۱-۱ پدیده کاویتاسیون

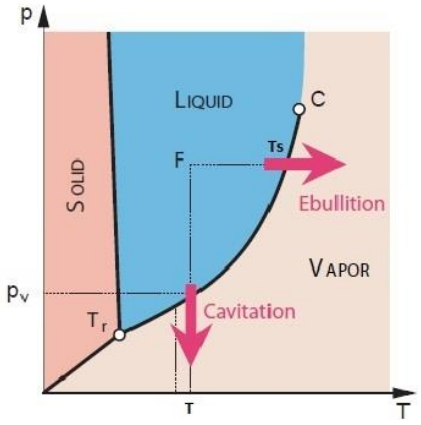
شکل‌گیری حباب‌های بخار یا گاز در داخل مایع کاویتاسیون نامیده می‌شود. کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که فشار استاتیکی یک نقطه از مایع به کمتر از فشار بخار مایع مورد نظر در دمای مایع برسد. در سیستم‌های مهندسی مختلف از جمله سیستم‌های هیدرولیک، هوا فضا و توربوماشین‌ها با پدیده کاویتاسیون سر وکار داریم. در طراحی‌های مدرن و پیشرفته توربوماشین‌ها باید یک مصالحه بین سرعت چرخش بالا و خطر وقوع کاویتاسیون برقرار گردد. توسعه کاویتاسیون می‌تواند منشاء اثرات نامطلوبی از جمله سر و صدا، ارتعاشات، تغییر عملکرد، فرسایش و صدمات ساختاری باشد. در دهه‌های اخیر به دلیل شناخت مزایای کاویتاسیون با رویکرد بهره‌برداری و استفاده از این مزایا به مطالعه کاویتاسیون پرداخته می‌شود.

کاویتاسیون در جریان‌های مایع، یک جریان دو فاز منحصر به فرد که با تبخیر و میعان در اثر تغییر فشار و بدون هیچ‌گونه گرمایشی، همراه است. این مسئله را می‌توان مانند گسیختگی مایع در اثر تنش‌های مفرط تعبیر کرد.

با توجه به دیاگرام فاز (شکل۱-۱) تفاوت جوشش و کاویتاسیون مشخص می‌گردد [۱].

۱- مایع در دمای ثابت در نتیجه کاهش فشار، فشار آن (p) به زیر فشار بخار مایع (p_v) در آن دما می‌رسد. $\Delta p = p_v - p$ را به عنوان کشش شناخته و مقداری را که در آن گسیختگی رخ می‌دهد مقاومت کششی می‌نامند. این فرآیند گسیخته شدن که با کاهش فشار در دمای ثابت روی می‌دهد، کاویتاسیون نامیده می‌شود.

۲- مایع در فشار ثابت تحت افزایش دما قرار می‌گیرد که در نتیجه آن دمای مایع (T) به بالاتر از دمای اشباع مایع (T_s) در آن فشار می‌رسد. مقدار ($\Delta T = T - T_s$) را به عنوان اختلاف دمای سوپرهیت شناخته می‌شود. به فرآیند فشار ثابت گسیخته شدن در اثر افزایش دما جوشش گفته می‌شود.



شکل (۱-۱): دیاگرام فاز و منحنی تغییر فاز [۲]

توجه به این نکته ضروری است که فرآیند ترمودینامیکی تولید بخار در دو حالت فوق متفاوت است. با این وجود فرآیند کاویتاسیون کاملاً دما ثابت نیست، اما معمولاً از اثرات ترمودینامیکی برای مایعات با خصوصیات مشابه آب صرفنظر می‌گردد.

۱-۲ اثرات دمایی

در حالت اشباع دما و فشار متناظر با یکدیگر ثابت باقی می‌مانند. به عبارت دیگر به ازای هر فشار اشباع تنها یک دمای اشباع وجود دارد. از طرفی فشار بخار اشباع از پارامترهای تاثیرگذار در مدل‌سازی کاویتاسیون است. بنابراین تاثیرات دما بر تبدیل فازها به یکدیگر مشخص است. از جمله پارامترهای موثر بر تغییرات دما می‌توان به گرمای نهان تبخیر و گرمای نهان میعان اشاره کرد. با توجه به اینکه مقدار گرمای نهان حاصل از تغییر فاز ناچیز است، و هیچ منبع حرارتی دیگری در جریان‌های کاویتاسیون وجود ندارد، جریان‌های کاویتاسیون را با

دقت قابل ملاحظه‌ای می‌توان دما ثابت در نظر گرفت. به این ترتیب دیگر نیازی به حل معادله انرژی در کنار سایر معادلات نیست. اما دربعضی روش‌ها نظیر مدل‌هایی که بر معادله حالت استوار است، حل معادله انرژی برای به دست آوردن توزیع دما لازم است.

۱-۳ هسته‌های کاویتاسیون

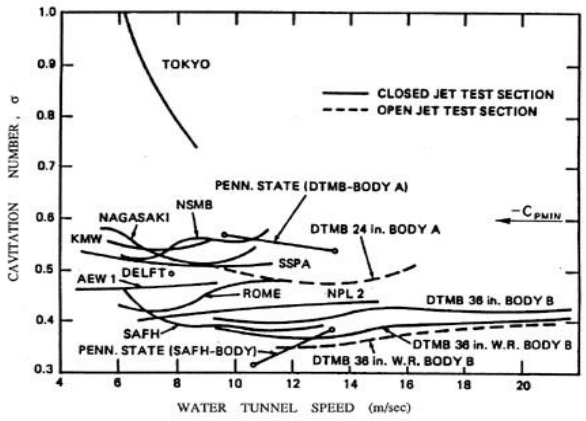
برای جریان‌های مایع که در صنایع و طبیعت وجود دارند همواره نقاطی وجود دارد که پیوستگی مایع از بین رفته و موجب سست شدن مایع در برخی نقاط می‌شود. این نقاط عموما به علت وجود گازهای نامحلول و بخار ایجاد شده یا وجود ذرات معلق در مایع می‌باشد. این نقاط که نهایتا موجب گسیختگی مایع می‌شود به عنوان هسته‌های کاویتاسیون شناخته شده است. آزمایشات متعدد نشان داده است که این هسته‌ها همواره وجود دارند و اندازه آن‌ها در مرتبه میکرومتر می‌باشد و به علت کشش سطحی شکل آن‌ها کروی است. هسته‌ها ممکن است در درون مایع معلق باشند که به هسته‌های همگن معروف هستند. در کاربردهای مهندسی عمده گسیختگی در مرز بین مایع و دیوار جامد یا بر روی ذرات معلق در مایع صورت می‌گیرد که در این صورت هسته غیر همگن تشکیل می‌گردد. ترک‌های میکروسکوپی در دیوارها از نقاط بارزی هستند که گاز در آنجا حبس می‌شود. کاهش فشار در نزدیکی این ترک‌ها موجب نفوذ گاز به درون مایع شده و هسته‌های کاویتاسیونی[1] شکل می‌گیرد [۳].

۱-٤ شروع کاویتاسیون

با کاهش فشار موضعی مایع، کمترین مقدار فشار استاتیکی، $p_{\min}$، به یک حالت بحرانی می‌رسد که در این حالت شعاع هسته‌های کاویتاسیون با سرعت بالا افزایش پیدا می‌کنند به طوریکه اندازه آن‌ها از مرتبه میکرومتر

[1] *Cavitation Nuclei*

به مرتبه میلی‌متر می‌رسد و با چشم غیر مسلح نیز قابل رویت است. در این حالت گفته می‌شود که کاویتاسیون آغاز شده است. رسیدن هسته‌های کاویتاسیون به شرایط بحرانی به عوامل مهمی مانند خواص ترمودینامیکی مایع و تداوم اثر فشار خارجی بستگی دارد. در جریان لزج مقدار $p_{\min}$ تابعی از عدد رینولدز نیز می‌باشد. به عنوان مثال در حالت کلی فشار استاتیکی در مرکز گردابه‌ها پایین‌تر از سایر نقاط میدان می‌باشد، لذا احتمال وقوع کاویتاسیون در این نقاط بیشتر است. دلیل این اتفاق اثر آشفتگی جریان می‌باشد، که از اثر رینولدز جدا است. به طور کلی عوامل زیادی در شروع کاویتاسیون تاثیر گذاشته و موجب می‌شوند که بین نتایج عددی و تجربی اختلاف چشمگیری وجود داشته باشد. حتی برای یک جسم معین با شرایط آزمایشگاهی معین، در هر آزمایش ممکن است نتایج متفاوتی به دست آید.(شکل۱-۲)



شکل (۱-۲): مقایسه شروع کاویتاسیون در تونل‌های آب مختلف [۱]

مهم‌ترین عواملی که در شروع کاویتاسیون تاثیرگذار است به صورت زیر خلاصه می‌شود [۱].

- کیفیت مایع که شامل گازهای نامحلول و ذرات جامد معلق در مایع
- کیفیت سطوح که شامل زبری و میزان ترک موجود در سطح
- اثرات ترمودینامیکی مانند دمای مایع و انتقال گرما
- عدد رینولدز جریان

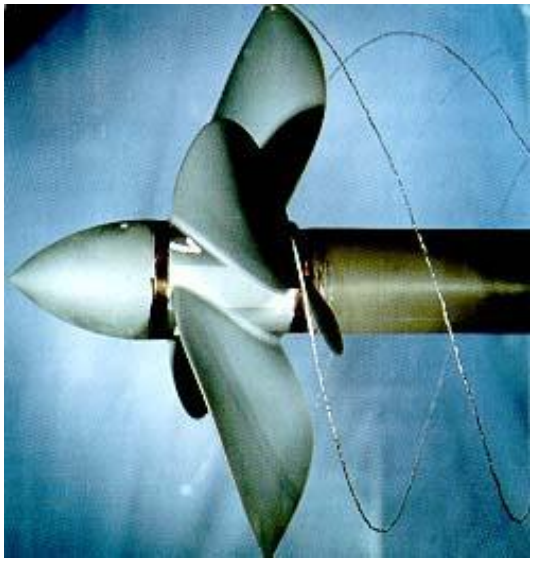
۱-۵ انواع کاویتاسیون

در حالت کلی سه نوع جریان کاویتاسیونی وجود دارد [٤].

۱- کاویتاسیون در حال حرکت[1]: این کاویتاسیون زمانی روی می‌دهد که حباب‌های تشکیل شده در مایع حرکت کرده و پس از انبساط می‌ترکند.

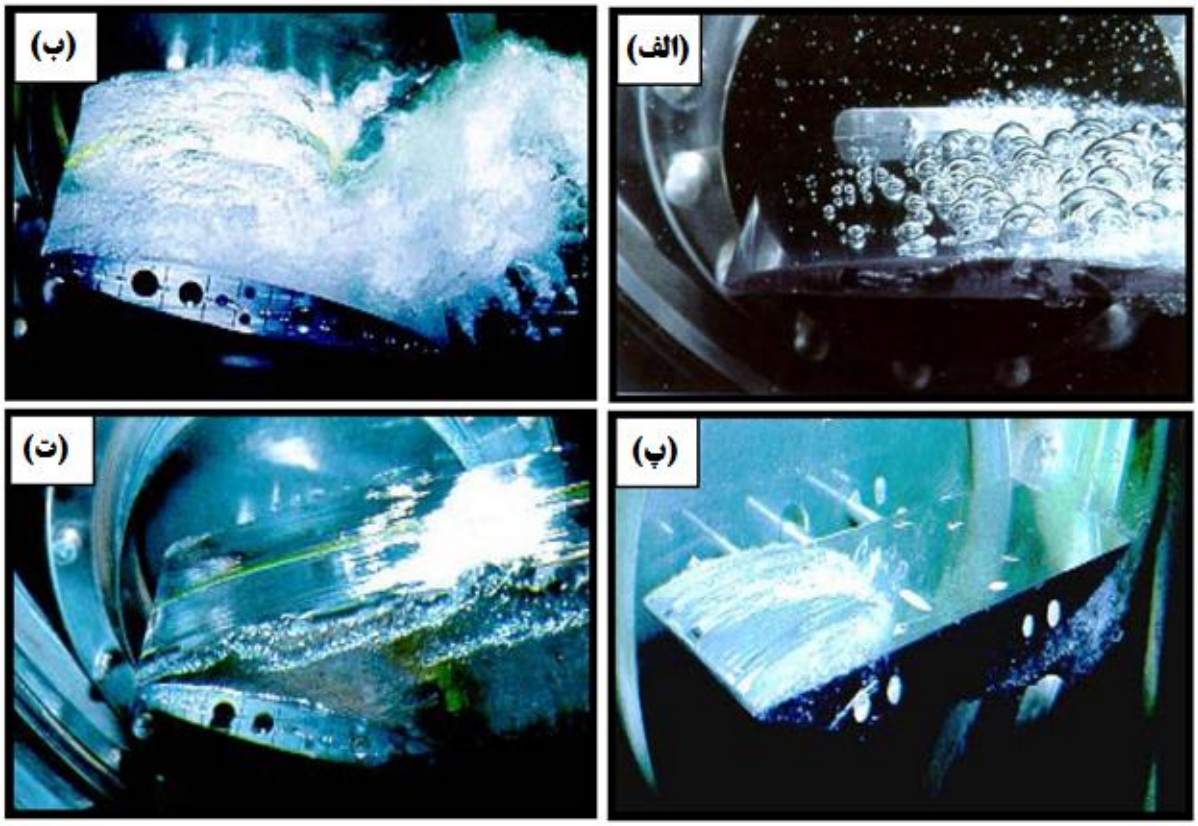
۲- کاویتاسیون ثابت[2]: این نوع کاویتاسیون در مسیر عبور جریان تشکیل می‌گردد. کویتی به مرز جامد چسبیده و در جای خود ثابت باقی می‌ماند.

۳- کاویتاسیون گردابه‌ای[3]: کاویتاسیون گردابه‌ای در هسته گردابه‌ها در نواحی با تنش برشی بالا و فشار استاتیکی پایین، تشکیل می‌شود. معمولاً در نوک پره‌های دوار پروانه کشتی‌ها دیده می‌شود.



شکل (۱-۳): کاویتاسیون گردابه‌ای [۵]

[1] *Travelling cavitation*
[2] *Fixed cavitation*
[3] *Vortex cavitation*



شکل (۱-٤): الف) کاویتاسیون حباب، ب) کاویتاسیون ابری، پ) کاویتاسیون ورقه‌ای و ت) سوپرکاویتاسیون [٦]

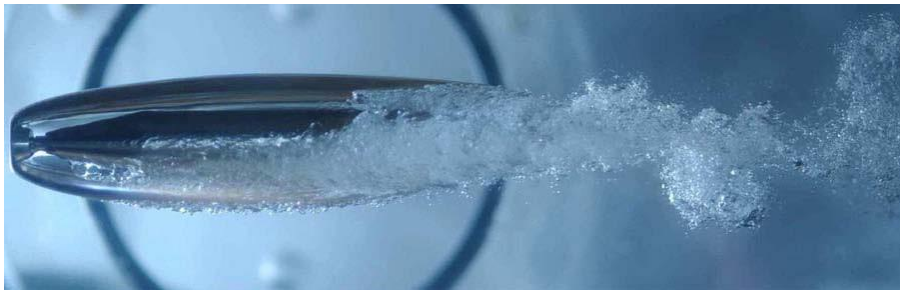
در شکل (٤-۱) انواع مختلف کاویتاسیون روی یک هیدروفویل نشان داده شده است. زمانی که زاویه حمله جریان کم است و جدایش لایه مرزی وجود نداشته باشد، کاویتاسیون به شکل حباب‌های نسبتا بزرگ و مجزا تشکیل شده که به کاویتاسیون حباب[1] معروف است. با جدایش لایه مرزی کاویتاسیون ورقه‌ای[2] تولید می‌شود که در این حالت حفره‌ای از کاویتاسیون به وجود می‌آید. با کاهش عدد کاویتاسیون کویتی رشد کرده و در محل بسته شدن حفره[3] بر روی دیوار، ناپایداری‌هایی به وجود می‌آید. سرانجام قسمت انتهایی کویتی جدا شده و به همراه جریان به پایین‌دست جریان حرکت کرده و در آنجا فروریزش می‌کند. این نوع کاویتاسیون که

[1] *Bubble cavitation*
[2] *Sheet cavitation*
[3] *Cavity*

خطرناک‌ترین نوع کاویتاسیون نیز است به کاویتاسیون ابری[1] مشهور است. فرو ریزش ابرهای کاویتاسیون باعث ایجاد یک موج فشار قوی بر روی سطح جامد می‌شود. برای اعداد کاویتاسیون پایین‌تر طول کویتی آنقدر زیاد می‌شود که کل جسم را در بر می‌گیرد، در این حالت گفته می‌شود که سوپرکویتی تشکیل شده است. به این نوع جریان، جریان سوپرکاویتاسیونی گفته می‌شود.

۱-٦ سوپرکاویتاسیون

هنگامی که یک کویتی پر از گاز و یا بخار رشد می‌کند و ابعاد آن در مقایسه با ابعاد جسم بسیار بزرگتر شود، سوپرکویتی تشکیل می‌شود. سوپرکاویتاسیون یک فرآیند هیدرودینامیکی است که در آن جسم در یک لایه از گاز احاطه شده است. مبدا تشکیل سوپرکویتی، کویتیتور می‌باشد که در جلو جسم نصب می‌شود. سوپرکویتی هم به واسطه تشکیل کاویتاسیون بخار(سوپرکاویتاسیون طبیعی[2]) و هم با تزریق گاز در منطقه کم‌فشار یک گردابه (سوپرکاویتاسیون مصنوعی[3]) تولید می‌گردد.



شکل (۱-۵): سوپرکویتی تشکیل شده ناشی از تزریق گاز [۷]

[1] *Cloud Cavitation*
[2] *Natural Supercavitation*
[3] *Ventilated Supercavitation*

۱-۷ معیار شکل‌گیری سوپرکاویتاسیون و عدد کاویتاسیون

عدد کاویتاسیون یک عدد بدون بعد می‌باشد که به عنوان معیاری برای تشکیل و عدم تشکیل کاویتاسیون شناخته می‌شود [۲].

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \qquad (۱-۱)$$

p_∞ : فشار بالادست جریان

p_v : فشار بخار

U_∞: سرعت بالادست جریان

ρ: چگالی سیال

رابطه (۱-۱)، معیاری از تشکیل سوپرکاویتاسیون طبیعی می‌باشد. برای سوپرکاویتاسیون مصنوعی به جای فشار بخار از فشار داخل سوپرکویتی برای محاسبه عدد کاویتاسیون استفاده می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد افزودن گاز به منطقه کم فشار، بدون این که در سرعت و فشار مطلق تغییری ایجاد نماید، به واسطه کاهش عدد کاویتاسیون سبب تشکیل سوپرکویتی مصنوعی خواهد شد. اگر نرخ تزریق گاز بیش از یک حد معین شود، ناپایداری‌هایی ایجاد خواهد شد. این ناپایداری‌ها با امواجی روی سطح سوپرکویتی و نوسانات در طول و عرض حباب مشخص خواهند شد. اگر از نوسانات صرفنظر شود، در صورتی که ابعاد حباب تزریقی و حباب طبیعی پس از تشکیل با یکدیگر مشابه باشند، این دو حباب را می‌توان معادل یکدیگر دانست [۸].

با توجه به مقادیر σ ، جریان‌های کاویتاسیونی به صورت زیر قابل دسته‌بندی هستند [۳].

۱) کاویتاسیون آغازی:

این مرحله از کاویتاسیون شامل تشکیل و انهدام اولیه حباب‌ها می‌باشد که با سر و صدای زیادی همراه است، و باعث خرابی سطوح جامد می‌شود. در این مرحله حباب‌ها قابل مشاهده، کوچک و منطقه کاویتاسیون محدود است. عدد کاویتاسیون این مرحله، عدد کاویتاسیون آغازی نامیده می‌شود.

۲) کاویتاسیون جزئی:

این نوع کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که حباب ایجاد شده، قسمتی از بدنه‌ی جسم را می‌پوشاند. در این مرحله کویتی غیر شفاف بوده، دارای پالس و ضربان است. در ضمن یک حباب پایدار تشکیل نمی‌شود. در این حالت عدد کاویتاسیون کمتر از عدد کاویتاسیون در مرحله‌ی شروع آن می‌باشد.

۳) سوپرکاویتاسیون:

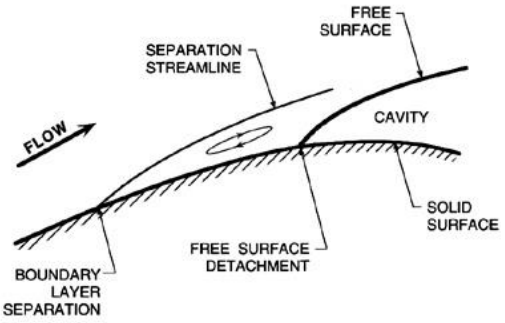
با کاهش بیشتر عدد کاویتاسیون ابعاد کویتی به طور قابل ملاحظه‌ای از ابعاد جسم بزرگتر می‌شود و جسم را به طور کامل در خودش احاطه می‌کند. در این حالت سطح کویتی بسیار شفاف و پایدار است.

۱-۸ جدایش در جریان سوپرکاویتاسیون

در بحث سوپرکاویتاسیون با جدایش لایه مرزی مواجه هستیم. البته در این شرایط، جدایش جریان با جدایش لایه مرزی متفاوت است. در بحث جدایش جریان در لایه مرزی، گرادیان فشار در جهت جریان مثبت می‌باشد ولی در جریان‌های سوپرکاویتاسیون، جدایش جریان از سطح زمانی رخ می‌دهد که گرادیان فشار در جهت جریان منفی باشد و در اصل در بحث جریان سوپرکاویتاسیون با لایه‌ی مرزی با تعریف مشخص آن مواجه نخواهیم بود. این مساله برای حالتی که جریان از روی یک لبه‌ی تیز می‌گذرد نیز قابل بسط است. حرکت جریان روی لبه‌ی تیز باعث جدایش جریان می‌شود. در این حالت اگر سرعت سیال زیاد باشد، می‌تواند منجر

به کاهش شدید فشار در ناحیه‌ی جدایش شود. بنابراین شرایط تولید بخار ایجاد شده، و در این زمان حباب کاویتاسیونی شکل می‌گیرد. در حالت کلی می‌توان گفت که جدایش لایه مرزی هنگام ترک لایه مرزی از ناحیه پر فشار ایجاد می‌شود ولی حباب کاویتاسیونی هنگامی که مایع از سطح جدا می‌شود، و در منطقه خالی از مایع، تشکیل می‌گردد [۱].

کاویتاسیون پدیده‌ای است که به فشار مطلق، نسبت اندازه حرکت و فشار جریان اصلی خارج از لایه‌ی مرزی بستگی دارد، در حالی که جدایش لایه‌ی مرزی به نسبت اندازه حرکت و فشار داخل لایه‌ی مرزی بستگی دارد. در جدایش لایه مرزی هنگامی که گرادیان فشار معکوس عمل می‌کند، سرعت مایع در نزدیکی سطح به صفر میل کرده، و این حالت تا جایی ادامه می‌یابد که جهت سرعت به سمت بالادست معکوس شود. در مقابل نقطه‌ی جدایش در کاویتاسیون بعد از فشار مینیمم روی می‌دهد. تفاوت این دو پدیده در شکل (۱-٦) مشاهده می‌شود.

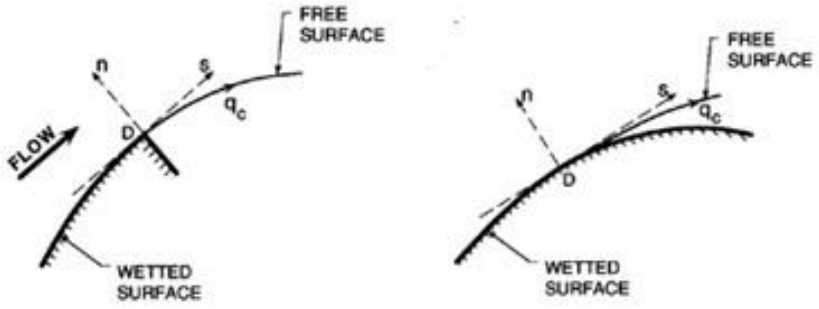


شکل (۱-٦): شماتیک جدا شدن کویتی و جدایش لایه مرزی [۱]

در تشکیل سوپرکویتی، نقطه‌ی جدایی مایع از سطح جسم اهمیت به سزایی دارد. نقطه‌ای که در آن پدیده کاویتاسیون شروع شده و سطح کویتی در آن نقطه از سطح جسم جدا می‌شود، نقطه‌ی جدایش کویتی نام

دارد. همان طور که توضیح داده شد جدا شدن کویتی را نباید معادل پدیده‌ی جدایش لایه‌مرزی در نظر گرفت. برای بررسی موقعیت و محل دقیق نقطه جدا شدن کویتی از سطح جسم، در حالت کلی اجسام را بر اساس هندسه‌شان به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند. دسته اول اجسامی هستند که دارای هندسه هموار، پیوسته و بدون لبه تیز هستند. مشخص کردن محل نقطه جدایی سطح کویتی از سطح جسم هموار، کار نسبتاً مشکلی است. این نوع جدا شدن کویتی را جدا شدن صاف یا هموار[1] می‌گویند.(شکل الف، ۱-۷) وقتی در امتداد سطح خیس در جسم با هندسه هموار، به نقطه جدایی وارد شویم، گرادیان‌های سرعت و فشار به سمت صفر میل می‌کنند. همچنین انحنای سطح آزاد کویتی در نقطه جدایی هموار، به انحنای سطح جسم در آن نقطه میل می‌کند. یعنی جریان آزاد سطح کویتی مماس بر سطح جسم است.

دسته دوم اجسامی هستند دارای شیب‌های ناپیوسته در سطح یا به عبارت دیگر دارای لبه‌ی تیز در هندسه-شان باشند (شکل ب، ۱-۷). در این اجسام سطح آزاد کویتی، در نقطه ناپیوستگی شیب سطح جسم یا لبه تیز، از سطح جسم جدا می‌شود. این نوع جدایش را جدایش تیز[2] می‌نامند.



(ب) (الف)

شکل (۱-۷): شماتیک جدا شدن سطح کویتی الف) جدایش هموار، ب) جدایش تیز [۱]

[1] *Smooth Detachment*
[2] *Abrupt Detachment*

۱-۹ تاریخچه

مطالعات پایه‌ای پدیده سوپرکاویتاسیون از حدود یک قرن پیش آغاز شده است. ولی نکته حائز اهمیت کاربردهای نسبتاً جدید این پدیده می‌باشد. کارهای اولیه تنها مفاهیم ریاضی در بر داشتند. جریان سوپرکاویتاسیون زیر مجموعه‌ای از کاویتاسیون ثابت در نظر گرفته می‌شد. بنابراین جریانی مورد مطالعه واقع می‌شد که یک بخش آن به مرز جامد و بخش دیگر آن به ناحیه‌ای فشار ثابت محدود شده بود. بیشتر کارهای این دوره برای جریان‌های دو بعدی و با استفاده از تئوری پتانسیل مختلط انجام می‌گرفت. با این حال کویتیتورهای متقارن محوری و جریان‌های سه بعدی نیز به صورت تحلیلی مورد تحقیق واقع شده‌اند. عدم توانمندی در تحلیل جریان برای هندسه‌های پیچیده، و همچنین معادلات غیر خطی که برای یافتن مکان واقعی سطح آزاد کویتی می‌بایست حل می‌شد، از مشکلات اساسی این روش‌ها بوده است. در اویل دهه ۱۹۷۰ توجه دانشمندان به حل عددی جریان‌های سوپرکاویتاسیون معطوف شد. کارهای عددی اولیه بر اساس استفاده از تئوری جریان پتانسیل استوار بود. در این روش‌ها مقادیر مرزی مهم بوده (BEM) و هدف نهایی یافتن سطح آزاد سوپرکویتی با استفاده از ارضای یک شرط مرزی دینامیکی می‌باشد. کارهای مختلفی با استفاده از روش المان مرزی توسط حسینعلی‌پور و همکاران در دانشگاه علم و صنعت انجام شده است [۸]. برای یافتن مکان صحیح سطح آزاد سوپرکویتی از یک الگوریتم تکرار استفاده می‌شد. این روش هنوز هم به طور گسترده در بسیاری از مطالعات مهندسی کاربرد دارد. دکتر شفقت مرور مفصلی بر کارهای تحلیلی و همچنین مطالعات عددی بر پایه تئوری جریان پتانسیل و روش المان مرزی در رساله دکتری خود ارائه کرده‌اند [۸].

مطالعات بعدی جریان سوپرکاویتاسیونی بر اساس استفاده از معادلات ناویر- استوکس استوار شده است. این مطالعات را می‌توان به دو دسته کلی طبقه‌بندی کرد. دسته اول همانند روش‌های عددی بر پایه تئوری

جریان پتانسیل، روش تعقیب مرز مشترک می‌باشد. در این روش‌ها برای ناحیه سوپرکویتی فشار ثابتی برابر فشار بخار در دمای مایع را در نظر می‌گیرند. این فرضیه کاملاً فیزیکی است و توسط کارهای تجربی تایید شده است [۹]. بر اساس این فرض، مرز مشترک بخار و مایع قابل ردیابی بوده و شکل سوپرکویتی در طی فرآیند تکرار به دست می‌آید. این روش در مدل کردن کاویتاسیون ورقه‌ای کاربرد دارد، ولی برای حالتی که با رشد حباب همراه است و جدایش رخ می‌دهد مناسب نیست. همچنین به دلیل اینکه ردیابی مرز مشترک در جریان‌های سه بعدی مشکل می‌باشد، تاکنون به جریان‌های دو بعدی و متقارن محوری محدود شده است. مثال‌هایی از این دست را می‌توان در کارهای چن و هیستر [۱۰] و [۱۱]، و دشپاند و همکارن [۱۳] و [۱٤] مشاهده کرد.

دسته دوم روش‌های مخلوط چند فاز هستند که به مدل جریان تعادلی همگن نیز مشهورند. در این روش‌ها یک سیال را برای دو فاز در نظر می‌گیرند. تفاوت بین مدل‌های گوناگون این روش در مشخص کردن میدان چگالی است. دلانوی و کوئنی [۱۵] در سال ۱۹۹۰ یک معادله حالت باروتروپیک برای محاسبه میدان چگالی ارائه کردند. در سال ۱۹۹۲ کوبوتا و همکاران وی [۱۷] مدلی را بر اساس معادله رایلی- پلست ارائه کردند. این مدل به مدل حبابی مشهور شده است و در واقع از معادله رایلی- پلست به جای معادله حالت برای تعیین میدان چگالی استفاده می‌کند. به علت اینکه معادله رایلی- پلست وابسته به زمان است این روش به جریان غیر دائم در کاویتاسیون ابری محدود می‌گردد. ونتیکوس و تزابیراس [۱۸] در سال ۲۰۰۰ از مدل تبخیر در آنتالپی ثابت استفاده کردند. آنها در این مدل از معادلات ناویر- استوکس به همراه یک معادله حالت بر اساس جداول ترمودینامیکی آب و بخار، استفاده کردند. ایشان اثرات ترکم پذیری را نیز برای هر دو فاز مایع و بخار در نظر گرفتند. ادواردز [۱۹] در سال ۲۰۰۰ از معادله حالت سانچز- لاکومبه استفاده کرد. وی معادله

انرژی را هم به همراه معادلات ناویر- استوکس حل کرد. سال ۱۹۹٦ چن و هیستر [۱۲] مدلی دو فازی را توسعه دادند. آنها از یک معادله انتقال برای مشخص کردن میدان چگالی استفاده نمودند. این مدل چگالی مبنا نیز از معادله رایلی- پلست بدست می‌آید.

در سال‌های بعد روش‌های دیگری توسعه یافتند که از معادله انتقال برای محاسبه دینامیک سوپرکویتی استفاده می‌کنند. این روش‌ها رفتار بسیار انعطاف پذیری دارند. در این رهیافت معادله انتقال برای کسر حجمی و یا کسر جرمی بخار یا مایع حل می‌شود. سینگهال و همکاران وی [۲۰] در سال ۱۹۹۷، مرکل و همکاران وی [۲۳] در سال ۱۹۹۸ و کانز و همکارانش [۲٤]، [۲۵]، [۲٦]، [۲۷] و [۲۸] مدل‌های مشابهی را بر اساس معادله انتقال ارائه کردند. تفاوت این مطالعات در جمله‌های چشمه می‌باشد. سینگهال از یک الگوریتم فشار مبنا استفاده نمود. مرکل و کانز تراکم پذیری مصنوعی را با توجه به استراتژی پیش شرطی به کار بردند. در کارهای سینگهال و مرکل جملات چشمه تابعی از فشار است. اما در جملات چشمه ارائه شده توسط کانز، جمله تبخیر تابع فشار و جمله تقطیر تابع کسر حجمی می‌باشد. مزیت اصلی این روش در خاصیت جابجایی معادلات است که می‌توان اثرات نیروهای اینرسی را روی کشیدگی سوپرکویتی، جدا شدن و حرکت حباب‌ها بررسی کرد. در سال ۲۰۰۱ سینگهال و همکارانش [۲۱] و [۲۲] جملات چشمه بر اساس معادله رایلی- پلست ارائه کردند.

آلای بگوویچ [۳۰] در سال ۱۹۹۹ یک مدل دو سیاله را با استفاده از جملات چشمه بر اساس معادله رایلی- پلست برای تعیین انتقال جرم پیشنهاد نمود. سوآئر و اشنر [۳۱] مدلی مشابه مدل سینگهال و بر اساس دینامیک حباب ارائه نمودند. از جملات چشمه بر اساس معادله رایلی- پلست برای در نظر گرفتن انتقال جرم استفاده کردند. آنها اثرات دمایی را نیز در نظر گرفتند، برای این منظور یک معادله ساده شده برای آنتالپی مخلوط به دستگاه معادلات اضافه کردند. اهوجا و همکاران [۳۲] وی در سال۲۰۰۰ الگوریتمی را برای در نظر

گرفتن اثرات تراکم پذیری با استفاده از روش‌های تراکم پذیری مصنوعی و سازگار با شبکه‌های بی سازمان توسعه دادند.

سنوکاک و همکاران وی [٦]، [٣٣]، [٣٤] و [٣٥] در سال ٢٠٠٢ با به کار بردن معادلات پیوستگی و مومنتوم عمود بر مرز مشترک بخار و مایع و صرفنظر از اثرات لزجت و کشش سطحی و استفاده از تحلیل ابعادی مدل خود را بر اساس دینامیک مرز حباب ارائه نمود.

بوزید [٣٧] در رساله‌ی دکتری خود در سال ٢٠٠٦ به بررسی عددی جریان کاویتاسیون و کاربردهای آن در ماشین‌های هیدرولیکی پرداخت. وی این کار را براساس هر سه مدل، یعنی روش تعقیب مرز مشترک، مدل دوفازی همگن بر اساس معادله حالت و مدل دوفازی همگن بر اساس معادله انتقال انجام داد.

نوری و همکاران وی [٣٩] در سال ٢٠١٠ از تئوری چشمه و چاه برای مدلسازی پدیده سوپرکاویتاسیون حول اجسام متقارن محوری استفاده کرده‌اند. در این مدل سوپرکاویتاسیون به وسیله یک چشمه و چاه فیزیکی شکل می‌گیرد، بدین صورت که از پشت بدنه جریان بخار به داخل میدان حل فرستاده می‌شود و در ناحیه بسته شدن سوپرکویتی یک چاه فیزیکی در پایین دست کویتیتور تعبیه می‌گردد.

در فصل دوم به طور مفصل به تشریح جزئیات مدل‌های پیش گفته پرداخته خواهد شد.

١-١٠ اهداف پایان‌نامه

در سیستم‌هایی که با جریان مایع سر و کار داریم، امکان وقوع پدیده‌ی کاویتاسیون وجود دارد. دیدگاه اولیه‌ای که راجع به این پدیده وجود داشت، آن را به عنوان یک پدیده مزاحم و مضر می‌دانست که باعث خسارت به سیستم‌ها و خرابی قطعات می‌شد. اما رویکرد جدیدی که نسبت به این پدیده وجود دارد، رویکرد استفاده از این پدیده می‌باشد. امروزه پدیده سوپرکاویتاسیون، به عنوان یکی از انواع کاویتاسیون نقش مهمی در کاهش پسا

پرتابه‌های زیر سطحی ایفاء می‌کند. در پرتابه‌های زیر سطحی به منظور کاهش نیروی پسا بر روی رونده‌های زیر سطحی از نصب یک کویتیتور در جلو آن استفاده می کنند. در این حالت به سبب افزایش سرعت آب در لبه کویتیتور، فشار تا فشار بخار متناظر با دمای آب کاهش یافته، و یک حباب در اطراف دماغه سیستم شکل می‌گیرد. چنانچه سرعت پرتابه به اندازه کافی زیاد باشد، کل سیستم درون حباب تشکیل شده قرار می گیرد. به این ترتیب پسا ناشی از اصطکاک پوسته‌ای تقریباً از بین رفته و پسای فشاری نقش اصلی را بازی می کند.

امروزه چندین کد تجاری، مدل‌های کاویتاسیون چند فازی که عموماً بر اساس معادله انتقال رایلی- پلست یا معادله حالت بنا شده‌اند، را در اختیار محققان قرار می‌دهند. در پژوهش حاضر کد تجاری CFX به کار برده شده است. برای شبیه سازی عددی جریان سوپرکاویتاسیون از مدل مخلوط چندفاز به همراه یک معادله انتقال برای مدلسازی کاویتاسیون، و عبارت‌های چشمه رایلی- پلست برای محاسبه انتقال جرم استفاده شده است.

در گام اول شکل حباب کاویتاسیون و نیروی پسا در کویتیتورهای ساده و شرایط عملکردی مختلف بررسی می‌گردد. بعد از اعتبار بخشی نتایج دو بعدی و متقارن محوری با نتایج آزمایشگاهی در دسترس، به شبیه‌سازی جریان سوپرکاویتاسیون سه بعدی پرداخته می‌شود. در این مرحله جریان سوپرکاویتاسیون حول دیسک و استوانه در زوایای حمله مختلف جریان مدل می‌گردد. مدل‌سازی سوپرکاویتاسیون در اطراف یک رونده زیر سطحی با زوایای نصب مختلف کویتیتور و به دست آوردن مشخصات سوپرکویتی در این شرایط، هدف اصلی پژوهش حاضر است. این کار با تولید هندسه رونده و استفاده از شبکه‌های محاسباتی با المان بالا (بیشتر از ۵ میلیون المان) و پردازش موازی انجام می‌شود. در انتهای پژوهش، سوپرکاویتاسیون مصنوعی نیز با استفاده از تزریق گاز مدل شده، و اثرات گاز غیر قابل تقطیر در شکل‌گیری پدیده سوپرکاویتاسیون بررسی می‌گردد.