

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

بنام خدا

مبانی کاویتاسیون

تألیف:

جین ماریه میشل و جین پیر فرانک

ترجمه:

دکتر موسی فرهادی

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دکتر ابراهیم علیزاده

استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهندس حمید رضا ابراهیمی کبریا

مربی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تقدیم به شهدای بزرگوار هسته‌ای



پیشگفتار مترجمین

حمد و سپاس خداوند دانا و بلند مرتبه را که به مترجمان این توفيق را عطا نمود تا کاري هرچند کوچک در راستاي خدمت رساني به جامعه علمي و دانشگاهي کشور بردارند. کتاب حاضر ترجمه کتاب Fundamentals of Cavitation، تاليف جين پير فرانك و جين مارييه ميشل است که در سال ۲۰۰۴ توسط موسسه انتشاراتي Kluwer Academic Publishers به چاپ رسيده است. نگاه ساده به تئوري کاويتاسيون، روانی مطالب، به روز بودن و کامل بودن اطلاعات مربوط به پدیده کاويتاسيون از جمله مواردی است که موجب انتخاب اين کتاب برای ترجمه گردید. مطالب اين کتاب برای دانشجويان کارشناسي و کارشناسي ارشد مهندسي مکانيك، مهندسي عمران، مهندسي کشتی سازی و ديگر علاقه مندان مفید بوده و از سوی ديگر می تواند به عنوان يك مرجع مناسب برای محققان و پژوهشگران در اين زمينه نيز مورد استفاده قرار گيرد. وجود منابع و اطلاعات بسیار مفید آزمایشگاهی، روابط تئوري مناسب برای بيان فيزيك کاويتاسيون موجب شده تا کتاب حاضر يکی از معتبرترین کتب در زمينه کاويتاسيون باشد.

جهت تهييه متن مناسب برای محققين محترم و دانشجويان عزيز، مترجمين ضمن تلاش در رعایت امانت، ترجمه محتواي را مد نظر قرار داده و از ترجمه لغت به لغت اجتناب نموده اند. با توجه به چاپ نخستين ويراييش اين کتاب و على رغم تلاش مترجمين، امكان وجود اشکالاتي در متن کتاب می باشد که ضمن پوزش از تمامي خوانندگان محترم، مجدانه درخواست ميگردد تا نظرات اصلاحی خويش را به اطلاع مترجمان رسانده تا انشاء الله در چاپ هاي بعدی اصلاح گردد.

شایسته است که از تمامي عزيزانی که ما در تهييه اين کتاب ياري نمودند سپاسگزاری نمایيم. مترجمين از خانواده هاي خود که در تمامي مراحل مشوق و پشتيبانشان در انجام اين کار بوده اند صميمانه تشکر و قدردانی نموده و اين اثر هرچند ناچيز را به تمامي شهدای سنگر علم و دانش وبالا خص شهدای والامقام هسته اى و امام بزرگوار راحل تقديم می نمایند.

موسى فرهادی، ابراهيم علیزاده و حمیدرضا ابراهيمی کبریا

تابستان ۱۳۹۰

پیشگفتار

این کتاب رفتار کاویتاسیون را که یک پدیده منحصر به فرد در زمینه علم هیدرودینامیک می باشد مورد بررسی قرار داده، هرچند می توان آن را در هر ماشین آلات هیدرولیکی مانند پمپ ها، ملح هواپیما، قلب مصنوعی، و غیره مشاهده نمود. کاویتاسیون نه تنها در آب ، بلکه در هر نوع مایع، مانند هیدروژن مایع نیز می تواند ایجاد شود. تولید کاویتاسیون می تواند باعث آسیب شدید در ماشین آلات هیدرولیک گردد. بنابراین، پیشگیری از کاویتاسیون از نگرانی های مهم برای طراحان ماشین آلات و تجهیزات هیدرولیکی است. بر عکس، پتانسیل بسیار زیادی برای استفاده از کاویتاسیون در برنامه های کاربردی مهم مختلف مانند حفاظت از محیط زیست وجود دارد.

کتابهای متعددی در زمینه کاویتاسیون منتشر شده که از جمله می توان به یکی از کتابهای که توسط همین نویسنده ایشان نوشته شده اشاره نمود. این کتاب در مقایسه با کتاب قبلی متفاوت بوده و دارای مفاهیم بیشتر فیزیکی و نظری است. بیان تئوری از پدیده کاویتاسیون نسبتا دشوار است، اما نویسنده در توضیح آن بسیار موفق بوده و خواننده می تواند معادلات را به راحتی دنبال کند. این یکی از مزیتهای کتاب بوده که درک مناسبی از فیزیک کاویتاسیون به خواننده می دهد. از این رو، یک کتاب مقدماتی نبوده و مناسب برای مطالعات پیشرفته است.

با این حال، این بدان معنا نیست که این کتاب برای یک مبتدی بیش از حد دشوار است، زیرا پدیده کاویتاسیون را با استفاده از اشکال مختلف توضیح می دهد. بنابراین، حتی یک مبتدی در مطالعه پدیده کاویتاسیون می تواند آن را بخواند و درک نماید که کاویتاسیون چیست. دانشجویان با مطالعه این کتاب (با تأمل و دقت)، می توانند به یک متخصص در فیزیک کاویتاسیون تبدیل شوند.

در نتیجه، این کتاب مرجع بسیار جامع و آموزنده ای برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی، دانشمندان و مهندسانی که می خواهند درک درستی از ماهیت واقعی کاویتاسیون داشته باشند، می باشد.

نویسنده، دکتر ژان ماری میشل^۱ و دکتر ژان پیر فرانک^۲، استادان دانشگاه گرونوبیل، هر چند دکتر میشل به تازگی بازنشسته شده است. آنها تجربه بسیاری در زمینه آموزش و مطالعه کاویتاسیون دارند. دکتر میشل و دکتر فرانک دارای مقالات بسیار مهمی در مجلات بین المللی به رسمیت شناخته شده دانشگاهی مانند مجله مکانیک سیالات می باشند، که در این کتاب به آنها اشاره شده است.

دکتر میشل و دکتر فرانک مناسب ترین افراد برای نوشتن یک کتاب در زمینه کاویتاسیون مانند این می باشند. این افتخار بزرگی برای من است که اولین تبریک گوینده به آنها برای تهییه چنین مجموعه بسیار منحصر به فرد و شگفت انگیزی باشم.

مارس ۲۰۰۳، توکیو، ژاپن

دکتر هیروهارو کاتو^۳

استاد ممتاز، دانشگاه توکیو

¹ -Jean-Marie MICHEL

² -Jean-Pierre FRANC

³ -Hiroharu KATO

مقدمه نویسنده‌گان

کتاب حاضر با هدف ارایه جامع از پدیده کاویتاسیون تهیه شده است. مرکز اصلی در این کتاب بر روی کاویتاسیون هیدرودینامیک بوده که غالباً در جریان سیال رخ می‌دهد و بر خلاف کاویتاسیون صوتی است که با فشار یک میدان نوسانی در یک مایع تقریباً ساکن بوجود می‌آید. با این وجود، اصول حاکم بر حباب هیدرودینامیک و حباب آکوستیک دارای اساس یکسانی است.

به طور خلاصه کاویتاسیون، وقوع حفره‌های بخار در داخل یک مایع است. این مطلب به خوبی شناخته شده است که در شرایط سکون، تغییر مایع به بخار زمانی رخ می‌دهد که فشار سیال از فشار بخار آن کمتر گردد. در جریان مایع، این تغییر فاز به طور کلی در نواحی دارای سرعت بالا و طبیعتاً دارای فشارهای پایین بوجود می‌آید. محیط مایع به یک یا چند نقطه تقسیم شده و حفره‌ها در آن بوجود می‌آیند که شکل آنها بستگی به ساختار جریان دارد.

این کتاب انواع کاویتاسیون‌هایی را که در جریان مایع واقعی رخ می‌دهد، مورد بررسی قرار خواهد داد. این مطاب شامل حباب کاویتاسیون (حباب‌های کروی در ساده ترین حالت)، کاویتاسیون لایه‌ای، سوپر کاویتاسیون و ابرتخیله، کاویتاسیون در جریان برشی و گردابی و برخی از الگوهای دیگر است. این مطالب آغاز و همچنین توسعه کاویتاسیون را که در هیدرولیک پیشرفته با سرعت بالا بوجود می‌آید پوشش می‌دهد.

مطالب مطرح شده در این کتاب برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی، محققین و مهندسینی که با مشکلات کاویتاسیون مواجه می‌گردند، به ویژه در زمینه‌های ماشین آلات هیدرولیک صنعتی و نیروی محرکه دریابی مفید می‌باشد. تلاش ویژه ای برای توضیح فیزیک کاویتاسیون در ارتباط با پدیده‌های مختلف از قبیل کشش سطحی، گرما و انتقال جرم، ویسکوزیته و لایه مرزی، تراکم، محتوای هسته، تلاطم، و غیره صورت گرفته است. علاوه بر مبانی فیزیکی پدیده‌های مختلف، روش‌های مختلف تحقیقاتی تجربی و یا محاسباتی ارایه شده و مورد بحث قرار گرفته، به طوری که خواننده می‌تواند مشکلات اصلی در این راستا را مرتفع نماید.

کتاب حاصل نتایج مطالعات صورت گرفته در حدود ۴۰ سال از تحقیقات دانشگاه گرونوبل در زمینه های مختلف علوم کاویتاسیون می باشد که با حمایت مالی شرکت ها و نهادهای مختلف، به ویژه نیروی دریایی فرانسه صورت گرفته است. در ابتدا، دو عامل مهم و تاثیر گذار اصلی که موجب تشکیل گروه پژوهشی کاویتاسیون شده توسط پروفسور جی دادو^۱ شده، عبارتند از؛ تجربه های هیدرولیک قوی از شرکت های خصوصی در گرونوبل و مشاوره از دانشمندان مشهور خارجی(پلست^۲، تولین^۳، پارکین^۴، آکوستا^۵ و بسیاری دیگر) که توسط کار هنرمندانه پروفسور جی به اجرا در آورده شدند. بسیاری از کسانی که سالها روابط اولیه علمی و صنعتی آنها، فعال باقی مانده است. در اینجا ما به خصوص مایل به اذعان سهم بسیار موثر آقای لکفره^۶، چه در طراحی سکوهای تجربی و یا شروع برنامه های تحقیقاتی جدید می باشیم. ما همچنین باید نام پروفسور روه^۷ را به یاد داشته باشیم، کسی که بینش بالا در هیدرودینامیک و کار پیشگام او در مدل سازی عددی جریان کاویتاسیون، هنوز هم در ذهن ما باقی مانده است.

این کتاب از فصل های نسبتاً کوتاه، هر یک مطابق با یک یا دو درس تهیه شده است. این نتیجه از برنامه های آموزشی داده شده در طول سالها و از جمله تعدادی از سینیارها گرفته شده است. فهرست منابع (در پایان هر فصل) تنها به مباحث اصلی محدود شده است، در حالی که مطالب بسیار فراوان اختصاص داده شده به کاویتاسیون را می توان از بررسی مقالات به دست آورد.

پس از یک فصل مقدماتی، مطالب کلاسیک در ارتباط با شکست مایع در فصل ۲ یاد آوری می گردد. نشان داده می شود که یک مایع می تواند واقعاً در فشار مطلق کمتر از فشار بخار (و حتی تنش ها) بدون کاویتاسیون، پایدار باشد. این امر به ایده هسته (یعنی نقاط ضعف در زنجیره مایع) که در آن مفهوم اساسی کاویتاسیون می باشد، منجر می شود. فیزیک میکروحباب به

¹ - J. DODU

² -M.S. PLESSSET

³ -M.P. TULIN

⁴ -B.R. PARKIN

⁵ -A.J. ACOSTA

⁶ -Y. LECOFFRE

⁷ -A. ROWE

عنوان هسته با جزئیات با تاکید ویژه ای بر پایداری ارایه شده است. فصل ۲ با تعریف کیفیت از نمونه مایع در شرایط استفاده از حجم هسته، یک مفهوم کلیدی برای پیش بینی الگوهای کاویتاسیون در جریان واقعی مایع به پایان می رسد.

فصل ۳ تا ۵ در ارتباط با حباب جدا شده است. در فصل ۳، نتایج اولیه بر روی دینامیک حباب کروی ارایه شده و معادله معروف رایلی-پلست^۱ بدست آمده است. در سراسر این کتاب، این معادله اساسی برای روشن شدن مسایل ضروری همچون اثرات اندازه مورد استفاده قرار گرفته است. تکامل حباب در یک محیط غیر متقارن که منجر به انحراف از کرویت خواهد شد، در فصل ۴ به همراه مساله مسیر یک حباب در یک جریان مایع مطرح شده است. اثر تراکم پذیری مایع و انتشار حرارتی در فصل ۵ ارایه شده است.

فصل ۶ تا ۹ در ارتباط با کاویتاسیون لایه ای، که به نظر می رسد بر روی تیغه های پروانه، ورقه از قایق، و یا پشت اجسام متقارن مانند اژدر رخ می دهد، صحبت شده است. همچنین فصول ۶ و ۹ به مشکلات مربوط به سوپر کاویتاسیون و ابرتخلیه نیز پرداخته است. تلاش ویژه ای برای ارایه روش تحلیلی توسط همکاران ما از روسیه و اوکراین بر اساس روشی که به اصلاح "اصل گسترش مستقل حفره لوگینوویچ" نامیده می شود، در مورد حفره های متقارن محوری ساخته شده است. ما تشکر ویژه ای از پروفسور سربریکف^۲، پروفسور ساوچنکو^۳ و همکارانشان در دانشگاه کیف داریم. از طریق آنها، ما از تحقیقات بسیار مهمی که سالها در این کشورها انجام شده است، اطلاع یافتیم. به عنوان نمونه (فصل ۹) به مدل سازی نظری از تخلیه ضربانی حفره که توسط پروفسور پاریشف^۴ از دانشگاه مسکو ارایه شده، می توان اشاره نمود.

کاویتاسیون جزئی لایه ای در فصل ۷ با توجه ویژه به کاویتاسیون ابری، جت بازگشتی و به طور کلی به ناپایداریهای کاویتاسیون پرداخته شده است. زیرا به دلیل اهمیت کاربردی آنها، این موضوعات در سالهای اخیر توسط تعدادی از محققین در آزمایشگاههایی در اروپا، ژاپن و ایالات متحده آمریکا مورد مطالعه قرار گرفته است. ما همچنین تشکر ویژه ای از پروفسور تسوجیموتو^۵

¹ -RAYLEIGH-PLESSET

² -V.V. SEREBRYAKOV

³ -Y.N. SAVCHENKO

⁴ -E.V. PARISHEV

تسوچیموتو^۱ از دانشگاه اوزاکا بدلیل بحثهای متعدد و پربارشان درارتباط با ناپایداریهای کاویتاسیون داریم. تعامل بین حرکت حباب و حفره های لایه ای چسبیده در پیوست فصل ۸ مطرح شده است. تحقیقات نشان داده که لایه مرزی بر روی دیوار همراه با مقدار هسته آب، به شدت نوع کاویتاسیونی که می تواند رخ دهد را، تحت تاثیر قرار می دهد. اصول اساسی برای پیش بینی الگوهای کاویتاسیون بر روی هیدروفویل یا پره های پمپ ها ارایه شده است.

در فصل های ۱۰ و ۱۱ به کاویتاسیون گردابه ای، کاویتاسیون گردابه نوک و کاویتاسیون برشی پرداخته شده است. نتایج مختلف ارایه شده در فصل ۱۰، در چارچوب یک برنامه پیوسته با حمایت نیروی دریایی فرانسه به دست آمده است. ما به خصوص از پروفسور فرومون^۲ به پاس مدیریت برنامه های تحقیقاتی و همکاری آزمایشگاههای:

Bassin Bassin d' Essais des Carenes (Val de Reuil, France), Ecole Navale (Brest, France), Institut de Machines Hydrauliques (Lausanne, Switzerland)).

صمیمانه سپاسگزاریم. موضوع دشوار کاویتاسیون برشی در فصل ۱۱ با تاکید ویژه ای در تجزیه و تحلیل فیزیکی که توسط پروفسور آرندت^۳ بدست آمده (از دانشگاه مینه سوتا)، همراه شده است. اثرات اصلی کاویتاسیون در تجهیزات هیدرولیک نیز در این کتاب مورد بررسی قرار گرفته است. مروری بر فرسایش حفره در فصل ۱۲ ارایه شده و این در صورتی است که خواننده اطلاعاتی در مورد سر و صدای کاویتاسیون را می تواند در فصل های مختلف بدست آورد.

ما بسیار مدیون پروفسور کاتو (استاد بازنیسته دانشگاه توکیو) H، پروفسور رزدستونسکی^۴ (دانشگاه ایالتی فنی و مهندسی دریایی سن پترزبورگ) و پروفسور استافل^۵ (دانشگاه علم و صنعت دارمشتات) که با گشاده رویی بررسی نسخه های خطی ما را پذیرفت و نظرات گرانبهای و پیشنهادات ارزشمندی را ارایه نمود. ما همچنین از همکار مان پروفسور مک‌گلاسکی^۶ که کار

¹ -Y. TSUJIMOTO

² -D.H. FRUMAN

³ -R.E.A. ARNDT

⁴ -K.V. ROZHDESTVENSKY

⁵ -B. STOFFEL

⁶ -F. MCCLUSKEY

دشوار ویراستاری زبان انگلیسی را پذیرفت و صرف زمان قابل توجهی را در بهبود مطالب ما صرف نمود، بسیار سپاسگزاریم که این مساله بسیار فراتر از مسایل مربوط به شکل خالص است.

همچنین از همکارانمان در گروه پژوهشی کاویتاسیون گرونوبل (جی^۱، مارچادیر^۲، رویندت^۳ و وردیس^۴) که ما را در به دست آوردن تعداد قابل توجهی از نتایج تجربی معتبر ارایه شده در این کتاب یاری نمودند، تشکر می نماییم.

سردبیران ما، کلوئیر^۵ و علوم گرونوبل، شایسته قدردانی ویژه ای می باشند. ما به خصوص، از از پروفسور موریو^۶، ویراستار علمی سری مکانیک سیالات و کاربردهای آن و همچنین تیم محلی علوم گرونوبل پروفسور جین بورنارل^۷ (دانشگاه گرونوبل) که حمایت خود را از اولین سال شروع این پژوهه ابراز داشته، نیکول سوال^۸ مسئول امور اداری، سیلویه بوردیج^۹، جولی ریدارد^{۱۰} و تیری مورتویر^{۱۱} برای مراقبت ثابت و استثنایی خود در تهیه متن کتاب، صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

در نهایت، ما دوست داریم که یک بار دیگر از همکار و دوستمان هیروکاتو، کسی که فعالیتهای علمی او در بسیاری از موارد دارای همخوانی با تحقیقات ما شده و پذیرفت تا مقدمه ای برای این کتاب بنویسید.

جی. پی. فرانک و جی. ام. میشل

نوامبر، ۲۰۰۳

¹ -J.C. JAY

² -M. MARCHADIER

³ -M. RIONDET

⁴ -J.F. VERDYS

⁵ -Kluwer

⁶ -Rene' MOREAU

⁷ -Jean BORNAREL

⁸ -Nicole SAUVAL

⁹ -Sylvie BORDAGE

¹⁰ -Julie RIDARD

¹¹ -Thierry MORTURIER

صفحه	فهرست مطالب
۲۱	فهرست عالیم
۲۵	فصل ۱ - مقدمه
۲۵	۱-۱- پدیده فیزیکی
۲۵	۱-۱-۱- تعریف
۲۶	۱-۱-۲- فشار بخار
۲۹	۱-۱-۳- اشکال اصلی حفره‌های بخار
۳۰	۱-۲- کاویتاسیون در جریان‌های مایع واقعی
۳۰	۱-۲-۱- رژیم‌های کاویتاسیون
۳۱	۱-۲-۲- موقعیت‌های نمونه سازگار با کاویتاسیون
۳۲	۱-۲-۳- اثرات (اصلی) کاویتاسیون در هیدرولیک
۳۳	۱-۳- خصوصیات ویژه جریان کاویتاسیونی
۳۳	۱-۳-۱- فشار و گرادیان فشار
۳۵	۱-۳-۲- سطوح مشترک بخار- مایع
۳۷	۱-۳-۳- اثرات دمایی
۳۷	۱-۴- اندازه برخی از مرتبه‌ها
۳۸	۱-۴-۱- پارامترهای بی بعد
۳۸	۱-۴-۲- عدد کاویتاسیون σ_v
۳۹	۱-۴-۳- عدد کاویتاسیون در شروع σ_{vi}
۴۰	۱-۴-۴- یک حفره تحت فشار نسبی σ_c
۴۱	۱-۵- برخی جنبه‌های تاریخی
۴۳	مراجع
۴۴	فصل ۲ - هسته و کاویتاسیون
۴۴	۲-۱- مقدمه

۴۴	..... ۱-۱-۲- کشش مایع
۴۵	..... ۱-۲- کاویتاسیون هسته‌ای
۴۶	..... ۲-۲- تعادل یک هسته
۴۶	..... ۱-۲-۲- شرط تعادل (بیک ۱۹۴۹)
۴۸	..... ۲-۲-۲- پایداری و فشار بحرانی یک هسته
۵۱	..... ۳-۲-۲- تغییر تدریجی هسته در یک ناحیه کم فشار
۵۲	..... ۳-۲- نفوذ جرم و حرارت
۵۲	..... ۱-۳-۲- رفتار حرارتی ظرفیت گاز
۵۵	..... ۲-۳-۲- نفوذ گاز و پایداری هسته
۶۱	..... ۴-۲- فروانی هسته
۶۱	..... ۱-۴-۲- روش‌های اندازه‌گیری
۶۵	..... ۲-۴-۲- شرایط برای شروع کاویتاسیون حبابی
۶۷	..... مراجع

۶۹	..... فصل ۳- دینامیک حباب‌های کروی
۶۹	..... ۱-۳- معادلات اساسی
۶۹	..... ۱-۱-۳- مقدمه
۶۹	..... ۲-۱-۳- فرضیات
۷۰	..... ۳-۱-۳- شرایط اولیه و مرزی
۷۱	..... ۴-۱-۳- معادله رایلی-پلست
۷۳	..... ۱-۵- بیان معادله رایلی-پلست در عبارت‌های تعادل انرژی
۷۳	..... ۲-۳- ترکیدن حباب بخار
۷۳	..... ۱-۲-۳- فرضیات
۷۴	..... ۲-۲-۳- سرعت سطح مشترک
۷۵	..... ۳-۲-۳- میدان فشار
۷۸	..... ۴-۲-۳- ملاحظه اثر کشش سطحی
۷۸	..... ۳-۳- انجار یک هسته
۷۸	..... ۱-۳-۳- سرعت مرز مشترک
۸۰	..... ۲-۳-۳- حالت تعادل ($p_{\infty} = p_{\infty 0}$)

۸۰	.....	-۳-۳-۳-۳- حالت رشد هسته ($p_{\infty} < p_{\infty 0}$)
۸۱	.....	-۴-۳-۳- معیار دینامیکی
۸۲	.....	-۳-۵- اظهارنظر در مورد دو حالت ویژه
۸۳	.....	-۴-۳- اثر لزجت
۸۴	.....	-۱-۴-۳- نوسانات خطی یک حباب
۸۵	.....	-۳-۴-۴- اثر لزجت بر انفجار یا ترکیدن حبابها
۸۶	.....	-۳-۵- نوسانات غیرخطی یک حباب
۸۷	.....	-۳-۶- بررسی ابعادی
۸۸	.....	-۱-۶-۳- شکل بدون بعد معادله رایلی - پلست
۸۹	.....	-۲-۶-۳- مقیاس‌های زمان مشخصه معادله رایلی - پلست
۹۰	.....	-۳-۶-۳- بحث کیفی معادله رایلی - پلست
۹۱	.....	-۳-۶-۴- حالت یک حباب انتقال یافته به نزدیک یک ورقه نازک فلزی
۹۲	.....	-۳-۷- پایداری سطح مشترک کروی
۹۷	.....	مراجع

۹۹	.....	فصل ۴- حباب‌ها در یک محیط غیرمتقارن
۹۹	.....	-۱-۴- مقدمه
۹۹	.....	-۲-۴- حرکت یک حباب کروی در یک مایع در حال سکون
۹۹	.....	-۱-۲-۴- حرکت انتقالی یک کره صلب در یک مایع در حال سکون
۱۰۱	.....	-۳-۲-۴- حرکت انتقالی با تغییرات لحظه‌ای حجم
۱۰۲	.....	-۳-۲-۴- کاربرد حبابها
۱۰۳	.....	-۳-۳-۴- تکامل تدریجی حباب غیر کروی
۱۰۳	.....	-۱-۳-۴- اصل مدل‌سازی عددی پلست - چاپمن
۱۰۴	.....	-۲-۳-۴- برخی نتایج کلی
۱۰۸	.....	-۳-۳-۴- روش تحلیلی بلیک
۱۱۳	.....	-۴-۴- مسیر یک حباب کروی
۱۱۹	.....	مراجع
۱۲۱	.....	پیوست مربوط به بخش ۳-۳-۴

۱۲۵	.....فصل ۵- نگرشی مجدد در زمینه فیزیک حباب‌ها
۱۲۵	۱-۱- اثر تراکم پذیری .....۱-۵
۱۲۵	۱-۱-۱- معادله حرکت حالت تیت .....۱-۵
۱۲۷	۱-۱-۲- معادلات پایه .....۱-۵
۱۲۸	۱-۱-۳- جواب شبه صوتی [هربنگ ۱۹۴۱ و تریلینگ ۱۹۵۲] .....۱-۵
۱۲۹	۱-۱-۴- روش گیلمور (۱۹۵۲) .....۱-۵
۱۳۳	۱-۲- سر و صدای حباب .....۱-۵
۱۳۳	۱-۲-۱- معادلات پایه .....۱-۵
۱۳۵	۱-۲-۲- نوسانات ضعیف حباب .....۱-۵
۱۳۵	۱-۲-۳- سر و صدای یک حباب در حال ترکیدن .....۱-۵
۱۳۷	۱-۳- برخی جنبه‌های حرارتی .....۱-۵
۱۳۷	۱-۳-۱- ایده تاخیر حرارتی .....۱-۵
۱۴۱	۱-۳-۲- آنالیز برنن (۱۹۷۳) .....۱-۵
۱۴۵	۱-۴- حل عددی نمونه .....۱-۵
۱۴۹	.....مراجع
۱۵۱	.....پیوست مربوط به بخش ۳-۱-۵ .....۳-۱-۵

۱۵۳	.....فصل ۶- سوپر کاویتاژیون
۱۵۴	۱-۱- جنبه‌های فیزیکی سوپر کاویتاژیون .....۱-۶
۱۵۴	۱-۱-۱- فشار حفره .....۱-۶
۱۵۵	۱-۱-۲- جدایی حفره .....۱-۶
۱۵۹	۱-۱-۳- بسته شدن حفره .....۱-۶
۱۶۰	۱-۱-۴- طول حفره .....۱-۶
۱۶۵	۱-۲- مدل سازی جریان ابر حفره با استفاده از تئوری جریان پتانسیل دائم .....۱-۶
۱۶۵	۱-۲-۱- پارامترهای مهم .....۱-۶
۱۶۷	۱-۲-۲- معادلات و شرایط مرزی .....۱-۶
۱۶۸	۱-۲-۳- مدل‌های بسته شدن حفره .....۱-۶
۱۷۱	۱-۲-۴- نگرشی بر روش‌های محاسباتی .....۱-۶
۱۷۲	۱-۳- نتایج نمونه .....۱-۶
	۱-۳-۱- حفره نامحدود پشت یک صفحه تخت در یک میدان جریان .....۱-۶

۱۷۳	نامحدود ($\sigma = 0$)
۱۷۴	۶-۲-۳- حفره محدود پشت یک جسم متقارن در یک میدان جریان نامحدود
۱۷۶	۶-۳- حفره محدود پشت یک قوس دایروی در یک میدان جریان نامحدود
۱۷۷	۶-۴- تغییرات ضرایب پسا و برآ با عدد کاویتاسیون
۱۷۹	۶-۵- اثر عمق فرورفتگی بر شیب منحنی ($C_L(\alpha)$)
۱۸۰	۶-۴- حفره‌های متقارن محوری
۱۸۰	۶-۴- حل مجانبی گارابدیان برای ابر حفره‌های دائم
۱۸۱	۶-۴-۲- تعادل اندازه حرکت و نیروی پسا
۱۸۳	۶-۴-۳- حل تحلیلی، تقریبی برای ابر حفره های دائم
۱۸۸	۶-۴-۴- ابر حفره‌های متقارن محوری غیر دائمی
۱۹۲	۶-۵- مسایل ویژه
۱۹۲	۶-۵-۱- ابر حفره دو بعدی غیر دائم
۱۹۴	۶-۵-۲- اثرات تراکم پذیری در جریان‌های سوپرکاویتاسیونی
۱۹۵	مراجع
۱۹۹	پیوست: رفتار غیر تحلیلی در جدایی

۲۰۲	فصل ۷- حفره‌های جزیی
۲۰۳	۱-۱- حفره‌های روی فویل‌های دو بعدی
۲۰۳	۱-۱-۱- الگوهای اصلی
۲۰۵	۱-۱-۲- بسته شدن حفره
۲۰۷	۱-۱-۳- طول حفره
۲۰۹	۱-۱-۴- اثرات سه بعدی ناشی از شیب خط بسته شدن
۲۱۱	۱-۱-۵- جاری شدن سه گانه روی هیدروفویل‌های دو بعدی
۲۱۱	۱-۲- حفره‌های جزیی در جریان‌های داخلی
۲۱۴	۱-۳- ناپایداری کاویتاسیون ابری
۲۱۴	۱-۳-۱- شرایط شروع ناپایداری کاویتاسیون ابری
۲۱۶	۱-۳-۲- رفتار کلی
۲۱۸	۱-۳-۳- فرکانس ضربهای
۲۱۹	۱-۳-۴- ضخامت جت
۲۲۰	۱-۴- دنباله‌های حفره‌های جزیی

۲۲۱	.....	۱-۴-۷
۲۲۲	.....	۲-۴-۷
۲۲۴	.....	۳-۴-۷
۲۲۴	.....	۴-۴-۷
۲۲۷	.....	۵-۴-۷
۲۲۹	.....	۶-۴-۷
۲۳۰	.....	۷-۴-۷
۲۳۱	.....	۱-۵-۷
۲۳۳	.....	۲-۵-۷
۲۳۸	.....	۶-۷
۲۴۱	.....	۷-۷
۲۴۳	.....	مراجع
۲۴۷	.....	پیوست: سرعت صوت در یک مخلوط مایع/ بخار با تغییر فاز

۲۵۰	.....	فصل ۸- حباب‌ها و حفره‌ها روی فویل‌های دوبعدی
۲۵۰	.....	۱-۸
۲۵۰	.....	۱-۱-۸
۲۵۰	.....	۱-۱-۸
۲۵۳	.....	۲-۱-۸
۲۵۶	.....	۳-۱-۸
۲۵۸	.....	۴-۱-۸
۲۶۲	.....	۲-۸
۲۶۲	.....	۱-۲-۸
۲۶۵	.....	۲-۲-۸
۲۶۷	.....	۳-۲-۸
۲۷۰	.....	۳-۳-۸
۲۷۰	.....	۱-۳-۸
۲۷۲	.....	۲-۳-۸
۲۷۳	.....	۳-۳-۸
۲۷۴	.....	۴-۸

۲۸۰	..... فصل ۹- ابر حفره های دمیده شده
۲۸۱	..... ۱-۱-۹- حفره های دمیده شده دو بعدی
۲۸۱	..... ۱-۱-۹- هیدروفویل دمیده شده
۲۸۲	..... ۲-۱-۹- پارامترهای اصلی
۲۸۴	..... ۳-۹-۱- طول حفره
۲۸۷	..... ۴-۱- نرخ جریان هوا و فشار حفره
۲۹۱	..... ۵-۱- رژیم های نوسانی
۲۹۴	..... ۶-۱- فرکانس نوسان
۲۹۶	..... ۴-۱- در نظر گرفتن مکانیزم نوسان
۲۹۹	..... ۲-۹- ابر حفره های دمیده شده متقارن محوری
۲۹۹	..... ۱-۲-۹- رژیم های مختلف حفره های دمیده شده
۳۰۰	..... ۲-۲-۹- تخلیه گاز از چرخش های مارپیچی شکل
۳۰۱	..... ۳-۲-۹- تغییر شکل محور حفره توسط گرانش
۳۰۲	..... ۴-۲-۹- تخلیه گاز با دو گردابه لوله ای تو خالی
۳۰۶	..... ۳-۹- تحلیل حفره های دمیده شده نوسانی
۳۰۶	..... ۱-۳-۹- معادلات پایه ای
۳۱۰	..... ۲-۳-۹- تحلیل معادله نوسان فشار
۳۱۲	..... ۳-۳-۹- مقایسه با آزمایش ها
۳۱۴	..... مراجع

۳۱۶	..... فصل ۱۰- کاویتاسیون گردابی
۳۱۷	..... ۱- نتایج تئوری
۳۱۷	..... ۱-۱-۱۰- قضایای پایه ای جریان های چرخشی
۳۱۸	..... ۲-۱-۱۰- اثرات مهم کاویتاسیون روی جریان های چرخشی
۳۱۹	..... ۱۰-۱-۳- گردابه کاویتاسیونی متقارن محوری

۳۲۲	- گردا به کاویتاسیونی مارپیچی	۱-۱-۴
۳۲۶	- گردا به نوک بدون کاویتاسیون	۱-۲-۲
۳۲۶	- تشکیل گردا به نوک	۱-۱-۲
۳۲۸	- مدل های گردا به در سیالات لرج	۱-۲-۲-۲
۳۳۰	- ساختمان گردا به نوک	۱-۲-۲-۳
۳۳۵	- کاویتاسیون در گردا به نوک	۱-۱-۳
۳۳۵	- قوانین مقیاس گذاری برای شروع کاویتاسیون	۱-۳-۱
۳۳۷	- ارتباط داده های کاویتاسیون با ضریب برآ	۱-۳-۲
۳۳۹	- اثر حجم هسته	۱-۳-۳
۳۴۱	- اثر محدودیت	۱-۳-۴
۳۴۴	مراجع	

۳۴۶	فصل ۱۱ - کاویتاسیون بر بشی	
۳۴۷	- کاویتاسیون جتی	۱-۱-۱
۳۴۸	- برخی نتایج آزمایشگاهی	۱-۱-۱-۱
۳۵۲	- برخی عوامل آنالیز کاویتاسیون جتی	۱-۱-۲-۲
۳۵۳	- کاویتاسیون دنباله	۱-۱-۲-۲
۳۵۴	- شروع کاویتاسیون در دنباله دیسک های دایروی	۱-۱-۲-۱
۳۵۵	- مدل سازی کاویتاسیون دنبال	۱-۲-۲-۲
۳۵۸	- کاویتاسیون دنباله یک گوه دو بعدی	۱-۲-۲-۳
۳۶۷	مراجع	

۳۷۰	فصل ۱۲ - فرسایش کاویتاسیون	
۳۷۱	- روش های تجربی	۱-۱-۱
۳۷۲	- برخی نتایج کلی	۱-۱-۲-۲
۳۷۲	- تاثیر سرعت جریان	۱-۲-۱-۲
۳۷۳	- تحول زمانی نرخ تلفات جرمی	۱-۲-۲-۲
۳۷۴	- تفاسیر گوناگون	۱-۲-۲-۳
۳۷۵	- مکانیزم های اساسی هیدرودینامیکی تجمع انرژی	۱-۲-۳-۱
۳۷۵	- ترکیدن و واجهش یک حباب کروی	۱-۳-۱

۳۷۶	.....-۲-۳-۱۲ میکروجت
۳۷۷	.....-۳-۳-۱۲ ترکیدن دسته جمعی
۳۷۷	.....-۴-۳-۱۲ چرخش‌های کاویتاسیونی
۳۷۸	.....-۴-۱۲ نفوذ یک جریان کاویتاسیونی
۳۷۹	.....-۱-۴-۱۲ نفوذ یک حباب در حال ترکیدن
۳۸۰	.....-۲-۴-۱۲ تست‌های سوراخ شدن
۳۸۳	.....-۳-۴-۱۲ اندازه‌گیری‌های نیرو
۳۸۷	.....-۴-۴-۱۲ قوانین مقیاس‌گذاری برای جریان مخرب
۳۹۰	.....-۵-۴-۱۲ رفتار مجانبی نرخ سوراخ شدن در سرعت‌های بالا
۳۹۲	.....-۵-۱۲ نگاهی درونی به واکنش مواد
۳۹۲	.....-۱-۵-۱۲ تقابل میان جریان مایع و دیواره جامد
۳۹۴	.....-۲-۵-۱۲ فرسایش کاویتاسیون و نرخ کرنش
۳۹۶	.....-۳-۵-۱۲ رابطه اتلاف حجم با انرژی ضربه
۳۹۷	.....-۴-۵-۱۲ مدل پدیده‌شناسی برای پیش‌بینی اتلاف جرمی
۴۰۲	.....مراجع

فهرست عالیم

ML^5T^{-2}		مقدار ثابت در قانون واندر والس	a
L^2T^{-1}	m^2/s	نفوذ حرارتی	
L	m	شعاع هسته لرج	
L	m	اندازه هارمونی کروی	a_n
L^3	m^3	مقدار ثابت در قانون واندر والس	b
		ضریب استپانوف	B
L	m	طول وتر	c
LT^{-1}	m/s	سرعت صوت	
$L^2T^{-2}0^{-1}$	$J/kg/^{\circ}K$	ظرفیت حرارتی در حجم و فشار ثابت	c_v, c_p
ML^{-3}	kg/m^3	تمرکز گاز حل شده در مایع	C_s
		ضریب فشار	C_p
		ضریب پسا	C_D
		ضریب برآ	C_L
		ضریب نرخ دبی	C_Q
		ضریب نفوذ جرم	D
L^2T^{-1}	m^2/s	قطر	
L	m	نیروی پسا	
LMT^{-2}	N	ضخامت حفره	e
L	m	نرخ تغییر شکل	
T^{-1}	s^{-1}	فرکانس	e_{ij}
T^{-1}	s^{-1}	عدد فرود	f
		آنالوگی	h
L^2T^{-2}	J/kg	ضریب انتقال حرارت جابجایی	
$MT^{-3}0^{-1}$	$W/m^2/^{\circ}K$	ثابت هنری	H
	s^{-1}/m^2	توان پلی تروپیک	k
L	m	فاصله منحنی الخط، طول المان	l, dl
L	m	طول حفره	ℓ

$L^2 T^{-2}$	J/kg	گرمای نهان تبخیر	L
MLT^{-2}	N	نیروی برآ	
$ML^{-2} T^{-1}$	$kg/m^2/s$	دبی جرمی گذرنده از واحد سطح	\dot{m}
MT^{-1}	kg/s	دبی جرمی از دست رفته	
M	kg	جرم ظاهری یک جسم غوطه ور	M
L^{-4}	$/cm^3/\Delta R$	توزیع دانسیته اندازه هسته	$n(R)$
L^{-3}	$/cm^3$	توزیع تمرکز هسته	N
$ML^{-1} T^{-2}$	Pa	فشار مطلق	P
$ML^{-1} T^{-2}$	Pa	فشار حفره	P_c
$ML^{-1} T^{-2}$	Pa	فشار جزیی بخار در یک حفره	P_g
$ML^{-1} T^{-2}$	Pa	فشار نقطه مرجع	P_r
$ML^{-1} T^{-2}$	Pa	فشار بخار در دمای T	$p_v(T)$
$ML^{-2} C$	$kg/m^2/s$	دبی جرمی گذرنده از واحد سطح	q
$ML^2 T^{-2}$	J	انتقال حرارت	Q
MT^{-1}	kg/s	دبی جرمی هوا	Q_m
L	m	محور شعاعی	r
L	m	شعاع حباب کروی	R
L	m	شعاع حفره متقارن محوری	
LT^{-1}	m/s	سرعت میانی حفره	\dot{R}
		عدد رینولدز	Re
MLT^{-2}	N	نیروی واردہ از مایع بر جسم غوطه ور	\bar{R}_p
L	m	فاصله منحنی الخط	s
L^2	m^2	سطح مقطع یک حفره	S
		عدد استروهال	
		کشش سطحی مایع	
T	s	زمان	t
$ML^{-1} T^{-2}$	Pa	تنش شعاعی	t_{rr}
θ	$^{\circ}K$	دمای مطلق	T
T	s	تناوب	
LT^{-1}	m/s	اندازه شعاعی سرعت	u
LT^{-1}	m/s	سرعت	v
L^3	m^3	حجم حفره یا حباب	v

LT^{-1}	m/s	سرعت نسبی عدد وبر	W We
L	m	مختصات کارتزین	x, y, z
علایم یونانی			
		زاویه حمله	α
$L^2 T^{-1}$	m^2/s	نفوذ حرارتی مایع	α_t
L	m	ضخامت لایه مرزی	δ
		اپراتور فواصل کوچک	Δ
		پارامتر کوچک	ϵ
		کرنش	
		فرکانس بدون بعد	φ
$L^2 T^{-1}$	m^2/s	پتانسیل سرعت	
		نسبت ظرفیت حرارتی	γ
$L^2 T^{-1}$	m^2/s	چرخش	Γ
$MLT^{-3} \theta^{-1}$	$W/m/^{\circ}K$	هدایت حرارتی	λ
L	m	طول موج	
$ML^{-1} T^{-1}$	kg/m/s	لزجت دینامیکی	μ
$L^2 T^{-1}$	m^2/s	لزجت سینماتیکی	ν
ML^{-3}	kg/m ³	دانسیته	ρ
$ML^{-1} T^{-2}$	Pa	تنش نرمال	σ
		عدد کاویتاسیون	σ_v
		عدد کاویتاسیون ابتدایی و انتهایی	$\sigma_{vir}, \sigma_{vd}$
		فشار نسبی داخل یک حفره تخلیه شده	σ_a
		زی فشار نسبی یک حفره توسعه یافته	σ_c
$LT^{-3/2}$	$m/s^{3/2}$	پارامتر ترمودینامیکی برنن	Σ
T	s	پارامتر زمان	τ
T	s	زمان رایلی برای ترکیدن حفره	
T^{-1}	/s	نرخ چرخش	ω
T^{-1}	/s	گردابه	Ω

ذیو نویس

حفره	c
مقدار مینیمم	min
گاز	g
بخار	v
مایع	ℓ
مقدار اولیه. مقدار متوسط	0
نقطه مرجع	r

۱- مقدمه

خصوصیات اصلی جریان‌های کاویتاسیونی

۱-۱- پدیده فیزیکی

۱-۱-۱- تعریف

کاویتاسیون یعنی پدید آمدن خفره‌های بخار در میان یک مایع از جنس همان مایع که در موقعیت‌های متفاوتی ایجاد می‌شود و بر اساس شکل جریان و خصوصیات فیزیکی مایع، می‌تواند مشخصه‌های مختلفی را از خود نشان دهد.

کاویتاسیون می‌تواند به عنوان درهم شکننده درون یک مایع تحت فشار بسیار کم، تعریف شود. این موضوع، کاویتاسیون را به شاخه مکانیک پیوسته مرتبط می‌کند و در مواردی که مایع ساکن یا متحرک است، به کار می‌رود.

این کتاب به طور خاص، به کاویتاسیون هیدرودینامیکی یعنی کاویتاسیون مایع‌های در جریان اختصاص داده شده است. این پدیده شامل جریان‌ها گذرنده از نازلهای گلوگاهی، گذرگاه‌های باریک (مانند شیرهای هیدرولیکی) یا اطراف بال‌ها یا تیغه‌های ملنخ پروانه‌ها می‌گردد. هرچند، کاویتاسیون می‌تواند در مایع ساکن و یا تقریباً ساکن نیز اتفاق بیفت. وقتی که محدوده فشار نوسانی بر سطح آزاد مایع درون یک مخزن اعمال شود، اگر دامنه نوسان به اندازه کافی بزرگ باشد، ممکن است حباب‌های کاویتاسیون در درون مایع ظاهر شوند. این نوع کاویتاسیون به نام کاویتاسیون صوتی شناخته شده است.

یک مثال دیگر از کاویتاسیون در مایعی تقریباً ساکن است که به طور ناگهانی و سریع از یک جسم صلب با لبه‌های تیز (مانند یک دیسک) در آب ساکن شتاب می‌گیرد. حباب‌ها در این لبه‌ها تقریباً به طور آنی ظاهر شده، در حالیکه که سرعت داخلی مایع قابل صرف‌نظر کردن باقی می‌ماند.

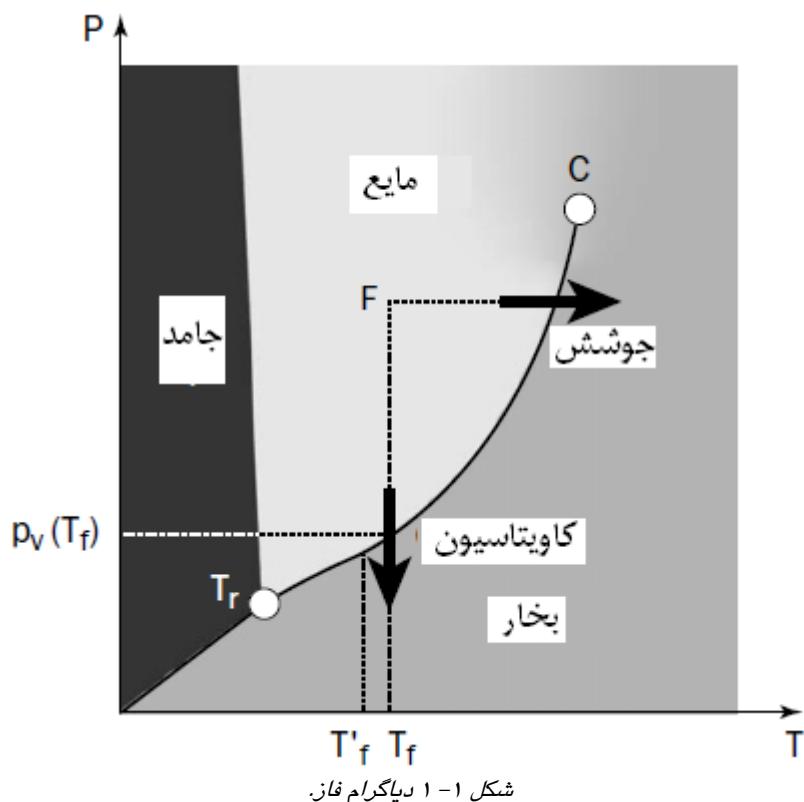
تعریف بالا از کاویتاسیون، مفهومی از یک آستانه فشار را مشخص می‌نماید که پایین‌تر از آن، چسبندگی مایع تضمین نمی‌گردد. به صورت ایده‌آل، آستانه فشار از مشاهده‌های فیزیکی در

یک مقیاس میکروسکوپی، تعیین می‌شود. توضیح حالت واقعی دانش علمی همراه با نیاز به راه حل‌های عملی برای اغلب سیستم‌های پیچیده صنعتی پذیرفته شده است. بهتر است فقط به خواص میکروسکوپی سیال رجوع شود.

یک مثال ساده که هر روز با آن سرو کار داریم، یک سرنگ است. جهت پر کردن سرنگ لازم است که پیستون نسبتاً آرام و آهسته حرکت داده شود، در غیر این صورت ستون مایع شکسته شده و پرشدن متوقف می‌شود. زیرا که افت فشار داخل سوزن به وجود می‌آید، فشار داخل سرنگ به مقدار زیر فشار اتمسفر افت می‌کند. اختلاف فشار با سرعت پیستون افزایش می‌باید. به علاوه، در دهانه ورودی سرنگ، در جایی که جریان یک جت مایع فرو برده شده است، نوسانات فشار آشفته اضافی اتفاق می‌افتد. هر دو فرآیند، باعث کاهش فشار محلی، احتمالاً به زیر فشار بخار مایع می‌شوند. به این ترتیب، بخار تولید می‌شود. پدیده مشابهی را می‌توان در پمپ‌های حجمی تزریق سوخت به موتورها دید. افت فشار و شتاب سریع ستون مایع، در فشارهای کم حاصل شده، که باعث کاویتاسیون می‌شود و پرسدن قسمتی از محفظه را در پی دارد.

۱-۲-۱- فشار بخار

مفهوم فشار بخار در ترمودینامیک کلاسیک، بهترین تعبیر را دارد. در نمودار فاز، مثلاً برای آب (شکل ۱-۱) منحنی از نقطه سه‌گانه T_c تا نقطه بحرانی C، نواحی مایع و بخار را جدا می‌کند. محل تقاطع این منحنی، نشان دهنده جابجایی معکوس‌پذیر تحت موقعیت‌های ساکن (یا تعادل) است. یعنی بخار شدن یا فشرده شدن سیال در فشار P_v ، به عنوان فشار بخار شناخته می‌شود و تابعی از دمای T است. بنابراین با کاسته شدن فشار در دمای تقریباً ثابت، کاویتاسیون می‌تواند در یک مایع پدید آید که اغلب به طور محلی، در جریان‌های واقعی اتفاق می‌افتد. بنابراین کاویتاسیون شبیه به جوشش ظاهر شده با این تفاوت که مکانیزم پیش برند تغییر دمانیوده و تغییر فشار عامل این حرکت است و غالباً بوسیله دینامیک حرکت سیال کنترل می‌گردد.



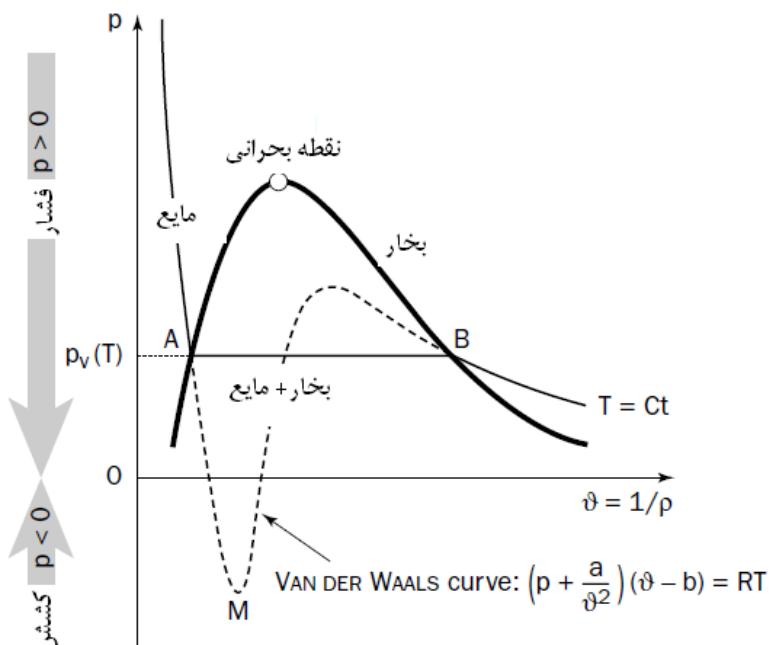
در بیشتر موارد (به طور خاص با آب سرد) برای شکل گرفتن حجم قابل توجهی از بخار، فقط مقدار کمی گرما نیاز است. بنابراین مایع محیط اطراف (منبع گرما برای بخارشدن) فقط تغییر دمای خیلی کوچک را نشان می‌دهد. مسیر در نمودار فاز، تقریباً دما ثابت است (شکل ۱-۱) را ببینید.

هر چند در بعضی موارد، جابجایی گرمای مورد نیاز برای بخار شدن به طوری است که تغییر فاز در دمای T'' ، پایین‌تر از دمای محیط (T) به وجود می‌آید. تفاوت دما، $T-T''$ ، در کاویتاسیون تاخیر دمایی نامیده می‌شود. این پارامتر وقتی دمای محیط به دمای بحرانی سیال نزدیک‌تر می‌شود، بزرگ‌تر است. این پدیده در مواردی از قبیل پمپ مایعات برودتی در موتورهای راکت مهم می‌شوند. این موضوع در فصل های ۵ و ۸ بررسی خواهد شد.

از نقطه نظر تئوری محض، مراحل متعددی در اولین لحظه کاویتاسیون قابل تشخیص است.

- سقوط کردن یا به وجود آمدن فضای خالی
- پر کردن این فضای خالی با بخار
- در نهایت اشباع با بخار

در واقع، این فازها به طور موثر مشابه قدم دوم، اگر خیلی سریع باشد، می‌تواند به طور قابل قبول، اشباع آنی فضای خالی با بخار فرض شده را توجیه نماید.
این موضوع نباید فراموش شود که مابین حالت‌های مایع و بخار، منحنی $P_v(T)$ یک مرز مطلق نیست. انحراف از این منحنی می‌تواند در تعییر فاز سریع به وجود آید.



شکل ۱-۱ منحنی هم‌دمای آندرو.

حتی در بیشتر شرایط استاتیکی در فشار پایین‌تر از p_v یک تعییر فاز ممکن است به وجود آید.
برای مثال، منحنی هم‌دمای آندرو^۱ را در نظر بگیرید. در نمودار $P-v$ جرم مخصوص و

^۱-Andrews-Isotherms

P جرم حجمی است (شکل ۲-۱) چنین نمودارهایی می‌تواند در نواحی مایع و بخار توسط معادله حالت واندروالس^۱ تقریب زده شود. در مسیر A-M، می‌توان از تغییر حالت مایع به بخار جلوگیری کرد. این آزمایش لازم است با دقت خاصی انجام شود. در طی این مسیر، مایع در حالت پایداری موقع است و حتی می‌تواند در مقابل فشارهای مطلق منفی مقاومت کند. یعنی بدون هیچ تغییر فازی، تحت کشش قرار گیرد.

نتیجه این که وقتی در دمای سیستم جهانی، فشار مطلق محلی با فشار بخار مساوی باشد، تضمینی نیست که در همه موارد کاویتاسیون واقعاً به وجود بیاید. تفاوت فشار بخار و فشار واقعی در شروع کاویتاسیون، تاخیر استاتیکی نامیده می‌شود.

همچنین در برخی موارد، یک تاخیر دینامیکی به دلیل پدیده اینرسی همراه با زمان ضروری برای حفره‌های بخار قابل مشاهده است.

۱-۱-۳- اشکال اصلی حفره‌های بخار

کاویتاسیون وقتی که از آغاز توسعه پیدا می‌کند می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. در ابتدا طور قوی، به شکل جریان اصلی بدون حباب بخار وابسته است. هر چند با توسعه این پدیده، ساختار بخار تمایل به آشفتگی و اصلاح جریان اصلی پیدا می‌کند. الگوهای کاویتاسیون می‌تواند به سه گروه تقسیم شود. این گروه‌ها عبارتند از:

حباب‌های ایزوله شده گذرا

این حبابها در ناحیه فشار پایین به عنوان نتیجه‌ای از پدیدار شدن رشد سریع هسته‌های هوای بسیار کوچک موجود در مایع پدید می‌آیند (فصل ۲ تا ۵ و فصل ۸ را ببینید). آنها در امتداد جریان حمل شده و وقتی وارد نواحی پر فشار ناپدید می‌شوند.

حفره‌های ورقه‌ای یا چسبیده

چنین حفره‌هایی اغلب به لبه اصلی بدنه چسبیده‌اند که به عنوان مثال می‌توان در سمت فشار پایین پره‌ها و بال‌ها آنها را مشاهده نمود (بخش‌های ۶ تا ۸ را ببینید).

¹ -Vander Waals