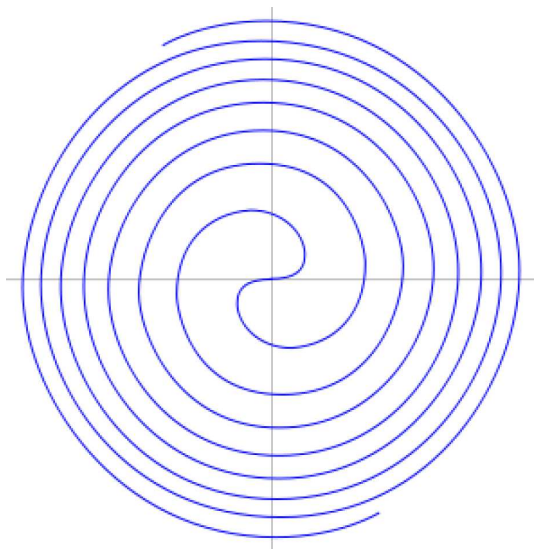
اگر نیروهای اصطکاکی را در سیال از بین ببریم، نیروی محرک وارده بر سیال باعث سر خوردن سیال می‌شود. به همین خاطر است که می‌توان پس از هم زدن چای قاشق خود را از آن خارج کرده و مدتی به تماشای چرخش چای در فنجان مشغول شویم. وشکسانی در مقابل این تغییرات که از حرکت سیال ناشی می‌شود مقاومت می‌کند و سیال را به حالت سکون می‌رساند.

مثال بالا تجربه‌ی ساده‌ای است که بستگی زیادی به مقدار عدد رینولدز^{۱۰} $Re = \frac{UD}{\nu}$ دارد که در آن

^۸ C. L. M. H. Navier

^۹ Sir G. G. Stokes

^{۱۰} Reynolds Number



شکل ۱-۱: مارپیچه‌ی فرما [۳].

سرعت نوعی قاشق، D قطر فنجان و ν وشکسانی سینماتیک چای است. اگر $Re > 1$ باشد جریان غیر وشکسان است و می‌توان در آن از نیروهای وشکسان در برابر جملات لختی صرف نظر کرد ولی اگر $Re < 1$ باشد بیانگر وشکسان بودن جریان است و بدین معنی است که در آن می‌توان از جمله‌ی لختی صرف نظر کرد.

۴.۱ حرکت مارپیچه‌ای

مارپیچه^{۱۱} خمی است که از یک نقطه‌ی مرکزی شروع شده و هرچه دور نقطه‌ی مرکزی می‌پیچد از آن دورتر می‌شود (شکل (۱-۱)) [۳]. مارپیچه‌ها به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. مارپیچه‌های ارشمیدسی حالتی از مارپیچه‌ها هستند که از تابع زیر تبعیت می‌کند:

$$r = a + b\theta^{\frac{1}{n}}$$

که در آن r شعاع، θ زاویه‌ی قطبی و a و b ثابت‌های معادله هستند. حالت خاصی از مارپیچه‌های ارشمیدسی که برای $n = 2$ اتفاق می‌افتد مارپیچه‌های فرما نام دارد که در طبیعت به وفور یافت می‌شود [۴].

^{۱۱} Spiral

۵.۱ کارهای انجام شده در مورد حباب‌ها

حباب به سیستمی می‌گویند که در آن مقداری گاز در داخل سیال به دام افتاده باشد. تولید حباب از تجربیاتی است که در زندگی روزمره به دفعات رخ می‌دهد. در ادامه به تعدادی از کارهایی که قبلاً بر روی حباب‌ها انجام شده می‌پردازیم.

۱.۵.۱ حباب‌های ایجاد شده در اثر برخورد ریسمان سیال با سطح

در گذشته کارهای زیادی روی دینامیک ریسمان سیال هنگام افتادن بر روی سطح انجام شده است. در این حالت ریسمان سیال پس از افتادن بر روی سطح شروع به ایجاد حالت‌های مختلفی می‌کند که قبلاً مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۳ - ۵]. در برخی از این حالت‌ها سیال می‌تواند هوا را به دام انداخته و ایجاد حباب کند.

در سال ۱۹۹۷ کلنه^{۱۲} و لاشرا^{۱۳} کارهایی را روی عمق نفوذ حباب‌های ایجاد شده در آب در اثر ورود یک رشته‌ی استوانه‌ای آب به داخل مخزن آب انجام دادند [۵]. آب از روزه‌ای به قطر داخلی D با سرعت میانگین v با زاویه‌ی θ به داخل مخزن آبی در فاصله‌ی h از روزه وارد می‌شود (شکل (۱-۲)).

در ابتدا آب به صورت عمود بر سطح مخزن وارد می‌شود ($\theta = 0$). هنگامی که سرعت رشته‌ی سیال از سرعت آستانه‌ی v_c بیشتر باشد، رشته‌ی سیال می‌تواند بر نیروهای موینگی^{۱۴} غلبه کند و لایه‌هایی از هوا داخل سیال شود. لایه‌های هوا با جریان سیال داخل مخزن می‌شوند و به علت تعادل بین فرایندهای تکه‌تکه شدن^{۱۵} و به هم آمیختگی^{۱۶} اندازه‌ی حباب‌ها بزرگتر می‌شود. در بیشترین عمق نفوذ حباب‌ها به خاطر نیروهای شناوری^{۱۷} که به حباب‌ها وارد می‌شود، به نیروی وشکسانی وارد شده بر حباب‌ها غلبه می‌کند و حباب‌ها به

^{۱۲} Christophe Clanet

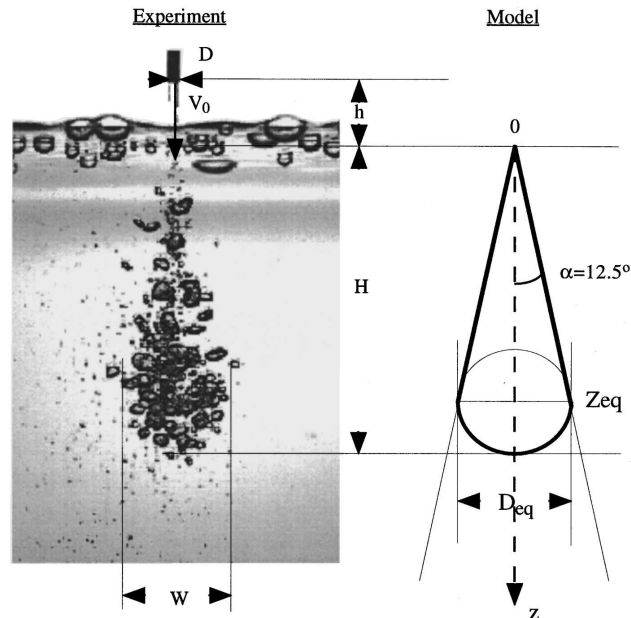
^{۱۳} Juan C. Lasheras

^{۱۴} Capillary forces

^{۱۵} Break up

^{۱۶} Coalescence Processes

^{۱۷} Buoyancy



شکل ۱-۲: جت آب داخل شده به مخزنی از آب ($v_0 = 2/4 \text{ m/s}$, $D = 2/159 \text{ mm}$, $h/D = 7$, $\theta = 0^\circ$) [۵].

سمت سطح سیال حرکت می کنند. این برگشت حباب ها تقریباً در عمق H از سطح سیال به وقوع می پیوندد. البته حباب های ریزتری وجود دارند که به عمق های بیشتری نفوذ می کنند. با استفاده از پایداری تکانه ای خطی جت سیال خروجی از روزنه و جت سیال در عمق ($z = H$)، برای سرعت متوسط شاره $U_j(z)$ داریم:

$$U_j(z) = v_0 \frac{D}{D_j(z)}$$

با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی داریم که جت سیال در عمق H در نیم زاویه $\alpha = 12/5^\circ$ پخش شده است. پس می توان عمق نفوذ H را به عنوان عمق نفوذ جریان در نظر گرفت که در آن سرعت نفوذ جت سیال با سرعت نهایی حباب ها U_T برابر است ($U_j(H) = U_T$) [۱۴]. پس:

$$\frac{H}{D} = \frac{1}{7 \tan \alpha} \frac{v_0}{U_T}$$

تنها مشکل باقی مانده محاسبه U_T حباب هاست که به بیشترین عمق نفوذ H می رسند. بر اساس کارهای قبلی [۱۱] سرعت یک تک حباب برای این آزمایش $U_T \approx 22/5 \text{ cms}^{-1}$ بدست می آید که به صورت کیفی با سرعت های بدست آمده به صورت تجربی هم خوانی دارد. برای پیدا کردن سرعت حباب های خوشه ای ایجاد

شده در این آزمایش از فرمول $U_T = U_{T_{bubble}} \sqrt{1 - \alpha_G}$ استفاده می‌کنیم که در آن α_G نسبت هوا در توده‌ی حباب‌هاست [۱۵]. با در نظر گرفتن $U_T = 0.22 \text{ m s}^{-1}$ محاسبات نشان می‌دهد که $\frac{H}{D} \simeq 10/25 v_0$ بدست می‌آید که بسیار به نتایج کارهای قبلی نزدیک است [۱۴]. به علت افت و خیزهای زیادی که در تعیین H وجود دارد، از $z = Z_{eq}$ به عنوان مرجع استفاده می‌کنیم شکل (۱-۲). با این تغییر داریم که $D_{eq} = 2 \tan \alpha Z_{eq}$ و در نتیجه:

$$\frac{H}{D} = \frac{1 + \tan \alpha v_0}{2 \tan \alpha U_T}$$

بیشترین عرض توده‌ی حباب‌ها، w ، با استفاده از Z_{eq} را می‌توان به صورت $\frac{w}{D} = \frac{v_0}{U_T}$ نوشت. حال با استفاده از معادلات قبل برای شارهی وارد شده با زاویه‌ی θ به داخل مخزن سیال داریم:

$$\frac{H}{D} = \frac{(1 + \tan \alpha) \cos \theta + \tan \alpha \sin \theta \cos(\theta - \alpha)}{2 \tan \alpha \cos \alpha} \frac{v_0}{U_T}$$

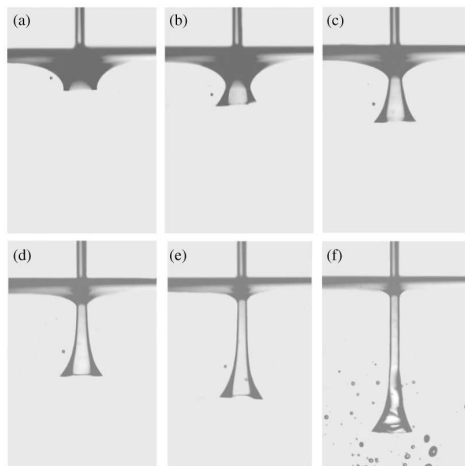
برای داده‌های $\theta > 30^\circ$ این معادله با نتایج آزمایشگاهی با خطای ۱۵ درصد هم‌خوانی دارد ولی برای $0^\circ < \theta < 30^\circ$ این هم‌خوانی از بین می‌رود.

در سال ۲۰۰۴ لورنزا^{۱۸}، کقه^{۱۹} و اِگِرز^{۲۰} کاری روی حباب‌های ناشی از وارد شدن ریسمان سیال و شکسان داخل مخزنی از همان سیال را ارائه دادند [۶]. در این کار از روغن سیلیکون با شکسانی $\eta = 97 \text{ cP}$ استفاده شد. ریسمان سیال و شکسان با سرعت v به داخل مخزنی از همان سیال وارد می‌شود، اگر این سرعت از سرعت بحرانی v_c بیشتر باشد این ریسمان سیال لایه‌ی هوایی را با خود به داخل مخزن سیال می‌برد. در کارهای قبلی سرعت بحرانی به صورت $v_c \propto \ln(\frac{D}{\eta_c})$ به دست می‌آید که در آن η و شکسانی سیال و η_c و شکسانی سیال محیط است که بیشتر مواقع سیال محیط هاست ۱۷ - ۱۶.

Elise Lorenceau ^{۱۸}

David Quere ^{۱۹}

Jens Eggers ^{۲۰}



شکل ۱-۳: جتی از سیال وشکسان (در اینجا روغن سیلیکون با وشکسانی $\eta = 970 \text{ mPas}$ و قطر $1/5 \text{ mm}$) داخل مخزنی از همان سیال می شود. (a) حالتی که سرعت سقوط جت کمتر از سرعت بحرانی است. (b - e) سرعت بالاتر از سرعت بحرانی برای جت سیال. (f) حالتی که جت سیال به حالت ایستا رسیده و شکل ترومپت به خود گرفته است [۶].

همان طور که در شکل (۱-۳) دیده می شود، جت سیالی با قطر $1/5 \text{ mm}$ با وشکسانی تقریباً 1000 برابر آب وارد مخزن سیالی از همان جنس می شود. سرعت سیال فرودی با تغییر ارتفاع سقوط ریسمان از سطح مخزن تنظیم می شود. در شکل (۱-۳-a) سرعت سقوط کمتر از سرعت v_c است و شکل دیده شده به صورت ایستا است. اگر سرعت سقوط از سرعت بحرانی بیشتر شود، سطح شکسته و ریسمان سیال داخل مخزن شده و همراه با خود لایه ی هوایی را داخل مخزن سیال می کند شکل (۱-۳-b) تا شکل (۱-۳-f). هنگامی که ریسمان سیال به آخرین عمق نفوذ خود می رسد شکلی شبیه به ترومپت به خود می گیرد و لایه ی هوا به حباب هایی شکسته و داخل سیال می شود.

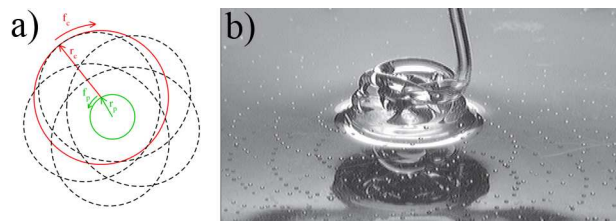
در سال ۲۰۰۸ حبیبی^{۲۱}، مولر^{۲۲}، ریه^{۲۳} و بن^{۲۴} کاری را درباره ی حباب های ایجاد شده در اثر کماتش ریسمان سیال به هنگام برخورد با سطح جامد منتشر کردند [۱۸]. در این کار از روغن سیلیکون با وشکسانی های مختلف $\nu = 100, 300, 1000, 5000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ استفاده شد و مشاهده شد که حباب های منظم مارپیچی برای وشکسانی $\nu = 300 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ برای قطر روزنه ی خروج سیال $d = 1/5, 1/6 \text{ mm}$ و نرخ شارش $Q = 0/047 - 0/137 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ و $H = 32 - 50 \text{ mm}$ دیده می شود. در محدوده ی خاصی از رژیم گرانشی

^{۲۱} M. Habibi

^{۲۲} P. C. F. Moller

^{۲۳} N. M. Ribe

^{۲۴} D. Bonn



شکل ۱-۴: (a) شعاع و فرکانس ماریپچه ریسمان سیال و r_p و شعاع و فرکانس حرکت تقدیمی ماریپچه روی یک دایره که از حرکت مرکز ماریپچه ریسمان سیال ایجاد می شود هستند. در اینجا $r_c/r_p = 3$ و $f_c/f_p = 4$. (b) ریسمان سیال حباب های هوا را به دام می اندازد و حباب های به دام افتاده اشکال ماریپچه ای زیبایی را پدید می آورند. قطر توده ی سیال در حدود 1cm است [۱۸].

مشاهده می شود که هوا بین رشته های سیال به دام افتاده و تولید حباب می کند که این حباب ها هنگام خروج از زیر توده ی سیال به صورت ماریپچه های پنج شاخه بر روی سطح حرکت می کنند (شکل ۱-۴-b).

در این حالت از ماریپچ ریسمان سیال مرکز ماریپچ حول دایره ای که از حرکت خود ایجاد می کند با بسامدی حدود ۲۵ درصد فرکانس ماریپچش خود حرکت تقدیمی می کند. به همین خاطر ماریپچه های جدید روی ماریپچ قبلی ایجاد نمی شوند و در فاصله ی بین دو ماریپچش حباب های هوا به دام می افتند. این حباب ها تشکیل پنج شاخه ی منظم را می دهند. این پنج حباب در چهار دوره ی ماریپچش ایجاد می شوند (شکل ۱-۴-a). اندازه ی حباب ها با افزایش نرخ شارش افزایش می یابد. اندازه ی حباب ها با تغییرات ارتفاع نیز تغییر می یابد. چرخش شاخه های ماریپچش حباب ها به نرخ شارش و ارتفاع سقوط بستگی دارد.

برای مدل سازی این حرکت با فرض بقای حجم و ثابت بودن ارتفاع فیلم سیال روی سطح داریم که سرعت حرکت حباب ها روی سطح از $\frac{dr}{dt} \sim \frac{1}{r}$ یا $r \sim t^{0.5}$ پیروی می کند. از آنجایی که مولد حباب با فرکانس چرخشی ثابتی حرکت می کند، داریم $r = \pm a\theta^{0.5}$ که در آن شعاع، a یک مقدار ثابت و θ زاویه است. این الگوی حرکت حباب ها از الگوی حرکت ماریپچش های فرما تبعیت می کند. برای مدل کردن این حرکت فرض می کنیم که مرکز ماریپچش ریسمان با بسامد f_p حول دایره ای به شعاع r_p می چرخد و فرکانس و شعاع ماریپچش ها حول این دایره به ترتیب f_c, r_c می باشد شکل ۱-۴-a). بنابراین مسیر حرکت حباب ها از رابطه ی

زیر تبعیت می‌کند:

$$x(t) = r_p \cos(2\pi f_p t) + r_c \cos(2\pi f_c t)$$

$$y(t) = r_p \sin(2\pi f_p t) - r_c \sin(2\pi f_c t)$$

مشاهدات نشان داده که برای این آزمایش $\frac{r_c}{r_p} \approx \frac{f_c}{f_p} \approx 4$ است. آن‌ها در این کار نحوه‌ی محاسبه‌ی تعداد شاخه‌های حباب‌های ایجاد شده برای یک آزمایش نوعی را نیز محاسبه کرده‌اند.

۲.۵.۱ حباب‌های ناشی از تاشدن نوسانی روبان سیال

کارهای زیادی در گذشته روی دینامیک تاشدن نوسانی روبان سیال هنگام افتادن بر روی سطح انجام شده است [۲۶ – ۲۳]. در این حالت روبان سیال و شکسان هنگام فرو افتادن بر روی سطح ابتدا به شکل جریانی ایستا روی سطح فرو می‌آید سپس با افزایش ارتفاع و رسیدن به ارتفاع آستانه شروع به تاشدن می‌کند و روی خود تا می‌شود. با افزایش ارتفاع دینامیک خم شدن نیز تغییر می‌کند. در این حالت تاهای سیال می‌تواند هوا را داخل خود به دام انداخته و ایجاد حباب کند.

در سال ۲۰۰۸ پولینی^{۲۵} و چسند-موتن^{۲۶} کاری را درباره‌ی حباب‌های ایجاد شده در اثر تاشدن نوسانی روبان سیال ارایه کردند [۱۹]. در این کار از روغن سیلیکون با و شکسانی $\eta = 10^6 P$ و چگالی $\rho = 0.93 \text{ g cm}^{-3}$ و کشش سطحی $\gamma = 21 \text{ dyn cm}^{-1}$ استفاده کردند. شکاف مورد استفاده‌ی آن‌ها نیز شکاف خطی با ابعاد $2/2 \text{ cm} \times 2/2$ بود. در چیدمان آزمایشگاهی همان‌طور که در شکل (۵-۱-a) آمده است روغن سیلیکون از شکاف S با طی ارتفاع H داخل مخزنی از روغن سیلیکون مشابه می‌افتد. در این جا روغن با استفاده از پیچ ارشمیدسی A به مخزن بالایی C بازگردانده می‌شود.

^{۲۵} B. Pouligny

^{۲۶} M. Chassande-Mottin