

الله أكبر



دانشکده فنی و مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته تبدیل انرژی

عنوان

بررسی رفتار تک حباب صعودی در داخل میدان الکتریکی

ولتاژ بالا

استاد راهنما:

دکتر اسماعیل اسماعیل زاده

استاد مشاور:

دکتر سید محمد سید محمودی

پژوهشگر:

علی اصغر فرتاش

۱۳۸۸ / ۵ / ۱۲

کتابخانه تخصصی مهندسی گیلان
تسبیح مرکز

تیر ۱۳۸۸

۱۱۶۱۸۶

بنام هستی، بخش بی همتا

با تقدیر و تشکر از استاد عزیز و گرانقدرم آقای دکتر اسماعیل اسماعیل زاده و با تقدیریم به حضور پرر و مادر عزیز و

مهربانم که در تمام مراحل مشوق و راهنمای زندگی ام بودند.

همچنین با تشکر و سپاس فراوان از همسر عزیز و با وفاییم و خانواده محترم عزیزم که مراد رسیدن به این مرحله یاری

نمودند.

و تشکر از کلیه عزیزانی که مرایاری نمودند.

با سپاس و تقدیر احترام

نام خانوادگی دانشجو: فرتاش

نام: علی اصغر

عنوان پایان نامه: مطالعه تجربی هیدرودینامیک حرکت حباب داخل مایع ساکن در حضور میدان الکتریکی با ولتاژ بالا

استاد راهنما: دکتر اسماعیل اسماعیل زاده

استاد مشاور: دکتر سید محمد سید محمودی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مکانیک گرایش: تبدیل انرژی

دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی مکانیک تاریخ فارغ التحصیلی: تیر ۱۳۸۸

تعداد صفحه: ۷۸

چکیده:

در کار تجربی حاضر مطالعه نوع خاصی از جریان های حبابی که در بسیاری از صنایع شیمیایی و غذایی و نیروگاه های حرارتی با آنها روبرو هستیم مورد مطالعه قرار گرفته و تاثیر میدان الکتریکی یکنواخت و غیر یکنواخت در رفتار این نوع جریان از قبیل فرکانس جدایش ، انحراف حباب از مسیر عمودی حرکت و فروپاشش حباب مورد بررسی قرار می گیرد . در این نوع جریان فاز مایع ساکن بوده و تک حباب ایجاد شده در روزنه به صورت عمودی در آن به حرکت در می آید . برای این منظور هوا از طریق روزنه های 0.5 ، 1 ، 1.5 و 2 میلیمتری به داخل محفظه به ارتفاع 40 سانتیمتری که حاوی مایع کروزمین است وارد می شود. حباب های ایجاد شده در قطر های مختلفی می باشند . به منظور تعیین رفتار حباب در این کار از روش پردازش تصویری استفاده شده است . اطلاعات بدست آمده از دوربین فیلم برداری به سیستم رایانه ای منتقل و با پردازش تصویری این اطلاعات با دقت یک صدم ثانیه نتایج مورد نظر بدست می آید . تاثیر میدان به صورت مؤلفه های نیروی افقی و عمودی در فاصله عمودی بین دو الکتروود رخ خواهد داد . در این کار پارامترهایی از رفتار حباب در میدان الکتریکی که در کارهای انجام شده تا به حال به آن پرداخته نشده است مورد بررسی قرار می گیرد .

فهرست علائم

علامت	توصیف	واحد
d_b	قطر حباب	mm
d_e	قطر معادل حباب	mm
D_o	قطر روزنه یا شیپوره	mm
ρ_l	چگالی مایع	Kg/m^3
ρ_g	چگالی گاز	Kg/m^3
σ	کشش سطحی	N/m
v_o	سرعت متوسط گاز در روزنه	m/s
u_b	سرعت صعود حباب	m/s
v_∞	سرعت حد صعود	m/s
μ_l	لزجت مایع	Kg/m.s
μ_g	لزجت گاز	Kg/m.s
V_F	حجم نهایی حباب	m^3
V_E	حجم تولید شده در مرحله انبساط	m^3
Q	آهنگ حجمی گاز	m^3/s
τ_f	مدت زمان شکسته شدن گردن حباب	s
re	شعاع انحنای نوک حباب	mm
M	عدد مورتون	$M = \frac{\mu_c^2 g \Delta \rho}{\rho^2 \sigma^3}$
Eo	عدد اتوئوس	$E_o = \frac{g \Delta \rho d_p}{\sigma}$
Re	عدد رینولدز	$E_o = \frac{g \Delta \rho d_p}{\sigma}$
Bo_E	عدد بیوی الکتریکی	$Bo_E = \frac{(\epsilon_l - \epsilon_v) E_0^2 R_0}{\sigma}$

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول
۱	۱-۱) مقدمه.....
۵	۲-۱) اهمیت پرداختن به موضوع.....
۶	۳-۱) مروری بر تحقیقات انجام شده.....
	فصل دوم
۴۱	۱-۲) معادلات حاکم.....
۵۱	۲-۲) مواد و روش ها.....
	فصل سوم
۵۹	بحث و نتیجه گیری.....
۷۵	منابع و مراجع.....

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

مباحث مربوط به سیالات تقریباً در تمام رشته‌ها و فرآیندها بخصوص صنعت، آبیاری، کشتیرانی، هوانوردی، هوافضا و نظیر اینها به چشم می‌خورد. این رشته از همان زمان اولیه پیدایش در حال پیشرفت و تکامل بوده و روز به روز بر روند صعودی پیشرفتش افزوده می‌شود. بخصوص با ظهور قوانین ناویه استوکس، تحول عمیق در زمینه سیالات و رشته‌های مربوط به آن به وقوع پیوست. از طرفی در اکثر فرآیندهای طبیعی و غیر طبیعی با جریان‌های دوفازی و سه‌فازی روبرو می‌شویم و همین امر اهمیت پرداختن به آنها را بیشتر می‌کند. به خصوص جریان‌های دو فازی مایع و گاز که در صنعت به وفور یافت می‌شود، توجه پژوهشگران به این جریان‌ها را بیشتر کرده است. برای مثال در فرآیندهایی که جوشش و چگالش در آنها اتفاق می‌افتد و در خطوط انتقال نفت یا گاز که به نحوی جریان‌های دوفازی در آنها ایجاد می‌شود، بررسی و کنترل آنها اهمیت زیادی پیدا می‌کند. انواع دیگر جریان‌های دو فازی و سه‌فازی به وفور در صنعت یافت می‌شوند. برای مثال در فرآیند استخراج نفت با جریان سه‌فازی گاز، مایع و جامد روبرو هستیم. بدیهی است کار بر روی روش‌هایی برای کنترل این نوع جریان‌ها و بهبود عملکرد سیستم‌هایی که این نوع جریان‌ها در آنها حکم فرماست مهم و قابل توجه خواهد بود. در این رابطه کارهای زیادی انجام شده و در حال انجام شدن است. روش‌های پیشرفته وجود دارد که توسط آنها رژیم‌های جریان دو فازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. برای مثال در جریان‌های گاز داخل مایع با استفاده از روش‌هایی چون تاثیر میدان مغناطیسی و یا میدان الکتریکی ولتاژ بالا، می‌توان روند تشکیل و رفتار این نوع جریان‌ها را تحت کنترل در آورده و یا موجبات بهبود سیستم را فراهم کرد. در این بین استفاده از میدان الکتریکی به دلیل هزینه کم بیشتر مورد توجه قرار گرفته و کارهایی در این زمینه انجام شده و در حال انجام است.

کارهای اولیه صورت گرفته در این زمینه ابتدا به صورت تجربی بودند که بعدها با استفاده از رایانه

کارهای عددی نیز در این زمینه انجام شد. کارهای تجربی و عددی زیادی در مورد الگوهای جریانهای دوفازی و رفتار این نوع جریانها انجام شده است. به دلیل پیچیدگیهای زیاد این جریانها کارهای عددی معمولاً با ساده سازیهای زیادی همراه است. در مواردی نظیر دیگها، اواپراتورها، برجهای تقطیر، توربین ها، صنایع شیمیایی، نیروگاههای هسته ای، صنایع غذایی، کاغذ سازی و جریان های دوفازی نقش مهمی ایفا می کنند.

با پیشرفت علوم و فن آوری نیاز به طراحی سیستم های جدید و بهینه سازی سیستم های قدیمی بیشتر می شود و یافتن روش های جدید برای بهینه سازی کارایی سیستمها اهمیت بیشتری پیدا می کند. در بویلرها و کندانسورها بدست آوردن پارامترهای موثر در کار آنها و بهینه سازی کار آنها مهم می نماید. در این میان استفاده از روش های پیشرفته برای کنترل پارامترهای مذکور می تواند مفید واقع شود. با ترکیب میدان های صوتی یا الکتریکی با میدان حرکت سیال و بدست آوردن ارتباط بین آنها می توان تغییرات عمده ای در کارکرد سیستم ایجاد کرد.

جریان های دوفازی ماهیت های مختلفی دارند و الگوهای متنوعی از آنها را می توانیم مشاهده کنیم که در فصل اول به آنها اشاره می شود. از بین انواع مختلف الگوهای جریان، جریان های حبابی اهمیت ویژه ای داشته و نقش مهمی را در صنایع ایفا می کنند. افزایش میزان اکسیژن آبریان، افزایش میزان آمیختگی در داخل سیال، ارتقاء آهنگ انتقال گرما، جرم و واکنشهای شیمیایی و موارد بیشمار دیگر را می توان از این الگوها انتظار داشت. در کار حاضر شکل خاصی از جریان های حبابی که در آن فاز مایع ساکن بوده و فاز حباب در داخل آن در حال حرکت صعودی است مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای موثر در کارکرد این سیستمها مورد بررسی قرار گرفته است. جنس سیال و حباب درون آن می تواند یکسان (مانند سیال و بخار آن) یا غیر یکسان (مانند آب و هوا) باشد. برای مثال در فرایند انتقال سیال در لوله با افزودن آهنگ انتقال گرمایی به لوله تغییر فاز ایجاد می شود و حباب های بخار در فاز مایع ایجاد می شوند. یا در فرایندهایی با کاهش فشار موضعی در جریان داخل مایع پدیده حباب زایی را در

سیال ایجاد می کنند. یا با تزریق هوا به سیال مایع، حباب های هوا در داخل سیال ایجاد می شود. در لوله های گرمایی بویلرها، حباب های تشکیل شده بسته به نرخ گرمای اعمالی به لوله و افزایش نرخ تولید بخار الگوهای متنوعی را ایجاد می کنند. در کار حاضر رفتار تک حباب صعودی در داخل سیال ساکن مورد بررسی قرار می گیرد و تاثیر میدان الکتریکی یکنواخت و غیر یکنواخت در کارکرد سیستم مورد ارزیابی قرار می گیرد. کارهای انجام شده در این زمینه به خاطر رفتار پیچیده و غیر قابل پیش بینی حباب ها و فصل مشترک ناپایدار آن در داخل مایع کمتر با کارهای مشابه موجود در ادبیات فن قابل مقایسه می باشند. و هر کدام شرایط مرزی و اولیه خاص خود را دارد. بررسی تاثیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی به اواخر قرن بیستم بر می گردد. در کار حاضر فرکانس جدایش حباب، سرعت حرکت یک حباب صعودی در حالت بدون اعمال میدان الکتریکی و میزان انحراف آن از حالت اولیه، تغییر سرعت حرکت حباب، فرکانس حباب های تولیدی و فروپاشی حباب به حبابهای کوچکتر در حضور میدان الکتریکی مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور بررسی قطر حباب از روزه های با قطرهای ۰/۵، ۱، ۱/۵ میلی متر استفاده شده است. برای بررسی میزان ولتاژ اعمالی بر روی رفتار حباب از منبع DC ولتاژ متغیر استفاده می شود که ولتاژ آن از ۰ تا ۴۰ کیلو ولت تغییر می کند. به منظور بررسی تاثیر فاصله الکترودها از هم بر رفتار حباب نیز، تغییر موقعیت این الکترودها امکان پذیر شده است.

برای اعمال ولتاژ الکتریکی به سیال و تاثیر آن روی حباب ها باید از سیال هایی استفاده شود که عایق به جریان الکتریکی یا دی الکتریک باشند. تا میدان بتواند روی آن تاثیر گذار باشد. دو سیال کروزین و روغن ترانسفورمر مایعات دی الکتریک مناسبی برای این کار می باشند و در کار حاضر از آنها استفاده شد. خواص مایعات بکار رفته در جدول ۱-۱ آورده شده است. تحلیل انجام شده با تکیه به نتایج بدست آمده با روش پردازش تصویری انجام شده است. برای مطالعه تجربی سکوی آزمایش طراحی و ساخته شد. مایعات مختلف به عنوان سیال ساکن انتخاب و عمل تزریق حباب به محفظه انجام شد. با

استفاده از پروژکتورها منطقه مطالعه آن برای فیلم برداری آماده گردید. با استفاده از دوربین فیلم برداری با دقت ۱۰۰۰ فریم در ثانیه کار فیلمبرداری انجام و با ذخیره اطلاعات در سیستم رایانه ای موجود در آزمایشگاه پردازش تصویری روی اطلاعات بدست آمده انجام شد. همچنین به منظور بررسی شکل حباب از یک دوربین عکاسی استفاده شد.

در ارائه کار حاضر ابتدا مبانی نظری جریان دو فازی، کلیات جریان حبابی و جریانهای حبابی در حضور میدان الکتریکی و مطالعات و کارهای که قبلا توسط سایر محققین انجام شده است پرداخته می شود. فصل دوم به نحوه انجام کار تجربی و معادلات حاکم بر اینگونه جریانها می پردازد. فصل سوم به بررسی نتایج بدست آمده و بحث و نتیجه گیری در مورد آنها پرداخته است.

جدول ۱-۱ خواص مایع های مورد استفاده در این کار

گذر دهی الکتریکی	لزجت	چگالی	خاصیت
S/m	Kg/m.s	Kg/m ³	ماده
۰/۰۰۰۱۶	۲/۲	۸۰۵	کروزین

۱-۲) اهمیت پرداختن به موضوع

کنترل جریان های دو فازی در فرآیندهای مختلف صنعتی به نحوی که بتوانیم بهترین عملکرد را از سیستم های وابسته داشته باشیم می تواند انگیزه قوی تحقیقاتی برای رسیدن به سیستم هایی با بهترین عملکرد و بالاترین راندمان مفید باشد. روشهایی وجود دارد که با آن روشها می توان عملکرد این سیستم ها را کنترل کرد. یکی از این روشها استفاده از میدان الکتریکی برای کنترل رفتار هیدرودینامیک حباب می باشد. برای این منظور مطالعات زیادی در زمینه تاثیر میدان در تغییر شکل حباب صورت گرفته است و نتایج نشان دهنده تاثیر قابل توجه میدان الکتریکی بر رفتار حباب دارد. در کار حاضر سعی شده پارامترهایی که در کارهای دیگر کمتر به آنها پرداخته شده مورد توجه قرار گیرد. تاثیر ولتاژ اعمالی، تاثیر چیدمان های مختلف الکترودها در رفتار هیدرودینامیک حباب، فرکانس و سرعت جدایش حباب در این کار مورد توجه قرار گرفته است.

با اعمال میدان الکتریکی و بکار بردن آن در جهتی که بر روی میدان سیال تاثیر داشته باشد می توان الگوی حرکت تک حباب داخل مایع را تغییر داد و به نتایج مورد نظر رسید. بر اساس نتایج این کار این میدان در جریهای تک حبابی می تواند به صورتهای زیر اعمال شود.

الف) اگر میدان الکتریکی طوری اعمال شود که جهت خطوط میدان در راستا و هم جهت با جهت حرکت حباب باشد، موجب افزایش سرعت حرکت حباب، افزایش فرکانس جدایش حبابها و تغییر شکل حباب به صورت کشیدگی در جهت اعمال میدان شود.

ب) اگر راستای اعمال میدان در راستای حرکت حباب و جهت آن عکس جهت حرکت حباب باشد موجب کاهش سرعت حرکت حباب، کاهش فرکانس جدایش حبابها و تغییر شکل حباب به صورت اعوجاج در راستای عمود بر حرکت حباب شود.

ج) اگر میدان الکتریکی در راستای عمود بر حرکت حباب بر آن اعمال شود موجب تغییر شکل حباب و

حرکت و انحراف حباب در راستای عمود بر حرکت حباب می شود

د) اگر میدان الکتریکی به صورت غیر یکنواخت به آن اعمال شود هر دو مولفه افقی و عمودی میدان را خواهیم داشت و نتیجه آن افزایش فرکانس جدایش حباب، افزایش سرعت صعودی حباب، کاهش قطر حبابهای رها شده، انحراف حبابها در راستای مولفه افقی و تغییر شکل حباب می شود در پروژه حاضر هر دو نوع میدان یکنواخت و غیر یکنواخت بر میدان حرکت حباب اعمال می شوند تا تاثیر هر یک مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۳ مروری بر تحقیقات انجام شده :

دینامیک حباب و تاثیر متقابل حباب ها بر روی هم توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است . نرخ تولید حباب، موقعیت و فرکانس تشکیل، نحوه رشد، به هم آمیختگی و فرو پاشش حباب ها از هم همگی بر روی نرخ انتقال جرم و حرارت و واکنشهای شیمیایی تاثیر می گذارند. مطالعه و بررسی حباب های صعودی در سیال های مایع از دیر باز مورد توجه محققین قرار گرفته است. متغیر های مختلفی بر هیدرودینامیک نحوه حرکت حباب ها تأثیر می گذارد، بنابراین میدان برای مطالعه آنها بسیار گسترده می باشد. گاه مشاهده شده کار بر روی بحث مشابه از دیدگاههای مختلف صورت گرفته است و بدین ترتیب در هر مرحله دریچه ای جدیدی به دنیای پیچیده این علم گشوده می شود. مواردی وجود دارد که هنوز برای محققین حل نشده باقی مانده اند و به صورت یک معما درآمده اند. به عنوان نمونه، نحوه اعوجاج فصل مشترک حباب های اندازه متوسط و بزرگ پیچیده هستند که S.Fan و [7] K.Tsuchiya به این موضوع اشاره کرده اند. متأسفانه، مطالعه رد جریان این حباب ها نیز یک موضوع پیچیده است و مدل مناسبی برای بررسی رفتار جریان در این منطقه ارائه نشده است.

بررسی رفتارهای پیچیده حباب در بسیاری از فرآیندها جهت افزایش راندمان سیستم های مربوطه مفید خواهد بود. به عنوان مثال مشاهده شده است که نرخ انتقال حرارت زیاد در فرآیند جوشش در اثر

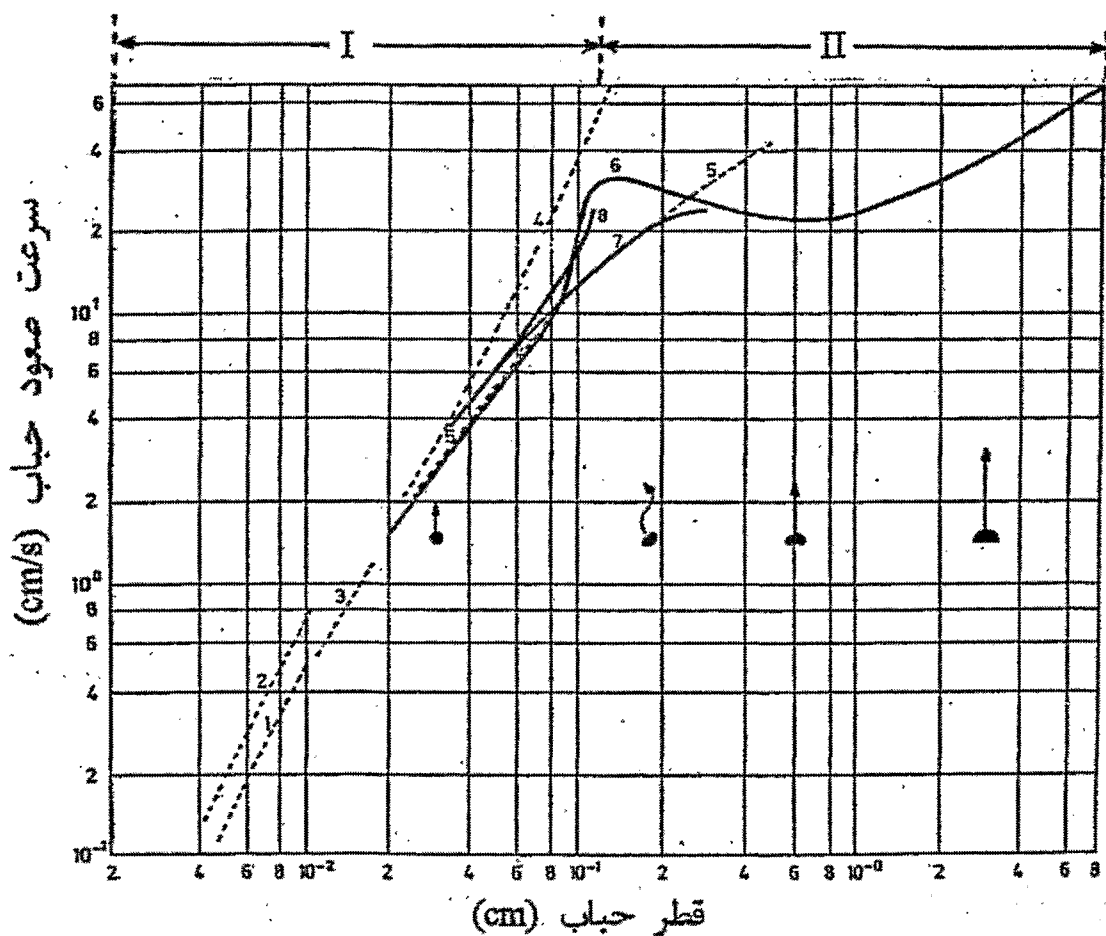
تشکیل شدن تعداد حبابهای بیشتر می تواند بوجود آید. همچنین مشاهده شده که در اثر ترکیب حبابها میزان انتقال حرارت افزایش می یابد. بر اساس کار Mikic and Rohsenow [18] زمانیکه حباب ها سطح دیوار گرم شده را ترک می کنند، مقداری از سطح لایه مایع فوق اشباع نزدیک سطح گرم شده را در اثر تاثیر حلقه های گردابی تشکیل شده در دنباله خود، با خود جابجا می کنند. این فعل و انفعالات بر اساس تئوری Han and Griffith [18] قابل بیان است. یا بر اساس کار Estelle Iacona [18] از فرآیند جوشش می توان در خنک کاری قطعات الکتریکی استفاده کرد. با کنترل فرآیند جوشش می توان به ضریب انتقال حرارت بزرگتر یا اندازه قطعات کوچکتر با همان انتقال حرارت دست یافت. به همراه جابجایی حرارتی اجباری استفاده از صوت و میدان الکتریکی می توان به عنوان روشهایی فعال برای کنترل رفتار حباب ها مورد بررسی قرار گیرند. با استفاده از میدان الکتریکی در اثر اختلاف گذردهی الکتریکی بین داخل و خارج حباب می توان نیرو در آن اعمال کرد.

در مورد جریان حبابی کارهای متنوعی توسط پژوهشگرانی نظیر Walls [3] Haberman و Morton [4] صورت گرفته است. در این فصل کارهای نزدیک به پروژه حاضر که قبلاً انجام گرفته اند و ارتباط مستقیم با این پروژه دارند، مورد مطالعه قرار می گیرند.

وابستگی سرعت حد صعود برای یک حباب منفرد به خواص سیال توسط Peeble و Garber

[8] و Haberman و Morton [9] به صورت تجربی بررسی شده است.

دو محقق اخیر ارتباط سرعت صعودی به حجم و شعاع معادل حباب های هوا را در داخل آب خالص بصورت نمودار بدست آورده اند. این مطالعه از معدود مطالعاتی است که در آن زمان توسط آنها انجام گرفته بود. به دنبال اینها، Stokes، Hadamard، Oseen [6] در زمینه تئوری و Rosenberg و Gorodetzkaia [6] در زمینه تجربی نمودارهای قطر معادل و سرعت صعود را برای حباب های مختلف بدست آوردند. مقایسه نتایج آنها در نمودار شکل ۱-۱ آمده است.



شکل ۱-۱ رابطه بین قطر معادل حباب و سرعت صعود [6]

چون اثرات کشش سطحی در حباب های کوچک ($d_e < 1 \text{ mm}$) چشمگیر است. شکل این

حباب ها بصورت کره درمی آیند و روش حل استوکس نتایج قابل قبولی ارائه می دهد. رابطه ای که

برای محاسبه سرعت حد این حباب ها بدست آمده است ، بصورت زیر می باشد [3]

$$v_{\infty} = \frac{1}{18} \frac{d_e^2 g (\rho_l - \rho_g)}{\mu_l} \quad (1-1)$$

رابطه فوق برای اجسام صلب کروی نیز معتبر است و در مورد حباب نیز فرض می شود که سرعت مایع در سطح حباب به سمت صفر میل می کند (اصل عدم لغزش).
 برای حباب های گاز که در مایعی با لزجت μ_l حرکت می کنند و سطحی کاملاً غیر صلب دارند ، Rybezynski & Hadmard معادله زیر را پیشنهاد کرده اند : (مراجعه شود به مرجع [10])

$$v_{\infty} = \frac{de^2 g(\rho_l - \rho_g)}{18\mu_l} \frac{3\mu_g + 3\mu_l}{3\mu_g + 2\mu_l} \quad (2-1)$$

و اگر $\mu_l \gg \mu_g$ باشد ، معادله فوق به معادله زیر کاهش می یابد:

$$v_{\infty} = \frac{de^2 g(\rho_l - \rho_g)}{12\mu_l} \quad (3-1)$$

با یک مقایسه ساده بین معادلات (1-1) و (3-1) مشاهده می کنیم که شکل معادلات به غیر از ضرایب با هم یکی هستند. این تفاوت نشان می دهد که تحت شرایط مختلف و با روش های متفاوت این معادلات بدست آمده اند ، به طوری که هر یک در آن شرایط مربوط به خود جواب بهتر و دقیقتری را ارائه می دهند. اگر ناخالصی هایی که تمایل به جمع شدن فصل مشترک حباب با سیال دارند در نظر گرفته شوند، مقاومت خاص به تنش برشی اعمال می کنند ، وجود نداشته باشند ، در آن صورت می توان از معادله 3-1 استفاده کرد . ولی در اکثر موارد عملی مقداری ناخالصی وجود دارد ، پیش بینی می شود سرعت صعود حباب بین مقادیر بدست آمده از معادلات 1-2 و 3-1 قرار دارد. وقتی که اندازه حباب بزرگ می شود ، اثرات کشش سطحی و لزجت ناچیز می شوند و بر این اساس Taylor و Davies [11] معادله ای برای محاسبه سرعت صعود به صورت زیر ارائه کرده اند :

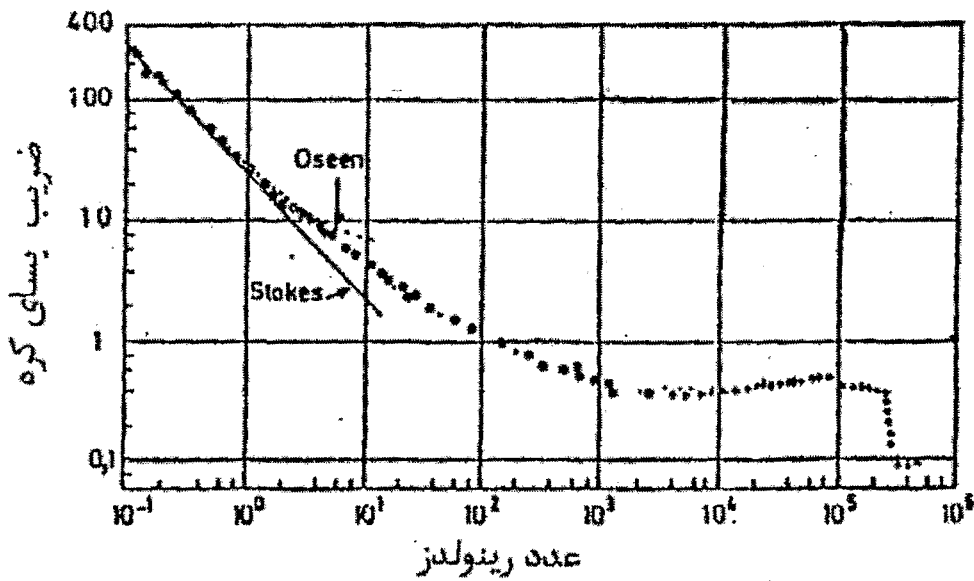
$$v_{\infty} = \frac{2}{3} \sqrt{gR}$$

(۴-۱)

که در آن R شعاع انحنای نوک حباب است.

برای حباب های متوسط اثرات لختی مایع ، کشش سطحی ، لزجت و پاکیزه بودن مایع همگی مهم هستند . [6] Comolet در مقاله خود نمودار شکل ۱-۱ را به دو ناحیه متفاوت تقسیم کرده است. این دو ناحیه با نمادهای I و II گروهی شکل مشخص شده اند.

ناحیه I به منطقه لزج معروف است. در این ناحیه شکل حباب به دلیل کوچک بودن قطر آن کروی بوده و ضریب پسای آن از نمودار کلاسیک $Re-C_D$ برای کره به دست می آید. بنابراین عدد رینولدز در این ناحیه اهمیت زیادی پیدا می کند. شکل ۲-۱ نمودار کلاسیک ضریب پسای کره بر حسب عدد رینولدز را نشان می دهد.



شکل ۲-۱ نمودار ضریب پسای کره بر حسب عدد رینولدز [۶]

Comolet پیشنهاد کرده است که در این ناحیه برای سرعت حد صعود رابطه زیر به کار برده شود:

$$v_{\infty} = \frac{g}{18\nu} de^2$$

(۵-۱)

که در آن V لزجت سینماتیکی مایع بوده و d_e قطر معادل حباب کروی است.

البته موارد فوق موقعی صحیح است که فصل مشترک حباب کروی را صلب فرض کنیم. برای

حالتی که فصل مشترک تغییر پذیر است، مقدار ضریب پسا متفاوت از مقدار $24/Re$ خواهد بود. برای

این حالت فرمول دیگری به صورت زیر ارائه شده است [2]:

$$C_D = \frac{24}{Re} \times \frac{\frac{2}{3} + \frac{\mu_g}{\mu_l}}{1 + \frac{\mu_g}{\mu_l}} \quad (6-1)$$

که در آن μ_l و μ_g به ترتیب لزجت فاز گاز و مایع می باشند. در حالتی که $\mu_l \gg \mu_g$ باشد، رابطه

فوق به شکل زیر درمی آید:

$$C_D = \frac{16}{Re} \quad (7-1)$$

در ناحیه II که به محدوده لاپلاس مشهور است، کشش سطحی مهم بوده و شکل حباب کروی

نیست. با افزایش قطر، شکل حباب به تدریج از حالت بیضوی پهن به شکل کلاهک کروی تبدیل می

شود. در این محدوده سرعت صعود حباب با لزجت سیال محیط ارتباط زیاد ندارد و بیشتر به کشش

سطحی فصل مشترک آن بستگی دارد. چون در این محدوده نمی توان شکل مشخصی برای حباب ها

پیش بینی کرد، لذا مطالعه C_D چندان اهمیت ندارد (البته بعد از Comolet این موضوع نیز بیشتر

مورد بررسی قرار گرفته است). برای بیان سرعت حد، رابطه ای به صورت زیر معرفی کرده است:

$$v_{\infty} = (0.52gde + 2.14 \frac{\sigma}{\rho_l de})^{\frac{1}{2}} \quad (8-1)$$

در نمودار شکل ۱-۱ در فصل مشترک دو ناحیه I و II (یعنی در ناحیه $de = 1 \text{ mm}$) دارای سرعت بیشینه است که این منحنی از بررسی های تجربی به دست آمده است. بعد از این نقطه، با افزایش قطر، مقدار سرعت کاهش یافته و بعد از $d_e = 1 \text{ cm}$ دوباره منحنی سیر صعودی به خود می گیرد. Harper [2] بین مایعات با اعداد مورتون بالا تمایز قائل می شود. در مایعات M بالا، C_D به طور یکنواخت با Re کاهش می یابد در حالی که در مایعات M پایین منحنی $C_D - Re$ دارای نقطه کمینه است. در کار او M بالا در نظر گرفته شده است.

Weber و Bhaga [13]

شکل و سرعت حد حباب های صعودی در مایعات لزج را مورد مطالعه قرار داده اند. میدان جریان در اطراف یک حباب صعودی توسط فن آوری حباب ردیاب هیدروژن تصویر برداری شده است. خطوط جریان را به وسیله یک دوربین فیلمبرداری که با سرعت حباب بالا می رود و حباب های ردیاب H_2 را فیلمبرداری می کند، به دست آمده اند. نتایج آنها برای $Re < 150$ و $7.4 \times 10^{-4} < M < 850$ ارائه شده اند.

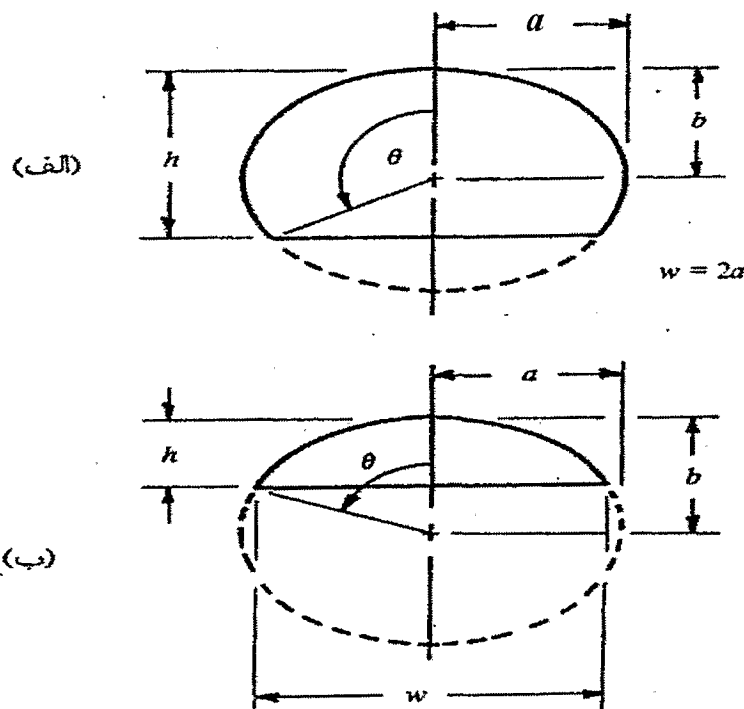
آنها در آزمایشات خود از محلول شکر به عنوان سیال مایع استفاده کردند. برای بررسی وضعیت حباب ها از تصاویر فیلمبرداری شده با تمرکز به جدا کردن فریم های نزدیک به هم به نتایج رسیده اند. شکل های حباب ها را توسط قطعات بیضوی یا کروی تقریب زده اند. آنها از لزجت های 0.28 تا 0.82 پواز استفاده کردند که در این بازه چگالی بین 1314 تا 1390 کیلوگرم بر متر مکعب و کشش سطحی بین 0.7690 تا 0.8 نیوتن بر متر تغییر می کند.

شکل حباب

در شکل ۱-۳ شکل هندسی دو نوع حباب رسم و پارامترهای مربوطه تعریف شده اند.

در شکل ۱-۳ الف حباب کلاهک بیضوی با زاویه گشادگی $90^\circ < \theta$ و در شکل ۱-۳ ب حباب کلاهک کروی با زاویه گشادگی $90^\circ > \theta$ نشان داده شده است.

h/w را نسبت شکل، b/a را نسبت محور، h/d را ارتفاع بی بعد و نسبت w/de را پهنای بی بعد می نامند. برای مایعات M بالا، پارامترهای فوق تنها تابعی از عدد رینولدز هستند ولی برای مایعات با لزجت پایین، شکل حباب تابعی از اعداد رینولدز و مورتون می باشد.



شکل ۱-۳ تعریف پارامترهای شکل حباب [۱۳]

وقتی که اندازه حباب افزایش می یابد، حجم ناحیه رد جریان نیز افزایش خواهد یافت. به نظر می