

آزمایش کاویتاسیون

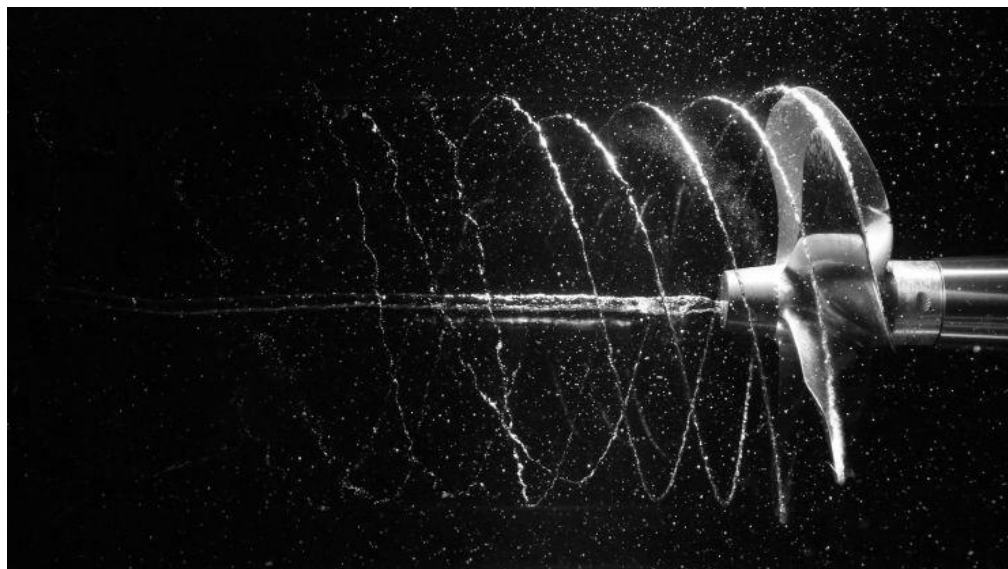
تهیه و تنظیم: بهنام پناهی

هدف آزمایش

در این آزمایش، ضمن تلاش برای یافتن نقطه کاویتاسیون و درک رویدادهای همراه این نقطه، به بررسی تابعیت کاویتاسیون از دبی سیال و رفتار سیال در دبی های کمتر و بیشتر از نقطه بحرانی کاویتاسیون پرداخته می شود.

مقدمه

هرگاه دمای مایع، در فشار ثابت افزایش و یا فشار آن در دمای ثابت، کاهش یابد، در نهایت حالت مایع شروع به تغییر کرده و حبابهای پر شده از بخار آب و یا گاز تولید می گردند. این حبابها را می توان به عنوان فضاهای خالی در مایع در نظر گرفت. (در زبان انگلیسی کاویتی Cavity نام دارند). بنابراین هم به وسیله افزایش دما در فشار ثابت و هم کاهش فشار دینامیکی در دمای ثابت، حباب در مایع به وجود می آید. نخستین روش جوشیدن (Boiling) و دومین روش کاویتاسیون نام دارد. هنگامی که سیالی در لوله ای با سطح مقطع متغیر جاری می شود، طبق قوانین حاکم بر سیالات، حین عبور از مقاطع تنگ (مثل گلوگاه یک ونتوری) دچار افزایش سرعت و به دنبال آن افت شدید فشار می گردد. این افت فشار می تواند تا رسیدن به فشار بخار مایع در دمای محیط ادامه یافته، منجر به جوشش مایع جاری و ظهور حباب های ریز بخار سیال شود. از آنجا که میزان افت فشار مایع، با دبی آن رابطه مستقیم دارد، اولین دبی که برای یک هندسه خاص ناقل جریان منجر به بروز کاویتاسیون می شود، نقطه بحرانی کاویتاسیون سیال نامیده می شود، که تابعی از دمای محیط و خصوصیات ترمودینامیکی سیال نیز هست. این حباب ها با رسیدن به مناطق پرفشارتر مایع، در هم می شکنند و انرژی زیادی آزاد می کنند، که بسته به موقعیت کاویتاسیون، می تواند بسیار مخرب یا مفید باشد.



تئوری

آزمایش

• جوشش سیال

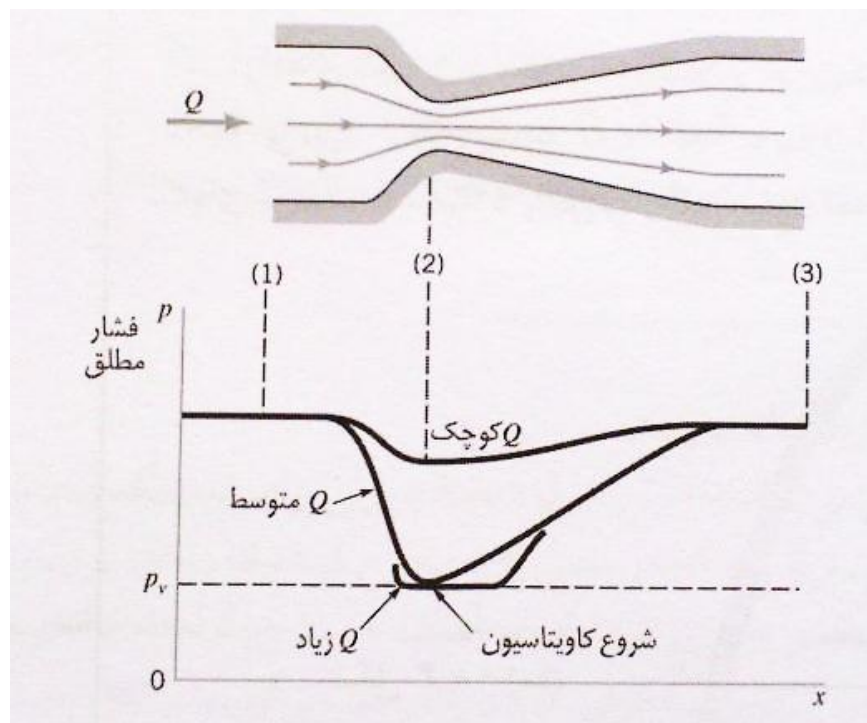
مواد در فاز مایع خود، همواره می توانند به فاز گاز تبدیل بشوند و این دو فاز ماده در تعادل با همدیگر هستند. به فشار فاز گازی ماده، فشار بخار گفته می شود، که تابعی از دما و خواص ترمودینامیکی و ذاتی ماده است. با افزایش دما، ماده بیشتتری از فاز مایع به گاز می رود و به عبارت دیگر، فشار بخار ماده افزایش می یابد. با رسیدن فشار بخار ماده به فشار مایع (که برابر فشار محیطی ماده است)، ماده با ظهور حباب های بسیار از فاز مایع به فاز گاز مهاجرت می کند. این برابری فشار بخار مایع با فشار خود مایع، می تواند در اثر افزایش دما مایع یا کاهش فشار مایع باشد. در صورت اول، به پیامد آن جوشش و در حالت دوم به پیامد آن کاویتاسیون می گویند. البته تبخیر شدن مایع می تواند پیامد تغییرات همزمان فشار و دمای مایع باشد.

با نگاهی به قانون برنولی و رابطه، روشن می گردد که افت فشار مایع در جریان در لوله با سطح مقطع متغیر، از افزایش سرعت سیال عبوری ناشی می گردد. هم چنین چنان است که با افزایش دبی سیال، این افت فشار شدیدتر می گردد. به این ترتیب در یک ونتوری یا اوریفیس، در گلوگاه به دلیل سطح مقطع کوچک آن، فشار مایع دچار افت ناگهانی و شدیدی می شود.

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \quad \text{معادله 1}$$

• معیارها و خواص

با افت فشار سیال در گلوگاه، فشار مایع عبوری به فشار بخار آن نزدیک می شود، تا اینکه با افزایش بیستر دبی و افت بیشتر فشار مایع، این دو فشار برای بار نخست در گلوگاه با هم برابر می شوند و کاویتاسیون در گلوگاه آغاز می گردد. تا به امروز چگونگی این فرآیند دقیقاً روشن نشده و دانشمندان در مورد سازوکار آغاز این پدیده به اتفاق نظر نرسیده اند؛ گرچه به نظر می رسد آغاز این پدیده متأثر از تشکیل حباب های ریز اولیه، موسوم به هسته، باشد. در مورد سازوکار فرآیند هسته زایی چند تئوری وجود دارد که مورد توافق ترین آن ها "هسته زایی همگن" نام دارد.



شکل 2. نمودار تغییر فشار با سطح مقطع و توری

پدیده کاویتاسیون که به صورت ظهور حباب های ریز و فراوان بخار در جریان مایع مشاهده می شود و معمولاً با صدای زیر و هیس ماندنی همراه است، با رسیدن حباب ها به مقاطع بزرگتر لوله، که فشار مایع در آن جا از فشار بخار مایع بیشتر است، با درهمپاشی حباب ها ناپدید می شود. این فروپاشی حباب ها منجر به آزادسازی نیروی بسیاری می گردد و ایجاد فشارهای بسیار زیاد -از حدود ۷۰۰ مگا پاسکال- در نزدیکی حباب را به همراه دارد. اگر این فروپاشی در نزدیکی مرز های فیزیکی روی دهد، ضربه های سختی به سطح می زند. مولفه نام دارد. این (CA) ای برای سنجش شدت کاویتاسیون در یک رژیم جریانی تعریف شده، که عدد کاویتاسیون مولفه که نسبت میزان فشار لازم برای فروپاشی به ایجاد حباب های کاویتاسیون را نشان می دهد، با شدت کاویتاسیون در یک جریان مایع، رابطه عکس دارد. در نقطه آغاز کاویتاسیون، این عدد برابر عدد بحرانی خواهد بود. بنابراین، هرچه عدد بحرانی کاویتاسیون کوچکتر باشد، سیستم دیرتر (CA_i) کاویتاسیون کاویتاسیون را آغاز می کند و بالعکس. عدد بحرانی کاویتاسیون، تابع عواملی مانند دما، جنس و خواص ترمودینامیکی سیال و هندسه و نوع رژیم جریان است.

$$CA = \frac{P_a - P_b}{1/2 \rho v^2} \quad \text{معادله 2}$$

ρ چگالی مایع، P_a فشار مطلق مایع، P_b فشار حباب و V سرعت نسبی بین شناور و مایع می باشد.

• اثرات مخرب کاویتاسیون

کاویتاسیون، به دلیل نیروی فراوانی که حباب ها در حین فروپاشی به سطوح جامد اطراف خود اعمال می کنند، به شدت برای این سطوح مخرب است و در دراز مدت این سطوح را دچار فرسایش شدید کرده، آثاری مانند برخورد گلوله بر روی آنها برجای می گذارد. در شدت های پایین تر، این پدیده با ایجاد سروصدا و ارتعاشات فراوان در دستگاه همراه است و به شدت از راندمان آن ها می کاهد. از جمله دستگاه های در معرض آسیب این پدیده، پره های موتور پیشران لوازم حمل و نقل دریایی و پمپ های انتقال سیالات است. همچنین این پدیده در لبه سرریزهای آبراه ها هم مشاهده می شود و خوردگی های حادی را در این لبه ها ایجاد می کند. از جمله راه های پیشگیری از ایجاد این پدیده در پمپ ها، بیشتر نگه داشتن $(NPSH_a)$ انرژی در دسترس پمپ از حداقل انرژی مورد نیاز پمپ $(NPSH_r)$ ، که عمدتاً در کاتالوگ ارائه شده از سوی سازنده موجود است، پایین نگه داشتن دمای مایع پمپ شونده، آب بندی صحیح پمپ، به کار بردن دو پمپ کوچکتر به جای یک پمپ بزرگ، افزایش قطر لوله خروجی پمپ و یا بالا نگه داشتن سطح مایع آزاد پمپ شونده است.



شکل 3. • اثرات مخرب کاویتاسیون

• استفاده از کاویتاسیون

همانطور که اشاره شد پدیده‌هایی مانند کاویتاسیون و ضربه قوچ اثرات مخرب زیادی را در یک سیستم آبی و توربوماشین اعمال می‌کنند. اما کاویتاسیون به صورت کلی پدیده مخربی نیست و کاربردهای عملی بسیار زیادی نیز دارد. برخلاف بسیاری از صنایع که به دنبال حذف احتمال بروز این پدیده در محصولات خود هستند، صنایعی مانند پزشکی نیز وجود دارند که به دنبال ساخت تجهیزاتی برای ایجاد پدیده کاویتاسیون و استفاده از اثرات آن هستند.

در علم پزشکی از پدیده کاویتاسیون فراصوت برای از بین بردن سنگ کلیه و درمان تعدادی از سرطان‌ها استفاده می‌شود. درواقع جریان فراصوت متمرکز با شدت بالا، کاربرد بسیار زیادتری نسبت به روش‌های سنتی دارد. تحقیقات بسیار گسترده‌ای نیز در علم پزشکی انجام شده، که هدف آن‌ها تخریب بافت‌های بیمار بدن به کمک پدیده کاویتاسیون است.

پدیده کاویتاسیون در صنعت تولید شیر نیز برای همگن‌سازی محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانطور که می‌دانید، چربی به صورت طبیعی بالای سطح شیر جمع می‌شود و فرایند همگن‌سازی با شکستن چربی در این محصولات، مخلوط یکنواختی را تولید می‌کند. کاویتاسیون در تصفیه آب نیز کاربرد بسیار زیادی دارد و برای مثال محصول DynaJets با استفاده از کاویتاسیون اجزای مضر را تخریب می‌کند.

علاوه بر موارد بالا، «کاویتاسیون گسترده» (Supercavitation)، کاربرد بسیار زیادی در صنایع دریایی دارد. برای مثال از این پدیده برای افزایش ماکزیمم سرعت دستگاهی مانند زیردریایی استفاده می‌شود. کاویتاسیون گسترده، همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، پدیده‌ای است که طی آن حباب‌های بزرگی، تقریباً تمام جسم را پوشانده است. در این شرایط با دور راندن آب از اطراف جسم، «نیروی پسا» (Drag Force) به شدت کاهش می‌یابد. این مورد در شکل زیر به تصویر کشیده شده است.

برخی از جانوران دریایی نیز از پدیده کاویتاسیون برای شکار طعمه خود استفاده می‌کنند. به طور خاص گونه‌ای از میگوها با حرکت سریع پنجه خود باعث وقوع پدیده کاویتاسیون می‌شوند و در صورتی که ضربه پنجه آن‌ها نیز به طعمه برخورد نکند، شوک ناشی از آن برای کشتن طعمه کافی است.

شکل دستگاه



شکل 4. شمای کلی دستگاه آزمایش

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش به صورت شماتیک از یک ونتوری شفاف با مقطع مستطیل تشکیل شده است، که به وسیله شیر کنترلی که زیر روتامتر قرار گرفته دبی جریان عبوری از آن که توسط یک پمپ سانتیفریوژ تامین می‌شود، تغییر می‌کند. در ورودی، گلوگاه و خروجی لوله ونتوری، حسگرهایی جهت اندازه گیری فشار مایع قرار داده شده اند. مساحت سطح مقطع ورودی و گلوگاه ونتوری به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۱۳ میلی متر مربع است.

$$A_i = 40 \times 5 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$A_t = 2.6 \times 5 \text{ (mm}^2\text{)}$$

روش انجام آزمایش

پمپ را روشن می‌کنیم. توسط شیر کنترل دبی سیال را زیاد می‌کنیم تا در گلوگاه ونتوری حباب‌ها قابل تشخیص باشد (ظهور حباب‌های کاویتاسیون، با تولید صدای خاصی مانند هیس همراه است). میزان دبی و فشار ورودی، گلوگاه و خروجی لوله ونتوری را یادداشت می‌کنیم. این عمل را برای چند نقطه قبل و بعد از کاویتاسیون تکرار می‌کنیم. برای کار با این دستگاه نحوه استفاده از فشار سنج‌های گیج باید مورد توجه خاصی قرار بگیرد، چرا که بر روی پنل دستگاه از گیج - ۱ تا ۰,۶ بار استفاده شده است که بسیار حساس است.

دستگاه دو عدد فشارسنج گیج با دامنه - ۱ تا ۶ و - ۱ تا ۰,۶ بار دارد. با استفاده از اتصالات، و ۵ شیر این دو فشارسنج می‌توانند فشار سیستم را در سه نقطه نمایش دهند. این سه نقطه، مربوط به قبل گلوگاه، گلوگاه و بعد از گلوگاه است. پس از روشن کردن پمپ ابتدا شیر ۱ باز می‌شود. اگر فشار نمایش داده شده کم بود، شیر ۲ باز شده و فشار سنج حساس تر خوانده می‌شود؛ وگرنه با همان فشارسنج اول این کار انجام شود. برای فشار گلوگاه فقط یک شیر، متصل به فشارسنج - ۱ تا ۰,۶ بار وجود دارد که از همان استفاده می‌شود. برای اندازه گیری فشار نهایی ابتدا شیر ۵ باز شده، اگر مانند قبل از گلوگاه فشار از ۰,۶ بار کمتر بود، با شیر شماره ۴ و فشار سنج حساس تر کار می‌شود، در غیر اینصورت با همان فشار سنج - ۱ تا ۰,۶ بار فشار خوانده شود. توجه شود که در هر لحظه فقط یک شیر باید باز باشد و شیرهای قبلی باید بسته شده باشند.

خواسته‌ها

- ۱- منحنی های افت فشار در دو سر ونتوری و فشار مطلق گلوگاه ونتوری را بر حسب دبی رسم کنید.
- ۲- چنانچه دبی عبوری از ونتوری Q ، مساحت سطح مقطع ورودی A و مساحت سطح مقطع گلوگاه A_t باشد، رابطه اختلاف فشار گلوگاه و ورودی را به دست آورید. (از افت فشار صرف نظر می‌شود).
- ۳- رابطه حداکثر ارتفاع نصب بین پمپ از سطح مخزن پر از آب را با در نظر گرفتن NPSH بدست آورید.
- ۴- با استفاده از جدول، فشار کاویتاسیون را تعیین کنید و با فشار اندازه گیری شده مقایسه کرده و علل اختلاف آن ها را شرح دهید.