بررسی پدیده کاویتاسیون در توربین های آبی

پوریا یاوری[1] ، مرتضی زندیه [2]

[1] pouria_kntu@yahoo.com

[2]mortezazandie@yahoo.com

چکیده:

یکی از مشکلات عمده در بهره برداری از نیروگاه های آبی بروز پدیده کاویتاسیون می باشد که قادر است صدمات زیادی به تجهیزات نیروگاه اعم از چرخ توربین و ملحقات آن وارد نماید . مهندسین یک نیروگاه آبی با نادیده گرفتن شرایط کاری بحرانی سعی بر این دارند تا توربین را در برابر چنین صدماتی حفظ نمایند . تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه کاویتاسیون و بخصوص کاویتاسیون در پمپ ها صورت گرفته است و گروه های زیادی درحال انجام مطالعه بر روی این مشکل هستند.

در این مقاله سعی شده است ابتدا تعریفی از کاویتاسیون و انواع آن ارائه شود و سپس به بررسی پدیده کاویتاسیون در توربین های آبی متداول در صنعت نظیر توربین های فرانسیس و راه های نوین مقابله با آن پرداخته شده است

مقدمه

کاویتاسیون پدیده ای نامطلوب در سیستم هیدرولیکی می باشد که در اکثر اوقات در قسمت مکش سیستم رخ می دهد . زمانی که کاویتاسیون رخ می دهد ، فشار در سیال به سطحی تا زیر فشار هوای آزاد کاهش می یابد و همین عامل باعث ایجاد حفره های توخالی در سیال می شود

. زمانی که فشار افزایش می یابد ، این حفره های توخالی در پمپ باز می شود . ضمن باز شدن حفره ها ، فشار به فشار و دمای زیاد ، صدمات زیادی را به اجزاء هیدرولیکی وارد می کند . به طوری که یک پمپ حفاری ، ممکن است به طور کامل در عرض چند ساعت صدمه ببینند ، پس باید قسمت هائی از سیستم را که در معرض صدمات

کاویتاسیون هستند ، بپوشانیم . طور قابل توجهی افزایش می یابد و دما نیز در حدود ۱۱۰۰ درجه سلیسیوس بالا می رود .

عوامل مؤثر در ایجاد کاویتاسیون

- وجود شتاب در جریان روغن موجود در پشت دریچه کنترل یا ترکیب روغن با آب یا هوا

- دمای زیاد سیال

- وجود مقاومت در قسمت مکش سیستم

- وجود خط مکش ظریفی در قطر

- وجود لوله مکش با آستر داخلی آسیب دیده

- پر شدن صافی مکش از چرک و کثافات (عامل تحریک کننده)

- ویسکوزیته زیاد روغن

- سرد شدن ناگهانی مخزن

کاویتاسیون ، اصطلاحی است که برای توصیف رفتار حفره ها یا حبابها در یک مایع استفاده می شود .

تخریب توربین ها در اثر پدیده کاویتاسیون

تخریبی که کاویتاسیون به روی اجزای سیستم هیدرولیکی اعمال می کند به سوراخ شدگی کاویتاسونی معروف است . این تخریب شامل موارد زیر است :

1. **صدمه زدن به کارایی توربین نظیر کاهش راندمان**
2. **ایجاد نوسانات هیدرولیکی و ارتعاشات شدید**
3. **به وجود آوردن تعمیرات سنگین که باعث کاهش عمر توربین میشود**

پیش بینی دقیق این امر کاری غیر ممکن است اما می توان گفت سرعت تخریب تحت تاثیر ۲ عامل است:

I. **قدرت فرسایش کاویتاسیون** که شامل دو دسته فرسایش می باشد : فرسایش ناشی از کاویتاسیون حباب های متحرک و کاویتاسیون ورتکسی . موقعیت و شدت این دو نوع کاویتاسیون وابسته به نوع ماشین و شرایط کاری و میزان هوای موجود در درون مایع و... می باشد

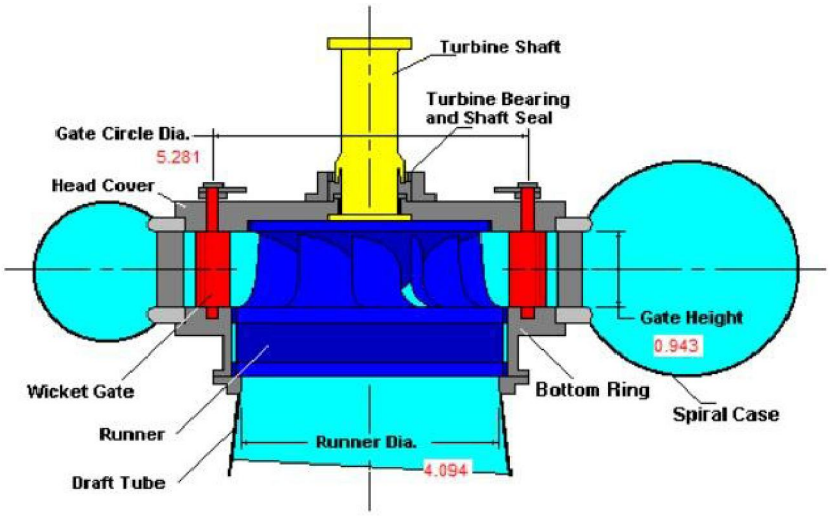
II. **مقاومت ماده به کار رفته**

فرایند تخریب به ساختار کریستالی ماده نیز وابسته است به علاوه ناخالصی های درون مایع نیز می تواند بر فرآیند تخریب اثر گذاشته و تخریب را شدید تر کند .

حال به ارائه تاریخچه ای از دو نوع توربین مهم هیدرولیکی صنعتی می پردازیم

توربین فرانسیس

این توربین توسط جیمز فرانسیس اختراع شد توربین فرانسیس یک توربین عکس العملی با جریان داخل شونده است که از مفاهیم جریان محوری و گردشی بهره می برد . آب پشت سد توسط کانال هایی وارد لوله های حلزون شکلی می گردد . این ساختار حلزونی به کمک دریچه ها باعث برخورد مماسی آب با پره های توربین میشود و آنها را به گردش در می آورد . گردش بیشتر آب به دور توربین با شعاع مجرای آن نسبت عکس دارد و در همان حین که شعاع مجرا کاهش می یابد سرعت آب که در ابتدا کاهش یافته بود بیشتر می شود . در نهایت آب خروجی دارای حداقل انرژی پتانسیل است حداکثر بازده این نوع توربین ۹۴ درصد می باشد . گرچه هزینه نصب و راه اندازی توربین فرانسیس زیاد است اما به دلیل داشتن عمر طولانی در بسیاری از نیروگاه های ایران و سایر نقاط جهان مورد استفاده قرار می گیرد.



توربین کاپلان

این توربین که توسط کاپلان اتریشی اختراع شد یک توربین عکس العملی است که از مفاهیم جریان محوری و گردشی بهره می برد خصوصیت اصلی این نوع توربین ها آن است که جریان آب بطور محوری با پره ها برخورد می کند . آب با سرعت زیاد قبل از برخورد با پره های متحرک جهت محوری پیدا می کند تا حداکثر انرژی را به پره ها منتقل کند این موضوع باعث می شود بازدهی این توربین ها تا ۹۴ درصد نیز برسد دو پازامتر زاویه تیغه ها و دریچه های هدایت کننده باعث وسعت محدوده کارایی آنها شده است .

تفاوت عمده این دو نوع توربین در طراحی رانر آنهاست که برای توربین های کاپلان بصورت محوری و برای توربین های فرانسیس به صورت شعاعی می باشد.

فاکتور کاویتاسیون (عدد توما)

پرفسور D .Thomas یک عدد بدون بعد به نام عدد توما معرفی کرد که برای انواع توربین با اندیس بحرانی کاویتاسیون مقایسه می شود.

$$\sigma c = (Hb - Hs) / H$$

که در آن Hb هد فشار بارومتریک آب ، Hs فشار مکش در خروجی توربین و H هد کلی اعمال شده بر روی توربین است. حال اگر σ > σc باشد کاویتاسیون در توربین مورد نظر اتفاق نمی افتد.

عدد توما برای توربین پیش رانشی از رابطه زیر بدست می آید

$$\sigma c = 0.28 + \frac{1}{7.5 \times \left(\frac{Ns}{380.78}\right)\text{^}3}$$

و برای توربین های فرانسیس نیزرابطه ی زیر را داریم

$$\sigma_c = 431 \times 10^{-8} \times N_s^2$$

عوامل موثر بر گسترش کاویتاسیون

این عوامل عبارتند از setting level توربین و کار در شرایط setting level . OFF Design در توربین فاصله ی Hs است که نشان دهنده ی میدان فشار در ارتباط با فشار بخار اشباع است و از آنجاییکه کاویتاسیون به شدت به سطحی جهت تجمع حباب ها احتیاج دارد پس بنابراین به این پارامتر وابسته است .

در مورد پارامتر Off Design می توان گفت هر توربین آبی محدوده هد و دبی معینی دارد که شرایط طراحی آن را تعیین می کند با این حال گاهی اوقات توربین مجبور است در شرایطی خارج از محدوده طراحی کار کند . واضح است که این شرایط باعث پایین آمدن بازدهی توربین شده و مقاومت پره ها را در برابر کاویتاسیون کاهش می دهد .

انواع کاویتاسیون در توربینهای فرانسیس

در زیر انواع مختلفی از کاویتاسیون در توربینهای فرانسیس اورده شده است که با ارایه تصاویری توضیح داده می شود:

۱. لبه حمله

این نوع کاویتاسیون بیشتر در اجزای تیغه های رانر و به دلیل کار در هدی بیش از هد طراحی توربین و زمانی که زاویه بین جریان ورودی و سرعت نسبی رانر مثبت است از بیش از مقدار مجاز منحرف میگردد اتفاق میافتد.این نوع کاویتاسیون از انجا که باعث فرسایش شدید تیغه ها و افزایش نوسانات فشاری می شود بسیار خطرناک است.

۲. حبابی

این نوع از کاویتاسیون باعث ایجاد حباب های جداگانه ای می شود که در قسمت مکش تیغه روبروی تیغه رخ می دهد. در شرایطی که مقدار عدد کاویتاسیون کم است و توربین در شرایط بارگذاری بیش از حد یا جریان بیش از حد قرار می گیرد این حباب ها ظاهر می شوند که اگر در نزدیکی تیغه ها از بین بروند باعث فرسایش شدید آن می شوند.

۳. گردابی وون کارمن

ممکن است از انتهای تیفه اتفاق بیافتد ، به لبه تیغه آسیب بزند و باعث ارتعاش و سر و صدا شود.

۴. گردابی لوله تخلیه

این نوع کاویتاسیون فقط در زیر مخروطی رانر و در مرکز لوله تخلیه رخ می دهد . مقدار این نوع کاویتاسیون بستگی به عدد توما دارد و در هر دو شرایط Over load [۱] و partial load [۲] ممکن است اتفاق بیافتد

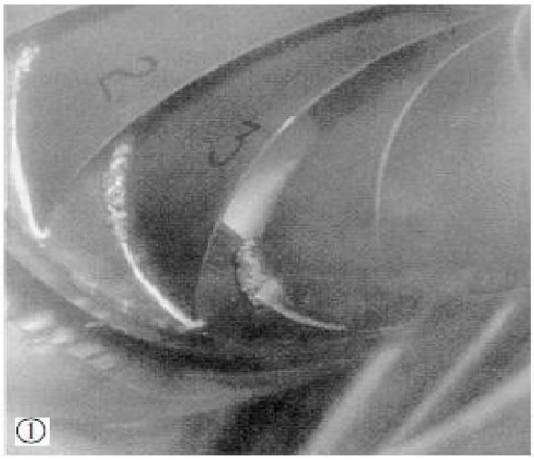
۵. گردابی بین تیغه ای

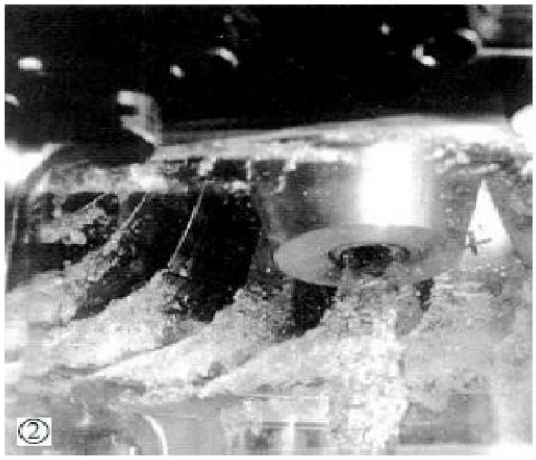
این نوع کاویتاسیون توسط جریان گردابه ای فرعی که در کانال های بین تیغه ها قرار دارد ایجاد می شود. اگر در شرایط partial load ایجاد شود می تواند صدای بسیار زیادی تولید کند .

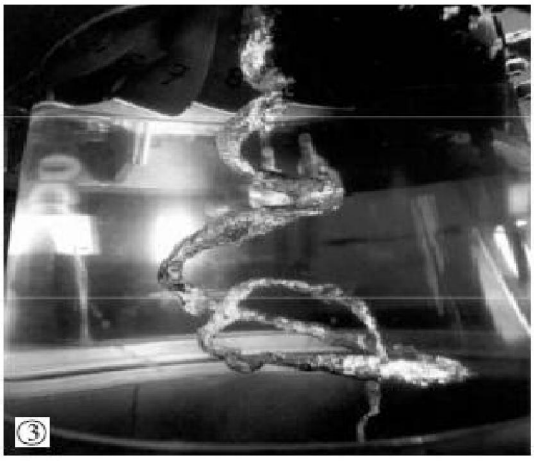
---

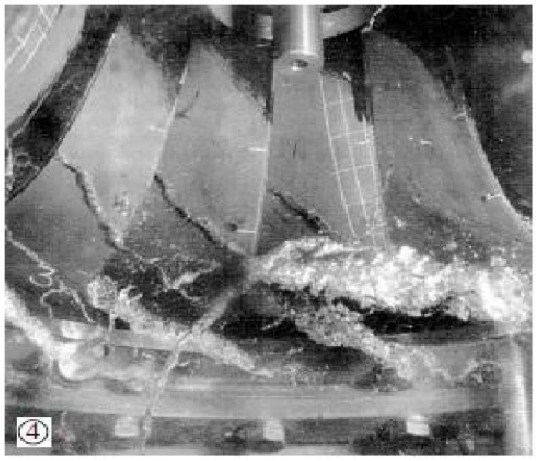
[۱] کارکرد در شرایط حداکثر بارگذاری (بیش از مقدار بار طراحی)

[۲] کارکرد در شرایط حداقل بارگذاری









انواع کاویتاسیون در توربین های کاپلان

در این توربین ها احتمال وقوع کاویتاسیون لبه حمله و گردابی لوله تخلیه بسیار کمتر از توربین های فرانسیس است و علت این امر نیز وجود قابلیت تنظیم زاویه تیغه ها و دریچه ها درا ین توربین ها است اما کاویتاسیون حبابی در هر دو طرف تیغه ها ممکن است اتفاق بیافتد.

نوع منحصر به فرد کاویتاسیون در این توربین ها کاویتاسیون گردابی نوکی است که در خلل و فرج های بین نوک تیغه ها به وجود می آید و باعث آسیب به تیغه می شود

تشخیص کاویتاسیون در توربین ها

پدیده کاویتاسیون در توربین های هیدرولیکی یکی از سخت ترین و پیچیده ترین مباحثی است که با وجود مطالعات و تحقیقات فراوان روی آن هنوز کسی موفق نگردیده است وقوع این پدیده را چه با مدلسازی و چه از طریق محاسبات بطور دقیق پیش بینی کند .معمولا کاویتاسیون به خودی خود در جریان سیال به توربین آسیب

نمی رساند بلکه هنگامی که انفجار حباب ها در نزدیکی توربین رخ می دهد که می تواند باعث صدمه زدن به توربین و خورده شدن و سایش پره های آن گردد که در نتیجه این امر پایین آمدن بازده توربین و کم شدن طول عمر آن گردد

سرو صدای زیاد و ارتعاش زیاد و فرکانس بالا از ویژگی های کاویتاسیون است ولی در کل ، با این وجود دانستن این که چه زمانی این پدیده به سیستم یا یک قسمت از ماشین لطمه جدی وارد می کند مهم است.

مسئله اصلی کشف متد هایی برای تشخیص دادن نویز و ارتعاشات ناشی از کاویتاسیونی که باعث صدمه به سیستم میشود ، از نویز و ارتعاشات ناشی از کاویتاسیونی که باعِث تخریب نمی شود و همچنین بقیه صداهای محیطی است .

موسسات و محققان زیادی در سرتاسر دنیا به بررسی پدیده کاویتاسیون و راه حل هایی برای کنترل و پیش بینی آن پرداخته اند که به صورت اجمالی به جند تن از آنها اشاره می کنیم:

در سال ۱۹۹۹ پروفسور فرهات از پدیده ارتعاشات در سیستم برای پی بردن به پدیده کاویتاسیون سود برد البته بیان این نکته شایان ذکر است که بیشتر این مورد در توربین های فرانسیس بزرگ کاربرد داشت.

در تحقیقی دیگر اویکسوان و چند تن دیگر از محققان در تحقیقی تمام اصوات قابل شنیدن ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز و اصوات مافوق صوت ۵۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز را بطور پیوسته کنترل کردند. خصوصیات سیگنال ها مانند انحراف استاندارد ، سطح نویز و ترکیبات فرکانس محاسبه شد . نتایج محاسبات به همراه شرایط کارکردی مربوطه مانند هد و آب و توان خروجی در سیستم و بانک اطلاعاتی ثبت شده است . صوت هایی که از کاویتاسیون ایجاد شده اند از سایر اصوات مانند جریان آب و اصوات مکانیکی جدا شده اند . شدت کاویتاسیون در هدهای آب و قدرت مختلف استخراج شد و شدت تخریب کاویتاسیون بر اساس شدت کاویتاسیون در شرایط کاری خاص مانند قدرت و هد آب تخمین زده می شود.

در تحقیقات تجربی که اسکالر و اگسکویزا و فرهات و آولان و کوسیرات بطور مشترک در اسپانیا و سوییس در سال ۲۰۰۶ انجام دادند روش تجربی دیگری برای تشخیص کاویتاسیون در توربین ارائه کردند .روش کار آنها بر اساس آنالیز دقیق ارتعاشات سازه ، صدور صدا و اندازه گیری فشار هیدرودینامیکی بود .

مؤسسه IREQ در کانادا روش جدیدی را ارائه داده که با مطالعه وضعیت ارتعاشات محور پدیده فوق بدقت مورد مطالعه قرار می گیرد. اصول و مکانیزم کار این روش بر پردازش سیگنال های ارتعاشی محور توربین می باشد، که توسط سنسورهای ارتعاشی نصب شده بر روی یاتاقها اندازه گیری می شود. با پردازش این سیگنالها میتوان محل ومیزان شدت پدیده کاویتاسیون را با دقت مناسبی تعیین و مشخص کرد

. فرآیند بکارگیری این روش به ترتیب زیر می باشد : تعبیه حس کننده لرزش یاتاقان ،کالیبره کردن مکانیکی حس کننده ها، پردازش سیگنال خروجی ،آنالیز هیدرو دینامیکی ،ارزیابی وسعت منطقه کاویتاسیون شده و جرم از دست رفته

کاربردهای این روش در موارد زیر می باشد.

- نظارت پیوسته بر عملکرد توربین
- انجام آزمایش های اولیه بر روی مدل یا نمونه اولیه
- بررسی تأثیر تعمیرات انجام شده پمپ ها
- مسیرها و مجاری عبور سیال و غیره.

روش های پیشگیری و کاهش کاویتاسیون

پدیده کاویتاسیون تشکیل بخار در منطقه کم فشار و ترکیدن این حباب در منطقه پر فشار است . فشاری که ایجاد می شود سطح فلز را به یک صفحه پر تنش تبدیل می کند و. جلوگیری از پدیده کاویتاسیون در توربین های آبی سخت است و بطور کامل اجتناب ناپذیر است ولی می تواند به یک منطقه اقتصادی قابل قبول کاهش یابد . بعضی از روش های پیشگیری و کاهش اثرات کاویتاسیون عبارتند از :

- طراحی بهینه توربین : با توجه به تجربه و آزمایش و آنالیز عددی می توان به طراحی رسید که میزان وقوع این پدیده در آن کمترین مقدار باشد
- ایجاد سطوح صاف و صیقلی : تجربه نشان داده است که ناصافی هایی در حد ۱ میلی متر هم باعث بروز پدیده کاویتاسیون شده است
- تنظیم دبی ، جریان و سرعت عملکرد توربین : با پرهیز از شرایط بحرانی و عبور سریع از محدوده کاویتاسیون مهندسین می توانند توربین را در برابر صدمات کاویتاسیون حفظ کنند
- استفاده از روکش های فلزی مناسب : با توجه به مقدار بالای تنش هایی که در اثر ترکیدن حباب روی سطح ایجاد می شود ضروری است که از پوشش های فلزی با مقاومت بالا استفاده شود
- استفاده از بتن الیاف دار : به علت داشتن مقاومت کششی بالا می توانند در مقابل خسارات کاویتاسیون مقاومت کنند و آن را به حداقل برسانند
- استفاده از رزین ها : اندود های لاستیکی کم ضخامت که با تکنولوژی جدید ساخته می شوند و در مقابل کاویتاسیون مقاوم هستند
- استفاده از سیستم هوادهی : اگر توسط یک مجرا ارتباط یک فضای کم فشار با اتمسفر برقرار شود ، اختلاف فشار باعث می شود که هوا به داخل محدوده خلا مکیده شود و فشار در زیر جریان آب به حد فشار امسفر برسد

تعمیرات آسیب های ناشی از پدیده کاویتاسیون

تعمیر صدمات ناشی از ایجاد سوراخ بر روی توربین یکی از اساسی ترین پروژه های یک نیروگاه آبی است چرا که اگر تعمیرات انجام نشود یه به تعویق بیافتد آسیب ها بصورت خیلی سریع آفزایش پیدا می کند که در نهایت سیستم را از کار می اندازد

روش های جهت تعمیر عبارتند از پر کردن قسمت های آسیب دیده بوسیله مواد ترکیب ناپذیر و مواد جوش خوردنی و همچنین جوش دادن صفحه هایی بر روی قسمت آسیب دیده یا جداکردن کلی قسمت آسیب دیده و جایگذین کردن آن

نتیجه گیری

همانطور که در این مقاله گفته شد تحقیقات فراوانی روی زمان وقوع کاویتاسیون و مدلسازی آن صورت گرفته که نتایج قابل قبولی ارائه شده است ولی هنوز مدل جامع و بسیار دقیقی از سوی هیچ دانشمندی ارائه نشده است که بتواند بطور دقیق آن را پیش بینی کند نه تقریبی پس به نظر می آید که تحقیقات آینده نیز روی مدل کردن این پدیده و پی بردن به پارامترهایی که به کاویتاسیون مربوط است می باشد.

منابع :

1)Jean-Pierre F., Jean Marie M. Fundamentals of Cavitation. Fluid mechanics and its applications, Volume 76, 2005

2). M. Farhat , P. Bourdon, , P. Lavigne, Some Hydro Quebec Experiences on the Vibratory Approach for Cavitation Monitoring, Proceedings of MTM Conference, 1996, p. 151-161

3)Pardeep Kumar, R.P. Saini. Study of cavitation in hydro turbines—A review, Alternate Hydro Energy Centre, Indian Institute of Technology, Roorkee 247667, India

4)Detection of cavitation in hydraulic turbines; Xavier Escaler, Eduard Egusquiza, Mohamed Farhat, Franc-ois Avellan, Miguel Coussirat; Mechanical Systems and Signal Processing; 20 (2006)983–1007

5)Hydraulic Turbines; Roger E. A. Arndt, St. Anthony Falls; Laboratory University of Minnesota; 1998 by CRC PRESS LLC