

## روشهای تست تخریب کاویتاسیون

سید احمد نوربخش

دانشیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

رامبد رایگان

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۸/۴/۱۳، تاریخ تصویب ۷۸/۹/۱۳)

### چکیده

تخریب ناشی از کاویتاسیون در کشورهای زیادی و با روشهای متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی روشهای تستی که نسبت به سایر روشها از دایره کاربرد وسیعتری برخوردارند پرداخته شده و مزایا و معایب هر کدام از آنها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از آن تفسیر نتایج حاصل از این آزمایشها ارائه شده است. عوامل بروز اختلاف بین نتایج تستها با موارد عملی معرفی شده‌اند که تلاش برای رفع این عوامل زمینه‌ای برای توسعه‌های آینده این تستها محسوب می‌شود. نتایج مطالعات انجام شده، جهت تست کاویتاسیون در پمپ‌های سانتریفوژ اعمال گردید. همچنین مدار تست طراحی و ساخت آن در دست اتمام است.

**واژه‌های کلیدی:** تست تخریب کاویتاسیون، تکنیک ارتعاشی، جت سیال، جام آکوستیک، تونل آبی، لوله متقارب

### مقدمه

شود که این اختلافات حذف شوند یا کمترین اثر ممکنه را داشته باشند.

این نکته قابل توجه است که بیشتر تستهای انجام شده برای این پدیده از نوع تسریعی هستند و نتایج حاصله از برونمایی داده‌ها از قابلیت اعتماد کمتری برخوردارند. خسارات سنگین و حتی فاجعه آمیز کاویتاسیون آنچنان که شناخته شده‌اند طی ساعتها برجسم اعمال می‌شوند. خسارات مشابهی را می‌توان در آزمایشگاه تولید نمود ولی در این راه مشکلاتی وجود دارد که ما را ملزم به استفاده از تستهای تسریعی می‌نماید.

نکته دیگری که باید به آن اشاره شود اینست که خرابیهای ناشی از کاویتاسیون به شیوه‌های مختلفی ایجاد می‌شوند و عوامل ظهور متفاوتی دارند که برای هر کدام از آنها عوامل آزمایشگاهی مشابهی وجود دارد. بعنوان مثال در خوردگی ناشی از کاویتاسیون بر روی یک هیدروفویل می‌توان از یک تونل تست کاویتاسیون استفاده نمود و یا برای کچلی<sup>۲</sup> سمت آب سیلندر موتور دیزل از تست ارتعاشی بهره‌برد. در حالت اخیر از آنجائیکه جسم می‌تواند تحت تنش موجهای شوک ناشی از ترکیدن حفره‌های مجزا و منفرد قرار گیرد، تحت تنش قرار دادن نمونه با ضربات متوالی مایع نیز می‌تواند مناسب باشد. بنابراین تشخیص روش تست مناسب برای هر مورد خاص نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

علیرغم فعالیتهای بسیار در زمینه تحقیقات بر روی تخریب ناشی از کاویتاسیون طی سالهای گذشته بسیاری از مسائل هنوز حل نشده باقی مانده‌است. مسلماً تغییر مواد مورد استفاده در پمپها و توربینهای آبی هزینه کمتری از جبران خسارتهای ناشی از پدیده کاویتاسیون خواهد داشت. ولی مسئله اصلی اینست که دلایل برتری بعضی مواد خاص بطور کامل درک نشده‌اند و خرابی حاصله نیز قابل پیش بینی نیست. با توجه به مطالب فوق و غیر اقتصادی بودن آزمایشها بر روی ماشینهای با ابعاد اصلی، چنین بنظر می‌رسد که مقوله تست کاویتاسیون، اعم از تسریعی<sup>۱</sup> و غیر تسریعی تا سالهای متمادی جای کار و فعالیت داشته باشد.

در عصر توسعه کنونی، لازم است رفتار هر ماده جدید، سریع و به دقت تعیین شده و اثرات محیط‌های جدید همچون گازها، سوخت هواپیماها، روغن‌های هیدرولیک و سایر سیالات روی آن بخوبی مورد ارزیابی قرار گیرد. ممکن است بعضی از موارد فوق همانند آب اهمیت ویژه‌ای داشته و عواقب جدی نیز بدنبال داشته باشد.

مسئله سؤال برانگیز دیگر قابلیت اعتماد به تستهای تسریعی است. چون تستهای متفاوتی وجود دارند که از لحاظ کیفی مشابه یکدیگرند ولی بین روابط تجربی بنا نهاده شده بر داده‌های تستها تفاوتی وجود دارد. در این زمینه دو کار باید انجام پذیرد. اول اینکه دلایل اختلاف معلوم گردند. دوم اینکه فرآیند تستی طرح

کریستال‌های پیزوالکتریک و یک مبدل سرعت بشکل یک قوس نمایی<sup>۳</sup> بود. این ایده از طرح میسون<sup>۴</sup> در سال ۱۹۴۵ نشأت گرفته است. اگر چه یک کریستال فقط قادر به تولید بخشی از ارتعاش میکرومتری بدون شکست است، این حرکت مکانیکی را می‌توان با استفاده از قوس نمایی، ده برابر بزرگتر کرد. در شکل (۱) یک دستگاه تست ارتعاشی ۲۰ kHz با قوس نمایی که در دانشگاه میشیگان مورد استفاده قرار گرفته نشان داده شده است. این دستگاه دارای ۲-۳ mil<sup>۵</sup> دامنه سر به سر<sup>۶</sup> است و شتابی حداکثر برابر ۶۰۰۰۰g ایجاد می‌کند.

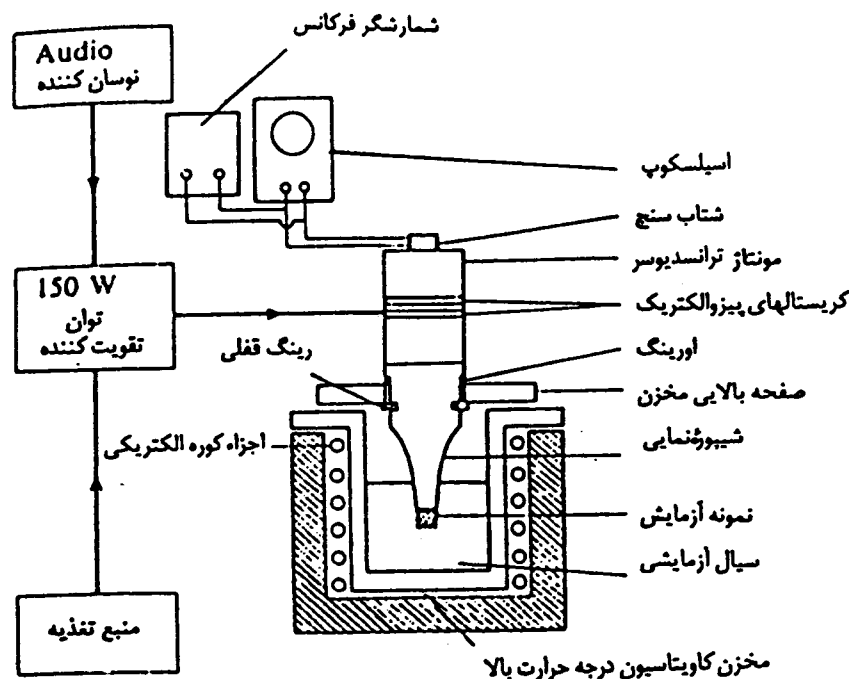
با وارد شدن ترانسند یوسرهای اولتراسونیک در حیطه حفاری و ماشین کاری و امکان استفاده از وسایل کارا تر جهت تحقیقات کاویتاسیون، آزمایشگاه ملی مهندسی<sup>۷</sup> نیز واحدی از دستگاه ارتعاشی را با بکارگیری امکانات مذکور تولید نمود. ترانسدیوسر این واحد شامل تعدادی ورقه نیکل است که در احاطه یک ژاکت آبی قرار دارد. برای ایجاد ارتعاشاتی با اندازه مناسب در قطعه مورد آزمایش از مبدل‌های سرعت استفاده می‌شود. این مبدل‌ها می‌توانند سرعت را بصورت نمایی یا پله‌ای کاهش دهند که نوع دوم آن ارزانتر بوده و بیشترین نسبت تغییر در سرعت را بوجود می‌آورد، همچنین به آسانی به کار برده می‌شود. طول مجموعه مبدل سرعت و قطعه مورد آزمایش بگونه‌ای انتخاب شده است که فرکانس نوسانات

هدف اصلی تست کاویتاسیون همانگونه که به آن اشاره شد بررسی اثر خوردگی سیالات گوناگون روی مواد مختلف در معرض تخریب است و از آنجائیکه این بررسی جنبه مقایسه‌ای دارد و مقاومت مواد مختلف در برابر خوردگی را نسبت به هم نشان می‌دهد ممکن است در بعضی از روشهای تست ارائه شده در این مقاله، مکانیزم خوردگی دقیقاً همان مکانیزم تخریب ناشی از فروپاشی حبابهای کاویتاسیونی را شبیه سازی ننماید. با این توضیح به ارائه روشهای مورد نظر می‌پردازیم.

## روش خوردگی ارتعاشی کاویتاسیون

در این روش پدیده خوردگی با ایجاد شتابهای شدید در نمونه تحت آزمایش که در مایع مورد نظر غوطه ور است شبیه سازی می‌شود. این روش از جمله موارد تست مقاومت مواد در برابر خوردگی است که تخریب حاصله از آن به دلیل ترکیدن حبابهای ناشی از کاویتاسیون صورت نمی‌گیرد.

اولین نمونه از این وسیله که دارای یک لوله نیکیلی تشدید طولی بود در سال ۱۹۳۲ توسط گینس<sup>۱</sup> ساخته شد. این وسیله بعداً در انستیتو تکنولوژی ماساچوست<sup>۲</sup> توسعه داده شد و برای مطالعه خسارات ناشی از کاویتاسیون بکار رفت. در طی سالهای بعد از آن چندین وسیله تست ارتعاشی کاویتاسیون ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. یک قدم بزرگ در این راه استفاده از



شکل ۱: دستگاه کاویتاسیون ارتعاشی (۲۰ kHz) مورد استفاده قرار گرفته در دانشگاه میشیگان.

1 - Gaines

2 - Massachusetts Institute of Technology

3 - Exponential Horn

4 - Mason

۵ - هر mil برابر یک هزارم اینچ یعنی ۲۵/۴ μm است

6 - Peak-to-Peak Amplitude

7 - National Engineering Laboratory

لیتاروویج نسبتی را تعریف می‌کند  $\sigma = P_d/P_u$  که نسبت نیروی مقاوم در برابر کاویتاسیون به نیروی ایجاد کننده آن است. ماده قرار داده شده در محفظه تست به دلیل ترکیدن حبابهای کاویتاسیون واقع در جت دچار خوردگی می‌شود که می‌توان مقدار آنرا با وزن کردن نمونه بدست آورد. نتایج را می‌توان در نموداری بصورت خوردگی رو به افزایش<sup>۲</sup> برحسب زمان نمایش داد. CER کل کاهش وزن تقسیم بر زمان سپری شده است. آزمایش های انجام شده در یک عدد کاویتاسیون ثابت برای مقدار مشخص L که در آن CER حداکثر مقدار خود را داراست نشان می‌دهد که در این نقطه  $CER \propto P_u^n$  است (n برای روغن هیدرولیک ۴ است). هرچه  $\sigma$  زیاد می‌شود، n کاهش می‌یابد. برای آب هم رابطه‌ای مشابه وجود دارد و با افزایش  $\sigma$ ، n به بین ۳ تا ۵ کاهش می‌یابد. لیتاروویج با استفاده از عکاسی سرعت بالا متوجه شد که کاویتاسیون در اثر انفجارهایی اعمال می‌گردد که به شکل ابرهای مجزایی که همراه با جت سیال حرکت می‌کنند ظاهر می‌گردند. بعلاوه یک رشته گردابه‌ای که مثل پیچ به نظر می‌آید در اطراف جت دیده می‌شود. این گردابه هم در نزدیکی نازل و هم در نزدیکی ماده مورد آزمایش دیده می‌شود.

روش فوق امتیازات بسیاری بر دیگر روشهای معمول تست خوردگی دارد. وسیله آزمایشگاهی آن کوچک است و از اثرات جریان برای ایجاد کاویتاسیون استفاده می‌کند و تمام قابلیت‌های روشهای با ونتوری را دارد. در روش جت می‌توان زمان تست را با تنظیم فشار بالا دست به دلخواه تغییر داد و اثرات جت سیال را به سادگی با حفظ عدد کاویتاسیون کم و زیاد نمود.

در روش دوم مکانیزم تخریب، از نوع تخریب ناشی از کاویتاسیون نمی‌باشد و عامل اصلی تخریب، سایش حاصل از جت سیال است. برای توضیح این روش به شرح عملکرد دستگاهی که توسط N.E.L. ساخته شده و ماشین ضربه ریزش مایع<sup>۳</sup> نامیده شده است می‌پردازیم.

در این روش، نمونه‌هایی روی طوقه چرخ‌کی که قادر است با سرعتی تا ۱۵۰۰۰ rpm بچرخد نصب می‌شوند. تحت شرایط تست این نمونه‌ها در برخورد با دو جت سیال موازی با محور چرخ قرار می‌گیرند. در نتیجه تکرار این ضربات، ماده بسرعت از منطقه ضربه واقع در وجوه جلویی قطعه مورد آزمایش جابجا می‌شود. کاهش وزنی که قابل اندازه‌گیری باشد طی چند دقیقه به وقوع می‌پیوندد و همزمان می‌توان چهار نمونه را مورد آزمایش قرار داد. سرعت دیسک تا دقت ۱ در هزار قابل تنظیم است که بطور اتوماتیک تا همین مرحله دقت نیز کنترل می‌شود. سیال توسط

طولی آن برابر فرکانس نوسانات طولی ورقه‌های نیکل گردد. در این صورت کل سیستم به حالت تشدید می‌رسد. شدت کاویتاسیون تولید شده توسط این وسیله تابعی از دامنه نوسان است. دامنه سربه سر ۰/۰۰۲ اینچی که برای ایجاد خوردگی روی  $\frac{3}{4}$  مساحت قطعه مورد آزمایش کافیتست بطور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه مورد نظر با استفاده از ولتاژ تولید شده توسط یک کرنش سنج کریستالی که به بدنه ترانسدیوسر متصل است کنترل می‌شود. کالیبراسیون کرنش سنج با اندازه‌گیری نوری حرکت کل قطعه انجام می‌شود.

از مزایای روش ارتعاشی اینست که با حجم کمی از سیال و حتی با سیالات غیر آبی می‌توان آزمایش را انجام داد. دستگاه از اصول ساده‌ای تبعیت می‌کند، زیاد گران قیمت نیست و تنها به قدرتی متوسط نیازمند است. از دیگر مزایای آن اینست که می‌توان اثرات محیطی مورد نظر را بررسی و ارزیابی نمود.

از معایب این دستگاه اینست که نمونه تحت شتابهای قابل ملاحظه‌ای قرار می‌گیرد که منجر به ایجاد تنشهایی در جسم واری آنچه توسط هر کاویتاسیونی ایجاد می‌شود، می‌گردد. در این روش اندازه ارتعاشات باید به دقت تنظیم و کنترل گردد و برای رسیدن به نتایج هماهنگ و سازگار، طبیعت فیزیکی و شیمیایی سیال مورد استفاده در تست نیز باید ثابت باقی بماند.

### تست خوردگی با استفاده از یک جت سیال

در بهره‌گیری از یک جت سیال برای بررسی مقاومت مواد در برابر خوردگی ناشی از کاویتاسیون به دو شیوه می‌توان عمل نمود. در شیوه اول عامل اصلی تخریب، فروپاشی حبابها بوده و مکانیزم تخریب از نوع تخریب ناشی از کاویتاسیون است.

کارهای بسیار خوبی در این زمینه توسط لیتاروویج<sup>۱</sup> و همکاران وی انجام شده است [۴]. این روش یکی از بهترین روشهای تست خوردگی در مواد معدنی است. یک جت مولد کاویتاسیون که از یک منبع دارای فشار ثابت (فشار:  $P_u$ ) نشأت می‌گیرد از درون یک نازل طولانی دارای اریفیس گذراننده می‌شود و به درون محفظه تست که فشار درونی آن  $P_d$  (فشار پایین دست) است، تخلیه می‌شود. یک نمونه استوانه‌ای شکل از ماده مورد نظر هم بصورت هم محور با جت قرار داده می‌شود. فاصله L بین لبه ورودی نازل و ماده یاد شده (هدف) قابل تغییر است. پدیده کاویتاسیون قابل مشاهده است و می‌توان از طریق پنجره‌های کناری محفظه تست از آن عکس برداری نمود. تحت این شرایط نرخ جریان فقط به فشار بالا دست  $P_u$  بستگی دارد.

سیال عامل استفاده شده است ولی روش برای مایعات غیر آبی نیز قابل استفاده است. این دستگاه از مزیت ارزانی و سادگی بر پا نمودن آن برخوردار است. همچنین به قدرت کمی در حدود W ۱۰۰ نیاز دارد بنابراین سیال مورد استفاده در تست کمتر گرم می‌شود. با استفاده از نمونه‌های دیسک مانند که جز تنشهای ناشی از کاویتاسیون تنشهای دیگری را تحمل نمی‌کنند سریعاً به نتایج مطلوب دست می‌یابیم.

عملکرد وسیله به شرایط و ماهیت سیال مورد استفاده بسیار حساس است و حجم گاز نیز یک متغیر مهم بشمار می‌رود. در صورتی که همان قدرت ورودی با دقت تکرار شود بدلیل وجود عوامل جانبی دیگر، بسختی می‌توان اطمینان داشت که شرایط کاویتاسیون مشابه در تستهای متوالی حاصل گردد. بدلیل فشارهایی که بطور معمول برای این تستها مورد نیاز است عمر ترانسد یوسر محدود است و باید تطابق‌هایی بین بخشهایی که خصوصیات آنها با هم تفاوت‌های جزئی دارند صورت گیرد.

### تونل‌های آبی و لوله‌های متقارب

#### تونل‌های آبی

تونل آبی به گستردگی برای مطالعه جزئیات فرآیند کاویتاسیون در یک سیستم جریان مورد استفاده قرار گرفته است. این روش از اولین روشهای تحقیق بر روی خوردگی ناشی از کاویتاسیون بوده و کند و بطئی است. با اینکه تست‌های تسریعی جایگزین این روش گردیده‌اند ولی این روش هنوز در مطالعه روابط تجربی بین کاویتاسیون و خرابی‌های منتهجه و اثرات مقیاسی در خوردگی ناشی از کاویتاسیون که بطور کامل درک نشده‌اند بسیار ارزشمند می‌باشد. برای بررسی چنین اثراتی باید با برداشتن قدمی به جلو از عهده واحدهای پیچیده‌ای همچون پمپ و توربین برآمد.

اجزاء مهم تمام تونل‌های آبی که دقیقاً مشابه اجزاء یک تونل بادی در تحقیقات آیرودینامیکی می‌باشد به شرح زیر است:

- (۱) محفظه کاری<sup>۱</sup>، که مدل در درون آن واقع شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- (۲) سیستم گردش سیال شامل یک پمپ و لوله کشی‌های مربوطه.
- (۳) یک سیستم جذبی که هرگونه حباب هوای ناشی از کاویتاسیون در محفظه کاری را جذب می‌کند.
- (۴) سیستم کنترل میزان هوای محلول که میزان آنرا ثابت نگه می‌دارد.
- (۵) یک سیستم کنترل که دما، سرعت و فشار را در درون محفظه تست در مقدار دلخواه ثابت نگه می‌دارد.

یک پمپ دنده‌ای گردش می‌کند و همچون مخزن و خطوط لوله از مواد مقاوم در برابر خوردگی ساخته شده است.

این تست، تخریب ناشی از کاویتاسیون را شبیه سازی می‌کند ولی به واقع در مایع حباب بوجود نمی‌آورد. چنین تخریبی وابستگی زیادی به تغییرات مومنتوم و انرژی جنبشی همانند موجهای شوک و تنشهای مربوط به آن که در موارد عملی اتفاق می‌افتد ندارد. این عمل تنها تشابه ضربه ای با کاویتاسیون واقعی پدید می‌آورد که شبیه سازی کاملاً مناسبی است.

یکی از مشخصات این تست اینست که ضربات بصورت هماهنگ و مکرر در یک منطقه اعمال می‌شوند در حالیکه در عمل ضربات بطور تصادفی و در تمام مناطق اعمال می‌گردند. میزان شدت تخریب را می‌توان با تغییر سرعت چرخش چرخ و اندازه نازل تغییر داد. نرخ تخریب تابعی از سرعت ضربه و قطر جت سیال است. تنش یکنواخت و مکرر اعمالی از آنجائیکه شرایط واقعی را ایجاد نمی‌کند تا حدی جزء نقایص این روش محسوب می‌شود ولی تاکنون به اثرات نامناسب دیگری از این روش اشاره نشده است.

از آنجائیکه نمونه مورد آزمایش در آب غوطه ور نمی‌باشد از اثرات الکترو شیمیایی مصون می‌ماند و بنابراین میزان تخریب به خصوصیات مایع بسیار حساس می‌باشد. در اینجا مقاومت خستگی جسم در هوا اعتبار ندارد و باید حد دوام جسم با توجه به شرایط محیطی عملی تعیین شود. با این وسیله می‌توان اثرات مایعات مختلف را مورد بررسی قرار داد. مایعات آلی تقریباً اثر مخرب ندارند اما محلولهای نمکی از نرخ تخریب بالایی برخوردارند. از آنجائیکه نتایج حاصل را نمی‌توان برای تمام شرایط عملی بکار برد امید آن می‌رود که بتوان با شبیه سازی شرایط محیطی بیشتری که در عمل با آن مواجه هستیم، بهره برداری از این روش را توسعه داد.

### جام آکوستیک<sup>۱</sup>

در این وسیله سیال عامل در یک جام شیشه‌ای استوانه‌ای قرار دارد و توسط یک ترانسدیوسر حلقوی باریم تیتانید درست واقع در زیر سطح مایع، یک میدان فشار متغیر با شدت بالا ایجاد می‌شود. نمونه‌ها بطور منفرد، هم تراز با سطح یک بلوک از فولاد زنگ نزن واقع در ته جام نصب می‌شوند.

در این دستگاه از بکار بردن تنشهای ناشی از شتاب مکانیکی برای نمونه‌ها اجتناب می‌شود ولی از آنجائیکه خرابی ناشی از خوردگی در یک ناحیه کوچک واقع در مرکز نمونه بوجود می‌آید اندازه گیری آن مشکل خواهد بود. استفاده از این روش محدود به بررسی کیفی جنبه متالورژیکی کاویتاسیون می‌باشد. تاکنون تنها آب به عنوان

می‌شود که افت فشار ناشی از آن بهترین تطبیق با مدار را بدون کاستن کارایی آن داشته باشد. فقدان وجود یک لوله طویل در بالا دست اوریفیس، با استفاده از دستگاههای مدرج خاص مستقیم و موازی کننده جریان جبران می‌گردد. با اتصال مدار به یک تانک مرجع در ارتباط با اتمسفر می‌توان فشار را در کل مدار تحت تأثیر قرار داد. این تانک، از آنجائیکه در اغلب تستهای خوردگی به فشاری بالای فشار اتمسفر نیاز است، در بالای محفظه کاری مستقر می‌شود. فشار پشت محفظه کاری با تغییر سطح آب در تانک مرجع تغییر می‌کند که با ثابت نگهداشتن سطح مذکور می‌توان فشار پشت را نیز بطور اتوماتیک تثبیت نمود. بدین وسیله شرایط مناسب عملکرد بدون نیاز به تنظیم جریان مهیا می‌گردد.

دما بطور پیوسته توسط یک ترمومتر جیوه‌ای با غلاف فولادی که در درون مخزن جای دارد نمایش داده می‌شود. مدار به یک دمای تعادل می‌رسد که در محدوده تغییرات محیطی و جریان، پایدار است و نیاز به کنترل آن برای جلوگیری از تأثیرات بیش از حد این تغییرات وجود دارد.

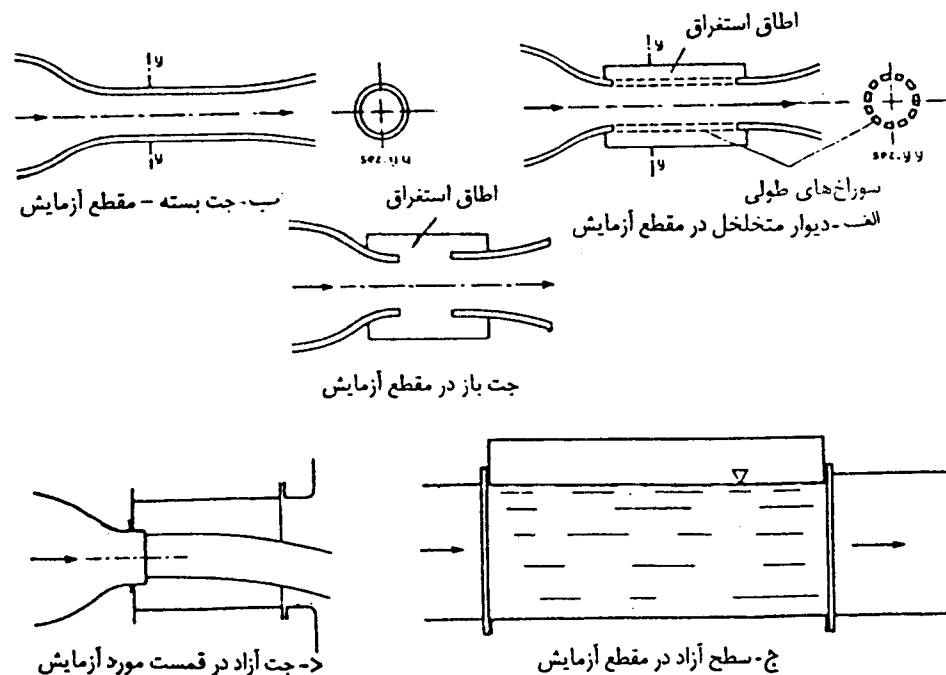
در بالا و پایین محفظه کاری می‌توان از پروفیل‌های متعددی برای تغییر سطح مقطع استفاده نمود و یا موانع مسدود کننده‌ای را که قابلیت نصب از محور مقطع را داشته باشند بکار برد. نمونه‌های تست خوردگی را می‌توان از خارج در کمترین زمان بطوریکه باعث ایجاد اختلال در مدار نشوند وارد محفظه کاری نمود.

هر سیستم تعادل که جسم مورد آزمایش را در موقعیت‌های مختلف در درون محفظه نگه می‌دارد تا نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر آن اندازه‌گیری شوند.

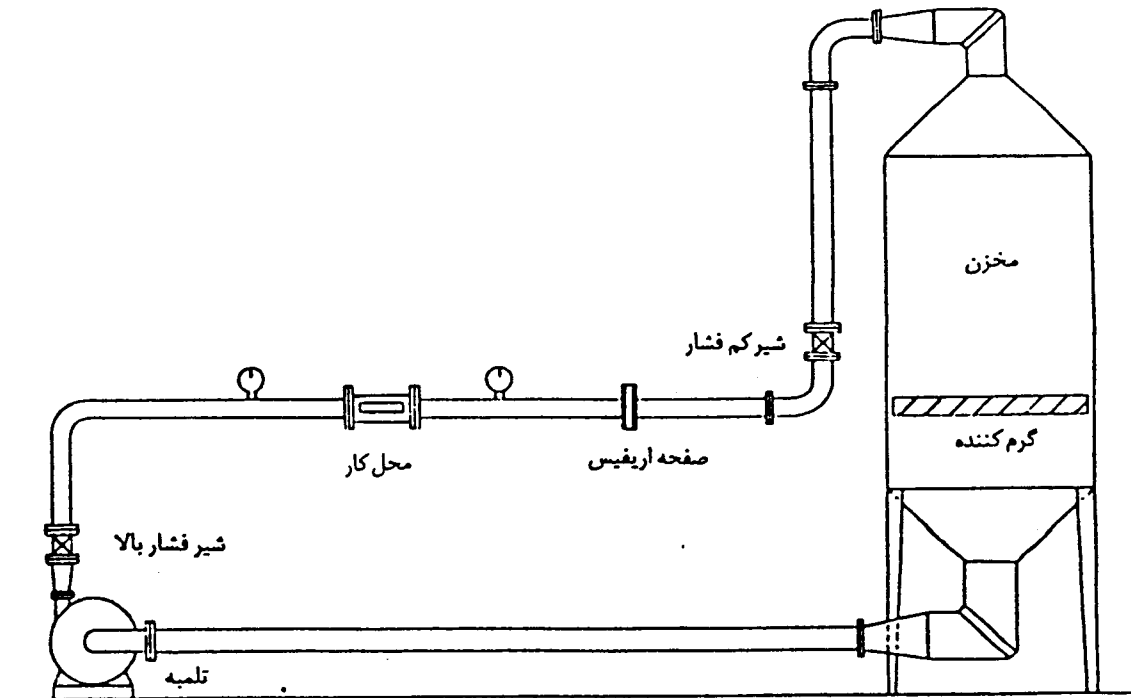
محفظه کاری منطقه‌ای است که مشاهدات در آن صورت می‌گیرد و میتوان آنرا به طرق مختلف ساخت. محفظه‌های با جتهای بسته (استوانه‌ای معمولی، واگرا، استوانه‌ای با دیواره‌های شیار دار) محفظه‌های با جت‌های باز، محفظه‌های با جت‌های آزاد و محفظه‌های با سطح آزاد بر حسب خصوصیات مورد نیاز و نوع تحقیق ساخته می‌شوند. (شکل ۲)

هر محفظه امتیازات و اشکالات مخصوص به خود را دارد. استفاده از محفظه با جت بسته بیشتر از بقیه معمول است. محفظه‌های با جت بسته و باز، دیواره‌های شفاف از جنس پرسیکس<sup>۱</sup> و یا لوسیت<sup>۲</sup> دارند تا مشاهده و یا عکسبرداری همزمان با اندازه‌گیری‌های دیگر امکان پذیر باشد.

مدار شماتیک تونل آبی در دیاگرام شکل (۳) نشان داده شده است. یک تانک استوانه‌ای بسته، نقش مخزنی را ایفا می‌کند که آب از آن بوسیله یک پمپ و از طریق یک شیر کنترلی فشار بالا به محفظه کاری هدایت شده و از طریق یک شیر دیگر به مخزن باز می‌گردد. فشارهای ورودی و خروجی از مخزن توسط گیج‌های ورودی<sup>۳</sup> و جریان توسط یک اوریفیس<sup>۴</sup> که بین مقطع کاری و مخزن قرار می‌گیرد اندازه‌گیری می‌شود. موقعیت این اوریفیس بگونه‌ای تعیین



شکل ۲: انواع مختلف محفظه‌های کاری مورد استفاده در تونل‌های آبی.



شکل ۳: مدار شماتیک یک تونل کاویتاسیون.

سیستم به جریان انداختن مایع، محفظه کاری، ابزار کنترل و اندازه گیری.

سیستم به جریان انداختن مایع متشکل از پمپ و یک مدار بسته می باشد که بوسیله آن می توان جریان مایع آزمایشی را در محفظه کاری برقرار نمود. در بعضی موارد یک پمپ واحد برای ایجاد جریان در چند مدار موازی بکار میرود (۲ تا ۴ مدار). محفظه کاری عمدتاً سه نوع است:

(۱) محفظه ونتوری

(۲) محفظه دو آب بنده<sup>۱</sup>

(۳) محفظه با بدنه بلانت<sup>۲</sup>

محفظه ونتوری هم در تحقیقات زیربنایی و هم تحقیقات کاربردی استفاده شده است. در مورد آزمایشات خوردگی بطور کلی محفظه های دو آب بنده جایگزین آن شده است. زیرا سرعت های بسیار بالاتر را امکان پذیر می کند. همچنین محفظه با بدنه بلانت نیز در مواردی جایگزین محفظه ونتوری می گردد زیرا ساختمان آن ساده تر است و سرعت خوردگی بیشتر را میسر می سازد.

سیستم کنترل و اندازه گیری متغیرها شامل موارد زیر می باشد:

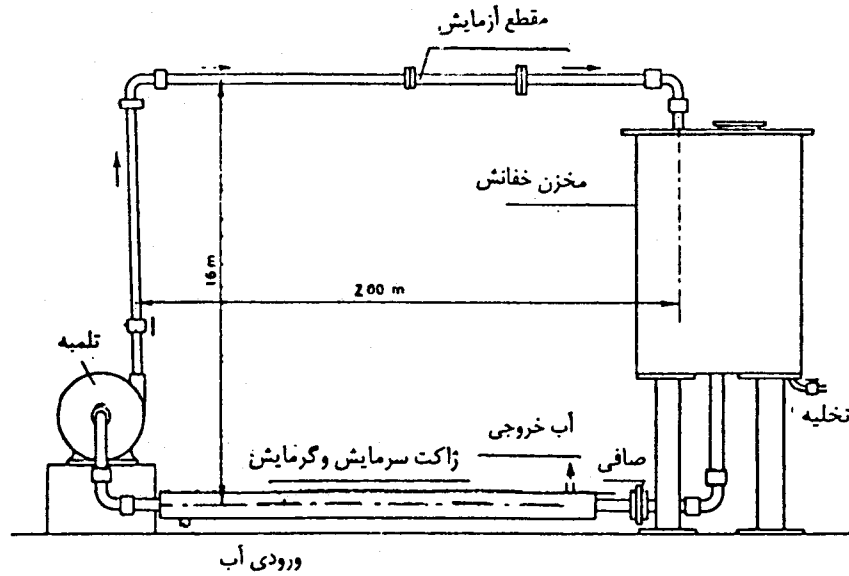
یک خنک کننده و یک گرم کننده برای تغییر دما، سیستم تنظیم فشار بر اساس تغییر فشار گاز درون مخزن ضربه گیر<sup>۳</sup> که این فشار در ارتباط با خروجی پمپ سیر کولاسیون می باشد، ابزار اندازه گیری دما و فشار در قسمت های مختلف مدار بخصوص محفظه کاری،

تونل آبی اولین وسیله آزمایشی برای مطالعات کاویتاسیون بوده و هنوز هم از مهمترین آنها است. میتوان از آن برای همه نوع تحقیقات چه تحقیقات زیر بنایی و چه تحقیقات کاربردی استفاده کرد. نوع کاویتاسیون شبیه به آن چیزی است که در ماشین های هیدرولیک رخ میدهد. سرعت جریان، فشار، دما و گاز درون آن را می توان دقیقاً کنترل کرد و با توجه به ویژگیهای سیستم میتوان مشاهدات مستقیم انجام داد. به هر حال هزینه های نصب و راه اندازی تونل های آب بسیار بالا است و این تونل ها فضاهای زیادی اشغال می کنند. اندازه و پیچیدگی دستگاه مانع از تغییر سریع و گسترده عوامل آزمون میشود. به دلایل عملی آزمایش فقط با آب انجام می شود. در این روش، آزمایشات به زمان بسیار زیادی (در بعضی موارد بیشتر از ۱۰۰ ساعت) نیاز دارند.

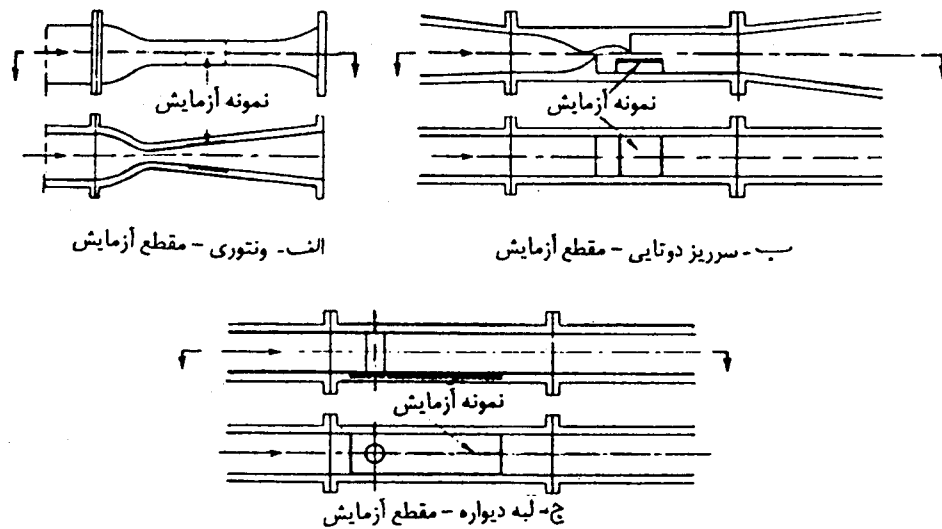
### لوله های متقارب

در عمل لوله های متقارب را میتوان تونل های آبی کوچک به شمار آورد. در محفظه کاری که تقارب در مدار را مجسم می کند، شرایط مناسب فشار، سرعت و دما بوجود می آید و باعث پیشرفت روند کاویتاسیون میگردد. بنابراین تحقیق زیر بنایی و کاربردی در این زمینه میسر می شود.

در لوله های متقارب همچون تونل های آبی بخش های زیر را میتوان مشاهده کرد:



شکل ۴: مدار شماتیک یک دستگاه شامل لوله متقارب.



شکل ۵: انواع مختلف محفظه‌های کاری مورد استفاده در لوله‌های متقارب.

کند. مقادیر دما ممکن است در دامنه وسیعی قرار بگیرند. آزمایشات با دمای بین ۲۰۰- و ۵۵۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. در آزمایشات خوردگی زمان آزمایش ممکن است از چند ساعت تا صدها ساعت، برحسب نوع محفظه کاری، مقاومت ماده و نوع آزمایش تغییر کند. طول زمان معمول آزمایشات بین ۱۰ تا ۳۰

ونتوری یا اوریفیس برای اندازه‌گیری نرخ جریان، سیستمهای کنترل درجه خلوص مایع و حجم گاز. حداکثر مقدار سرعت جریان در بخش گلوگاه بین ۲۰ تا ۱۰۰ متر بر ثانیه میباشد که محدوده معمول آن بین ۲۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه است. فشار میتواند از مقدار فشار بخار به میزان چندین بار<sup>۱</sup> تغییر

بسیاری از اولین کسانی که روی این مطلب کار کردند. نرخ متوسط خوردگی را بعنوان مقدار مشخصه در نظر گرفتند و میزان کاهش وزن در طی آزمایش پس از گذشت ۱۶ تا ۱۰۰ ساعت را مورد ارزیابی قرار دادند. در بسیاری از موارد این فرضیات بعلت وجود تفاوت بین نرخهای اولیه و نهایی خوردگی باعث ایجاد انحراف در نتیجه گیری شده‌اند.

تنها در کارهای اخیر عملکرد صحیحی در این زمینه ثبت شده است در عین حال نتایج حاصل از بررسیهای اولیه نیز از اعتبار ساقط نشده اند و کارهای اخیر تنها به عدم قطعیت در بکار بردن بعضی از آنها اشاره دارند.

اگر چه هر دو مقدار عمر پیش از خوردگی و نرخ خوردگی به شرایط آزمایش وابسته‌اند ولی دو مقدار مستقل از هم بوده و برای مواد مختلف متفاوتند. زمان شروع خوردگی تحت تأثیر پرداخت سطح قطعه مورد آزمایش، ماهیت محیط و همچنین شدت کاویتاسیونی است که سطح در معرض آن قرار دارد. نرخ تخریب تنها تحت تأثیر محیط و شدت کاویتاسیون قرار دارد. در عمل هر دو کیفیت فوق برای افزایش عمر پیش از خوردگی قطعه و همچنین کاهش نرخ تخریب از اهمیت بسزایی برخوردارند. همچنین روشهای مختلف تست که از لحاظ کیفی به هم شبیهند، بعلت تأثیر شکل و اندازه قطعه مورد آزمایش می‌توانند از مقادیر خوردگی خطی و گذرای متفاوتی برخوردار باشند. عموماً هر چه سطح تخریب بزرگتر باشد، نرخ آن یکنواخت تر بوده و تأثیر تغییرات موضعی در نوع ماده به سمت مقدار متوسطی میل می‌کند. با تکرار تست انتظار می‌رود که پراکندگی کمتری در نتایج حاصله از مناطق خورده شده بزرگتر وجود داشته باشد و به قطعات مورد آزمایش کمتری برای رسیدن به یک نتیجه متوسط قابل اعتماد نیاز باشد. سطح های تست کوچک نسبت به تغییرات موضعی بسیار حساس بوده و خواصی را ارائه می‌دهند که به میزان زیادی گذرا می‌باشند.

در تستهای اختصاصی سعی زیادی بر یکنواخت نمودن تخریب تا حد امکان انجام پذیرفته است. بعنوان مثال در تست ارتعاشی، قطعه مسطح مورد آزمایش ترجیحاً از منطقه خاصی مورد حمله قرار می‌گیرد. ویلر<sup>۲</sup> بر این مشکل با استفاده از یک قطعه دارای شیار حلقوی با مقطع نیمدایره فائق آمد. پلست<sup>۳</sup> دریافت که با ایجاد یک حلقه برجسته در لبه قطعه مورد آزمایش می‌توان به یک توزیع مناسب خوردگی دست یافت و او به نتایجی بسیار همگون تر از نتایج مربوط به قطعه مسطح رسید.

یکی از معایب روش آکوستیک ماهیت شدیداً متمرکز و حجم کم خوردگی ایجاد شده در این روش است. با گذشت زمان روش های

ساعت است. در این نوع دستگاه برای اولین تحقیقات در خوردگی ناشی از کاویتاسیون، سرعتهای بیشتر از آنچه که در تونل های آبی فراهم میشود به دست آمد. حتی امروزه علیرغم وجود سیستمهای ساده تر، از این دستگاه استفاده میشود زیرا کاویتاسیون در شرایطی کاملاً نزدیک به شرایط دستگاههای هیدرولیک با رژیم جریان نسبتاً ساده اتفاق می‌افتد. از این لحاظ که حجم کمتری از مایع در مقایسه با تونل های آب استفاده میشود میتوان لوله‌های متقارب را برای انجام تحقیقات با دیگر مایعات نیز مورد استفاده قرار داد. آزمایش کاویتاسیون در واقع با فلزات مایع از آنجمله جیوه، سرب، بیسموت و گازهای مایع (نیتروژن و فرئون ۱۱۴) و اتیلن گلیکول انجام شده است. سرعت و دما در سطح وسیعتری میتوانند تغییر کنند و با دقت بیشتری کنترل شوند. این وسیله همچنین برای تحقیق زیربنایی اثرات مقیاس، اثرات پسماند در کاویتاسیون<sup>۱</sup> و کشش مایع بکار رفته است. در واقع باید بگوئیم این روش بطور خاص مناسب این نوع تحقیقات می‌باشد.

## تفسیر نتایج

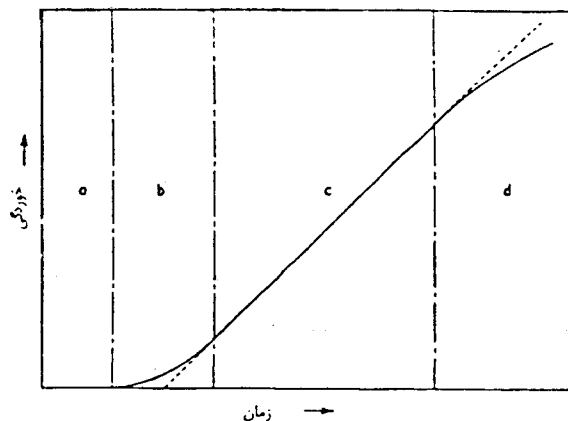
در تمام تستهای تسریعی در صورتی که منحنی خوردگی روبه افزایش برحسب زمان (شکل ۶) رسم شود به منحنی های مشابهی دست می‌یابیم. در این منحنی ها معمولاً چهار منطقه اصلی قابل تشخیص است اگر چه در بعضی موارد دو منطقه اول بسیار کوچک بوده و یا حتی وجود ندارند:

(a) در این منطقه اگر چه ترکهایی شکل می‌یابند ولی خوردگی صورت نمی‌گیرد.

(b) کچلی بطور موضعی شروع شده و کم کم در تمام سطح منتشر می‌شود.

(c) خوردگی با یک نرخ مستقل از زمان ادامه پیدا می‌کند.

(d) با گود شدن منطقه نرخ خوردگی کاهش می‌یابد.



شکل ۶: منحنی عمومی خوردگی بر حسب زمان.



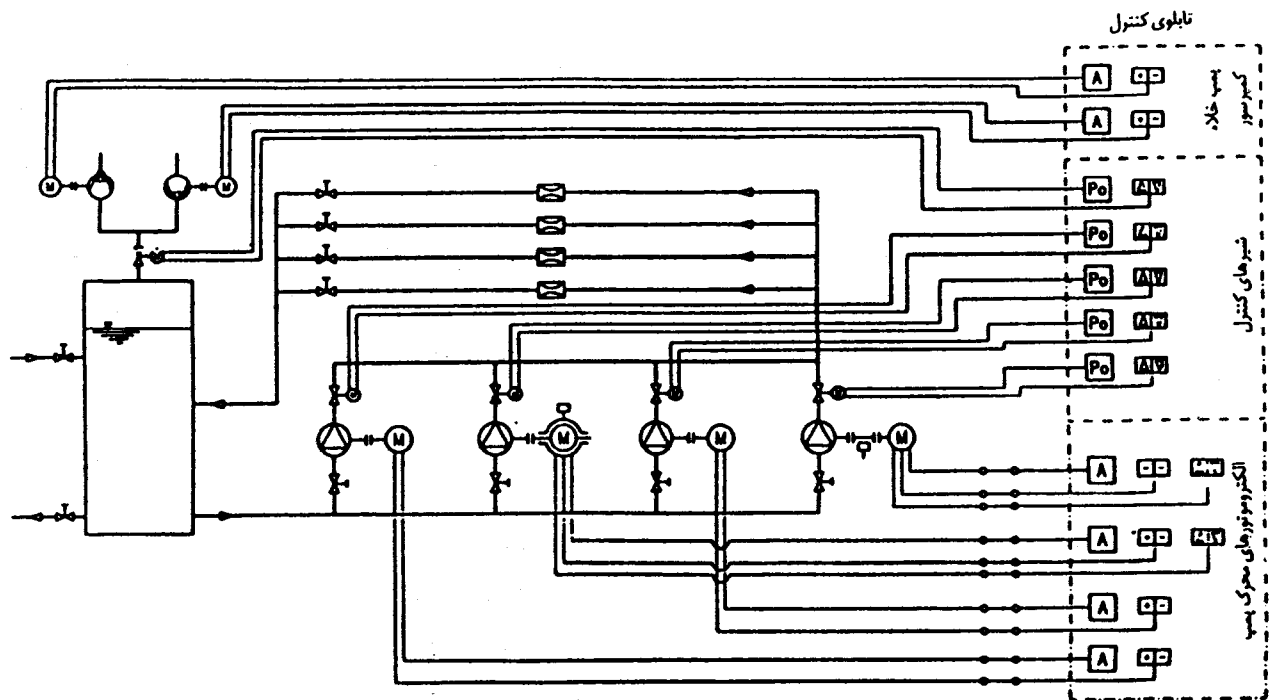
شده و در حال اجرا [۸] می باشد. در این مدار، مطابق شکل (۷)، ابتدا در محفظه مکش مخزن ضربه گیر، بوسیله یک دستگاه کمپرسور و پمپ خلاء می توان فشار ورودی پمپ را تغییر داد. این فشار از حدود ۳ اتمسفر به تدریج تا حدود ۰/۰۵ بار می تواند نقصان یابد. طبیعتاً در چنین شرایطی پمپ کاویتاسیون نموده و مشخصات و منحنی های مربوطه در اطاق کنترل توسط نرم افزارهایی که قبلاً تهیه گردیده، بدست می آیند. با کمک این مدار آزمایش که ساخت آن در حال اتمام است، برای اولین بار در کشور می توان تست کاویتاسیون را بصورت کاملاً تحقیقاتی و صنعتی برای کلیه انواع پمپ های سانتریفوژ و به خصوص پمپ های نفت که اینگونه آزمایش ها برای آنها از اولویت ویژه ای برخوردار است، تا ظرفیت ۴۵۰۰ متر مکعب در ساعت و تا فشار ۴۰۰ متر ستون آب انجام داد. لازم به تذکر است که طراحی و ساخت ایندیوسر جهت بهبود شرایط کاویتاسیون پمپ ها که قبلاً نیز مورد مطالعه قرار گرفته ( [۹]، [۱۰] و [۱۱] ) به کمک این مدار آزمایش می تواند در کشور به خوبی میسر گردد. بدین ترتیب عملاً یکی از معضلات بزرگ در زمینه طراحی پمپ ها با ملاحظات پدیده کاویتاسیون و به خصوص طراحی پمپ های با دورهای بالا که به ایندیوسر مجهز بوده و نیاز به آزمایش های دقیق و مطابق استاندارد های بین المللی را دارند با راه اندازی این مدار آزمایش بر طرف می گردد.

مبتنی بر تعیین وزن ماده خورده شده مناسب ارزیابی نشدند، در عوض اندازه گیری عمق خوردگی بررسی چگونگی پیشرفت تخریب را ممکن ساخت. اندازه گیری زمان مورد نیاز برای اینکه خوردگی به عمق خاصی برسد از روشهای مناسب بررسی پدیده کاویتاسیون و پاسخ مواد مختلف به این پدیده است.

نپ<sup>۱</sup>، دیلی<sup>۲</sup> و همیت<sup>۳</sup> پنج سری نمودار و ۲۸ جدول اطلاعات خسارات ناشی از کاویتاسیون را برای دامنه وسیعی از مواد ارائه کرده اند. علاوه بر این آنها شرحی دقیق بر عواملی که بر مقاومت مواد در برابر خوردگی ناشی از کاویتاسیون را دارند ارائه کرده اند [۵]. خسارات وارده به فشار، دما و هوای محلول در سیال هم بستگی دارد. تحقیقات فراوانی انجام شده تا خواص مهم مواد در برابر خسارات ناشی از کاویتاسیون بدست آیند. حد الاستیک، سختی، چکش خواری، خواص کار سختی، حساسیت دمایی، مدول یانگ، تحمل فشاری، چگالی، حد خستگی، انرژی کرنشی منتهی به شکست، مقاومت حرارتی، نقطه ذوب، اینرسی شیمیایی، چسبندگی اکسیدها به سطح، ساختار کریستالی و هدایت الکتریکی در این امر دخالت دارند.

## آزمایش کاویتاسیون در پمپ ها

مدار آزمایش به منظور تست کاویتاسیون در پمپ ها طراحی



شکل ۷: مدار شماتیک آزمایش کاویتاسیون پمپ سانتریفوژ.

می‌باشد. ارزیابی تخریب می‌تواند از طریق حجم سنجی و یا وزن (غلظت) سنجی صورت پذیرد.

یک روش مناسب ولی در حین حال با مشکلات بیشتر، استفاده از پروانه کشتی یا چرخ توربین کاپلانی است که پره‌های آن از مواد مختلف ساخته شده‌اند و از یکی بعنوان مرجع استفاده می‌شود. در این حالت تغییر شرایط عملکرد پی آمد خاصی به دنبال ندارد ولی تأثیرات الکترولیتی می‌توانند مشکل ساز باشند.

برای ایجاد شرایط دقیقاً تحت کنترل جهت یک ارزیابی قابل اعتماد به یک واحد آزمایشگاهی مناسب اعمال کاویتاسیون نیاز داریم. مطالعات اولیه نشان داده‌اند که مناسبترین ماشین پمپ سانتریفوژ سرعت بالاست که به عنوان قطعه مورد آزمایش بکار می‌رود. حتی در ماشینهای نه چندان بزرگ مصرف انرژی و در نتیجه میزان تولید حرارت بالاست. برای کاهش خنک‌کنندگی مورد نیاز می‌توان از انرژی منتقل شده به آب با استفاده از یک توربین در مدار بگونه‌ای بسیار کارا بهره برد. در صورتی که از این توربین جهت راه اندازی پمپ استفاده شود تنها نیروی مورد نیاز، نیروی جبران تلفات خواهد بود. همچنین می‌توان با اندکی کاهش راندمان، از توربین بعنوان ماشین دوم تست خوردگی استفاده نمود. در این زمینه پتانسیل فعالیتهای بیشتری جهت مقایسه یک فرآیند واقعی و تستهای تسریعی وجود دارد.

مشکل نهایی وابستگی نتایج تست مربوط به یک ماده به ماشین مورد استفاده در تست است که این مشکل نیز با استفاده از وسایلی که پتانسیل تخریب کاویتاسیون هر ماشین را اندازه می‌گیرند تا حدودی حل شده است [۶]، [۷].

### قدر دانی و تشکر

بدینوسیله مراتب تشکر و قدر دانی خویش را از مسئولین محترم شرکت پمپ و توربین به خاطر پشتیبانی‌های لازم در تدوین و چاپ این مقاله ابراز می‌نماید.

ادامه این کار مطالعه کاویتاسیون بطور بنیادی [۱۲] و همچنین طراحی و ساخت مدار آزمایش مدل تست توربین‌های آبی جهت انجام کاویتاسیون می‌باشد که طبیعتاً سرمایه‌گذاری آن بسیار بالا می‌باشد و قبل از انجام لازم است موضوع از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری و توسعه‌های آینده

یک محقق با تعدادی از روشهای مختلف تست مواجه است که هر کدام یک ارزیابی کیفی از مقاومت در برابر خوردگی کاویتاسیون در اختیار وی قرار می‌دهند ولی هیچکدام از این روش‌ها مجموعه‌ای از مقادیر که بتوان مستقیماً بطور کمی در یک مسئله عملی از آنها استفاده نمود را به وی ارائه نمی‌دهند. کل عواملی که موجب عدم قطعیت می‌شود را می‌توان به دو صورت زیر کاهش داد.

اولین آنها اجرای آزمایشات است که در آن خوردگی مکانیکی در محیط فرسایشی موجود بسیار سریع انجام پذیرد. زیرا در محیطی که تلفیقی از خوردگی مکانیکی و شیمیایی در حال وقوع است بدلیل اینکه این خوردگی تابع ساده‌ای از دو اثر فوق نیست به نتایج گمراه‌کننده‌ای خواهیم رسید. دوم استفاده از عوامل سایشی در طی تست خوردگی کاویتاسیون می‌باشد. در حال حاضر توسعه روش‌های موجود در شرایط معمولی برای تمام مواد متداول جزء فعالیتهای اصلی در این زمینه می‌باشد.

در هر روشی معیاری مورد نیاز است تا در جه موفقیت آن ارزیابی شود. رسیدن به چنین معیاری نیاز به لوازم تست مواد در شرایط واقعی کاویتاسیون را دارد. تغییر شرایط عملکرد ماشین‌های هیدرولیکی این مسئله را با مشکل مواجه کرده است. بیشترین احتمال تغییر عملکرد در طی دوره تست، برای پمپ سیر کولاتور با وظیفه ثابت در طی یک دوره طولانی وجود دارد. از آنجائیکه پمپ جزء لاینفک برقراری مدار است بیش از همه در معرض خرابی واقع

### مراجع

- 1 - Pighini, U. and Benanti, A. (1972). "Water tunnels and constricted tube devices in cavitation research." *Proceedings of The Fourth Conference of Fluid Machinery*.
- 2 - Young, F. Ronald. (1989). *Cavitation*, McGraw-Hill Book Company.
- 3 - Hobbs, J. M. (1972). "Cavitation erosion testing techniques." *NEL Report*, No. 69.
- 4 - Lichtarowicz, A. *Nature* (1972). *Phys. Sci.*, 239, Vol. 63.
- 5 - Knapp, R. T., Daily, J. W. and Hammit, F. G. (1970). *Cavitation*, McGraw-Hill.

- 6 - Knapp, R. T. (1958). "Accelerated field tests of cavitation intensity." *Trans. Amer. SOC. Mech. Engrs.*, Vol. 80, No. 1, PP. 91-102.
- 7 - Kerr, S.L. and Rosenberg, K. (1958). "An index of cavitation erosion by means of radio-isotopes." *Trans. Amer. Soc. Meck. Engrs.*, Vol. 80, No. 6, PP. 1308-1314.
- ۸- نوریخس، س.ا. و دیگران. "گزارش فنی پروژه طراحی و ساخت آزمایشگاه پمپ و توربین." شرکت پمپ و توربین، سازمان گسترش و نو سازی کشور
- ۹- مهجوری، و. "کاویتاسیون." سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، زمستان (۱۳۷۱).
- ۱۰- مهجوری، و. "تحلیل و بررسی جریان در ایندیوسر." پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، زمستان (۱۳۷۲).
- ۱۱- نوریخس، س.ا. و مهجوری، و. "بررسی تجربی یک ایندیوسر صفحه صاف." نشریه دانشکده فنی، دانشگاه تهران، شماره ۵۷، خرداد ماه (۱۳۷۵).
- ۱۲- رایگان، ر. "بررسی پدیده کاویتاسیون در ماشینهای آبی." پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تابستان (۱۳۷۷).

### واژه نامه :

1 - Accelerated Test	تست تسریعی
2 - Pitting	غیر تسریعی
3 - Exponential Horn	قوس نمایی
4 - Peak-to-Peak Amplitude	دامنه سر به سر
5 - Cumulative Erosion Rate	خوردگی رو به افزایش
6 - Liquid Drop Impact Machine	ماشین ضربه ریزش مایع
7 - Acoustic Beaker	جام آکوستیک
8 - Working Section	محفظه کاری
9 - Double weir section	محفظه دو آب بنده
10 - Surge Tank	مخزن ضربه گیر
11 - Cavitation Hysteresis	پسماند کاویتاسیون

