آزمایش روی مدلهای کوچك بمنظور حل مشکل ساختمان صحیح توربین‌های صنعتی

نوشتهٔ
مهندس عزت‌اله مخاطب رفیعی
استاد دانشکدهٔ فنی

مسئله جریان آب در ماشین های آبی و پدیده های وابسته بآن اصولاً بسیار پیچیده و درهم است وباوجود پیشرفت‌های شایانی که نصیب تئوری هیدرودینامیك شده استفاده ازآن برای پیش‌بینی تمام پدیده‌ها میسر نیست. از فرمول‌ها فقط میتوان نتیجه های کلی و معمولی گرفت زیرا معادله های هیدرودینامیك فقط شامل متغیرهای اصلی بوده و متغیرهای اتفاقی راکه موجب حادثه‌ها میشوند دربر ندارد که بتوان ازآنها برای پیش‌بینی تمام پدیده‌ها استفاده نمود. مثلاً درتوربین‌ها تغییر ارتفاع ریزش و تغییر شدت جریان آب ایجاد پدیده‌های خاصی میکند که پیش‌بینی آنها فقط از راه آزمایش مقدوربوده وفرمول‌های هیدرودینامیك نمیتوانند درتعیین وپیش‌بینی آنها کمترین کمك را بنمایند.

درصورتیکه منظور مطالعه خلاءزائی (Cavitation) درتوربین‌ها باشد محاسبه معادله‌های مزبور کافی برای پیش بینی آن نیست زیرا این پدیده مربوط باثر موضعی فشار میباشد ومنظورکردن فشار موضعی درنوشتن معادله پدیده‌ها (که فقط براساس فرض‌های ساده ودرحالت‌های خاص میسر است) مقدورنخواهد بود. با توجه باینکه خلاءزائی درتوربین‌ها پدیده بسیارخطرناکی است که اثرمستقیم ونامطلوبی درضریب بهره دارد و ممکن است در مدت بسیار کوتاهی قطعه های مختلف ماشین را از بین ببرد اهمیت پیش‌بینی وجلوگیری ازآن روشن میشود.

چون پیش‌بینی کامل وتعیین موقع ومورد چنین پدیده‌ای از راه محاسبه عملی نیست اگر بخواهیم مقطع‌ها وزاویه‌ها واندازه‌های ساختمان یک ماشین صنعتی را درپروژه اولیه تعیین کرده ومشخصه‌های آنرا در رژیم‌های مختلف رسم کنیم وضریب بهره مناسب راکه از نظراقتصادی اهمیت بسیار دارد تأمین نمائیم ودرعین حال همه خطرهای احتمالی ازقبیل پیدایش ارتعاش وخلاءزائی را هم ازبین ببریم هیچ روشی جز تجربه برای رسیدن به هدف‌های فوق دردسترس نیست.

اگرچه مطالعه مشخصه های توربین های صنعتی مشغول بکارکه در شرایط مختلف کارمی کنند اولین وسیله برای بدست آوردن اطلاع های اساسی میباشد ولی باید بخاطر داشت که آزمایش های صنعتی

برای مطالعهٔ بسیاری ازپدیده‌ها حتی برای تعیین دقیق ضریب بهره عملی نبوده و مستلزم هزینه های گزافی است زیرا تعیین دقیق شدت‌آب روی (Flow) ماشین مشکل های زیادی دربردارد. بعلاوه نتیجه های حاصل از این قبیل آزمایش ها در توربین های صنعتی برای توربین های دیگر عموماً قابل استفاده نیست زیرا نتیجه آزمایش ها بستگی کامل به ساختمان دستگاه وارتفاع ریزش ومقدار آب وعامل های متعدد دیگر در هنگام آزمایش دارد، بطوریکه نتیجه آزمایش ماشین های گوناگون قابل نتیجه گیری ومقایسه با یکدیگرنمیباشند.

بطور نمونه مطالعه خلاءزائی (که درهمه حال‌جنبه برآورد دارد) چون نتیجه عامل های‌مختلفی مانند ضریب‌خلاءزائی توما (Thoma Cavitation Factor) وسرعت مخصوص وشکل پره‌هاوضریب بهره کانال خروجی وغیره است نمیتواند از نوع توربینی به‌توربین دیگر قابل انطباق و استفاده باشد. بنابراین مطالعه روی مدل های صنعتی اصولاً جنبه پیش‌بینی حادثه درتوربین های مختلف را ندارد بلکه فقط ممکن است نتیجه حاصل ازاشتباه‌های فعلی را درساختمان دستگاههای بعدی ازهمان نوع مورد استفاده قرار داد. تنها مزیت مطالعه مدل های صنعتی در اینسکه میتوان بوسیله آن نتیجه‌های حاصل ازمطالعه روی مدلهای کوچک راکه در آزمایشگاه انجام گرفته کنترل نمود ونسبت به‌پیش‌بینی های حاصل ازآن اعتماد بیشتری بدست آورد. وچون‌مطالعه روی مدل های کوچک ازنظر اقتصادی مقرون بصرفه‌میباشد تنها با استفاده ازآنها و انجام آزمایش های متعدد میتوان خصوصیت توربین های متشابه‌را در ارتفاع ریزش و آب روی مشخص معین وپیش‌بینی نمود.

با مدل های کوچک میتوان آزمایش های لازم را بطورکامل انجام داد و نتیجه های بدست آمده ازمدل راکاملاً قابل اعتماد دانست زیرا تجربه همواره در شرایط ثابتی انجام میگیرد و نتیجهٔ آن صحیح وقطعی است. ولی برای بهره‌گیری از نتیجهٔ آزمایش درساختمانهای صنعتی موضوع اساسی آنست که‌بدانیم قانون های تشابه که براساس‌تئوری بناشده‌وروش‌آزمایش ها را درمدل های کوچک تعیین میکنند کاملاً مورد اعتماد میباشند وبوسیله آنها میتوان نتیجه حاصل ازتجربه‌را در عمل بکار برد. مثلاً قانون فرود (Froude) که باستناد آن نسبت سرعتها باید مساوی جذر مقیاس خطی مدل ها باشد درتمام حالت‌ها صحیح است‌وطبق این قانون میتوان آزمایش ها را روی مدل های کوچک متشابهی انجام دادکه درآنها مقیاس خطی مدل ها مساوی نسبت ارتفاع های ریزش درصنعت ودرمدل بوده باشد. درصورتیکه هدف مطالعه تغییر موضعی‌فشار (خلاءزائی) نباشدفرمول‌فرود ساده‌میگردد وطبق تحقیقات‌راتو (Rateau) ثابت‌شده که‌برای‌دوتوربین‌متشابه هرگاه ضریب سرعتها یعنی $\frac{\pi.D.n}{\sqrt{2gh}}$ مساوی باشند ضریب بهره‌ها نیز مساوی‌بوده وتغییر سرعتهامشابه خواهد بود. (دراین فرمول n دور دردقیقه وD قطر چرخ و h ارتفاع ریزش و g شتاب ثقل است). بنابراین بوسیله مطالعه توربین های کوچکی که از نظر هندسی متشابه با توربین های اصلی باشند میتوان از پیش - آمدهائی که ضمن کار توربین اصلی درسرعت‌های مختلف وارتفاع ریزش ثابت رخ خواهد داد اطلاع لازم بدست آورد.

باید درنظرداشت ضریب بهره‌ایکه ازآزمایش توربین‌مدل کوچک بدست میآید قدری کمترازضریب بهره دستگاههای‌صنعتی‌است‌زیرا درمدل های کوچک‌توان کاهی (Energy Loss) دراثراصطلاك ازنظرنسبی قدری بیشتراست وبرای تصحیح آنهم‌فرمول های‌تجربی وجود دارند که ضریب های لازم‌برای تصحیح وتبدیل ضریب بهره را تعیین میکنند.

درآزمایش خلاءزائی برای توربین های آبی موضوع مهم تعیین حدود تغییرفشار وشرطهای دیگر کاراست که باعث ایجاد پدیده مزبوره‌میگردد وبرای اینکار باید تحقیق نمود که چه موقع و درچه شرایطی دریک یاچندنقطه‌فشاربرابرفشاربخارآب میشود. البته‌این‌نقطه ها قبل ازآزمایش ازمجهول های‌مسئله محسوب میشوند. دراین نوع بررسی‌ها باید فشار مطلق را در نقطه‌های مختلف توربین مورد مطالعه قرارداد و فشار نسبی نمیتواند مورد استفاده قرارگیرد. این موضوع باثبات رسیده که برای مطالعه خلاءزائی بایدطبق‌قانون تشابه فرود عمل کرد و چنانچه شرط های تشابه کاملاً برقرار نباشند انحراف ها را تاحد ممکن محدود نگاهداشت. ولی برای اینکه بتوان پدیده مزبور را درمناسبترین مورد یعنی در نزدیکی جدارها ایجاد کرد بایدعدد رینولدز (Reynolds) کافی اختیارنمودبعبارت‌دیگربایداندازه‌های‌مدل‌آزمایشی‌نسبتاً بزرك وارتفاع ریزش نیزمکفی باشد.

نتیجه های حاصل ازآزمایش روی توربین های مدل را میتوان برای مسئله‌های مختلفی بکار برد و در زیر فقط مسئله تعیین ضریب بهره وخلاءزائی را توضیح خواهیم داد.

۱ـ تعیین ضریب بهره یك توربین

شرط تشابه برای تعیین ضریب بهره ماشین صنعتی از روی مدل کوچک آنست که مقدار $\frac{n.D}{\sqrt{h}}$ برای‌مدل ودستگاه صنعتی‌یکسان باشد. بنابراین برای تعیین‌ضریب بهره درشرطهای مختلف کار بایدتوربین مدل را برای مقدارهای مختلف رابطه فوق آزمایش نمود. برای این‌منظور کافی است که درمطالعه ضریب بهره برحسب سرعت پارامترهای h (ارتفاع ریزش) و D (قطر چرخ) را بطور دلخواه ثابت گرفته ومقدار n (دور در دقیقه) را تغییر دهیم. مثلاً قطرچرخ آزمایشی را D_e وارتفاع ریزش را h_e اختیارنمائیم. (ارتفاع h_e ممکن است تغییرات جزئی نماید ودرنتیجه لازمست درآخر هرآزمایش مقدارآنرا بطور دقیق اندازه گیری و تعیین‌نمود). ساده‌ترین روش این آزمایش آنستکه درجه تغذیه توربین را در مبداء مقیاس مثلاً برابر S اختیارکنیم (برای این منظور درتوربین های واکنشی‌بازشدگی پره‌های هادی ودرتوربین های ضربه‌ای‌سوزن افشانك در وضع معینی قرارداده میشوند). برای اندازه‌گیری قدرت توربین آزمایشی وزنهٔ P_e را روی بازوی ترمز (مثلاً ترمز پرونی Prony) قرار میدهیم ومقدار فشردگی فنك‌های ترمزرا بحدی بالا میبریم که‌بازوی دستگاه ترمز بوضع افقی درآید. پس از اندکی تأمل مشاهده میشود که شدت آب روی توربین نیز بصورت

ثابتی درمیآید. هرگاه ضریب تبدیل وزنه P_e به لنگر مقاومت C_e برای ترمز K فرض شود لنگر وارد روی محور توربین عبارت خواهد بود از:

$$C_e = K.P_e$$

دراینحالت با دقت لازم سرعت دوران n_e دردقیقه وارتفاع ریزش قطعی h_e وآب روی Q_e توربین را اندازه گرفته وازاین مقدارها توان W_e روی محوروضریب بهره ρ_e بشرح زیر بدست میآیند:

$$۱) \quad W_e = \text{لنگر مقاوم} \times \text{سرعت زاویه‌ای} = \frac{۲\pi}{۶۰} \cdot n_e \cdot C_e$$

$$۲) \quad \rho_e = \frac{\text{توان مکانیکی روی محور}}{\text{توان هیدرلیکی کل}} = \frac{۲\pi \cdot n_e \cdot C_e}{۶۰ \times Q_e \cdot h_e}.$$

دو فرمول بالا وپارامترهای موجود درآنها بطریق زیرمورد استفاده قرار میگیرند:

هرگاه با درجه تغذیه ثابت S وزنهٔ P_e را تغییر دهیم و بازاء هرمقدار ازآن ρ_e و W_e را با استفاده از فرمول‌های (۱) و (۲) حساب کنیم یک سری نقطه بدست میآید که مجموع آنها درصفحه (W_e و ρ_e) یکی از منحنی‌های مشخصه توربین را رسم می‌کند. چنانچه درجه تغذیه S را تغییر دهیم و بهمان روش آزمایش را تکرار نموده ومحاسبه را انجام دهیم میتوان یکدسته منحنی رسم کرد که مشخصه های توربین با درجه تغذیه‌های مختلف است وهریک ازاین مشخصه ها دارای یک S ثابت میباشد.

معمولاً نتیجه حاصل ازمنحنی‌های بالارا تبدیل به‌منحنی‌هایی باارتفاع ریزش: متر۱ = h_{e_1} میکنند وبا استفاده ازقانون‌های تشابه مقدارعددی متغیرهای W_e و n_e و Q_e را تبدیل بمقدارهای عددی جدید که به W_{e_1} و n_{e_1} و Q_{e_1} نمایش داده میشوند می‌نمایند بنحوی که در این تغییر اندازه‌ها مقدار ρ_e یعنی ضریب بهره تغییر نکند. فرمول‌های تبدیل براساس قانون‌های تشابه بقراز زیر است:

$$W_{e_1} = \frac{W_e}{h^{\frac{۳}{۲}}} \quad \text{و} \quad Q_{e_1} = \frac{Q}{\sqrt{h_e}} \quad \text{و} \quad n_{e_1} = \frac{n_e}{\sqrt{h}}$$

با استفاده از مقدارهای محاسبه شده جدید ابتدامنحنی‌های نظیرمشخصه های هم S را درصفحهٔ (W_{e_1} و ρ_e) وهمچنین مشخصه‌های هم S را درصفحهٔ (W_{e_1} و n_{e_1}) رسم می کنیم. باتعیین محل تقاطع دنباله منحنی‌های هم S در صفحهٔ (W_{e_1} و n_{e_1}) با محورافقی n_{e_1} سرعت فرارتوربین مفروض که سرعت بدون بارآنست و ازنظر مقاومت توربین وآلترناتوردانستن آن الزامی است بدست‌میآید. بعلاوه با ترکیب دودسته منحنی‌های‌جدید نامبرده دربالا منحنی‌های هم بهره را نیزدرصفحهٔ (W_{e_1} و n_{e_1}) که بنام مشخصه های تراز نیزخوانده‌میشوند رسم میکنیم. بالاخره با رسم منحنی‌های مشخصه «سرعت مخصوص ثابت» وبعبارت دیگر مشخصه‌های هم سرعت n_s در صفحهٔ (W_{e_1} و n_{e_1}) دسته منحنی‌های مشخصه را تکمیل می‌نمائیم (برای تعیین n_s از رابطه $n_s = \frac{n_{e_1}\sqrt{W_e}}{h_e^{\frac{۳}{۲}}}$ استفاده میشود).

اهمیت مشخصه‌های سرعت مخصوص ثابت یا منحنی‌های هم سرعت n_s در صفحهٔ $(W_{e1}$ و $n_{e1})$ دراینست که اولاً سرعت مخصوص n_s یکی از پارامترهای عمده طبقه بندی توربین است و نوع توربین را مشخص میکند ثانیاً مقدار سرعت مخصوص n_s برای کلیه توربین های متشابه که شالوده کار آنها مطابق قانون‌های تشابه باشد یکسان است.

با این ترتیب درحقیقت ضریب بهره وسرعت فرار توربین های فرانسیس وپلتون درحالتهای مختلف کار مشخص گردیده است ولی آنچه در بالا بآن اشاره شد درمورد توربین های کاپلان پیچیده‌تر میشود زیرا در این نوع ماشین‌ها تعیین شرط مکانیکی کار بستگی به دوپارامتر دارد یکی درجه تغذیه S که مثل توربین های فرانسیس وپلتون است ودیگری زاویه متغیر i پره‌های توربین. بعلت وجود این دومتغیر مطالعه توربین های کاپلان بطریق زیر عمل میشود:

ابتدا همهٔ مشخصه‌های ماشین را برای S های ثابت درصفحهٔ $(W_{e1}$ و $n_{e1})$ برای زاویهٔ معین رسم میکنند سپس مقدار ثابت دیگری برای زاویهٔ i انتخاب کرده وهمه آزمایش‌ها را برای بدست آوردن دسته دیگری از همان مشخصه‌ها تکرار می کنند. باین ترتیب کلیه مشخصه‌های تراز در صفحهٔ $(W_{e1}$ و $n_{e1})$ برای مقدار های متفاوت i بدست میآید. ضریب بهره ماکزیموم در هرنقطه از صفحهٔ $(W_{e1}$ و $n_{e1})$ بوسیله منحنی‌پوش مشخصه های ترازتعیین میشود. باید متذکربود که درنقاط مختلف ازهرمنحنی پوش که‌مشخص یک ضریب بهره ثابت ρ_e است زاویهٔ i و درجه تغذیه S هریک مقدارهای متفاوتی خواهند داشت و هرگاه کلیهٔ نقطه هائی‌راکه دارای i ثابت و S ثابت هستند نظیر بنظیر بیکدیگر وصل کنیم منحنی‌های هم S وهم i درصفحهٔ $(W_{e1}$ و $n_{e1})$ بدست خواهند آمد.

انتخاب شکل ونوع چرخ توربین و همچنین نقطه عمل آن که از مشخصه های حاصل از آزمایش روی توربین مدل بدست میآید علاوه بر تجربه سازنده تابع ارتفاع ریزش ومشخصات‌تاسیساتی است که باید مورد بهره‌برداری قرارگیرد. با در نظرگرفتن این نکته‌ها میتوان مناسبترین قطر D چرخ توربین را برحسب ارتفاع h آب ودور حقیقی توربین صنعتی براساس رابطه زیرکه از قانون تشابه نتیجه میشود بدست‌آورد:

$$\frac{D}{D_e} = \frac{n_{e1}}{n}\sqrt{h}$$

درمرحله‌بعدی‌با استفاده ازمشخصه های‌ضریب بهره‌ثابت وبکاربردن‌ضرایب‌اصلاحی که‌ازفرمول های تجربی بدست آمده‌اند میتوان‌مشخصه های ضریب بهره ثابت‌را برای شرایط متغیر کارتأسیسات پیش‌بینی کرده وبدست‌آورد. بااین ترتیب مشخصه‌ای که‌سازنده هنگام تحویل توربین هاباید ضمانت کند تعیین خواهدشد.

برای توربین های کاپلان با استفاده ازمنحنی‌های هم زاویه i ومنحنی‌های هم S میتوان‌مقدارهای S و i مربوط به‌مناسبترین شرط توربین را تعیین نمود.

درمرحله نهائی باید سرعت فرار ماکزیمم توربین کاپلان را نیز معین کرد زیرا دانستن آن برای

محاسبه اجزاء توربین والترناتور از نظر مقاومت در نامناسبترین نقطهٔ کار کاملا ضروری است. هر گاه سرعت فرار را به N_e نمایش دهیم و منحنی‌های (N_e و i) را با درجه تغذیه های ثابت S_1 وS_2 ... وS_n رسم کنیم ازمنحنی‌پوش آنها سرعت فرارماکزیمم استخراج میشود واین‌سرعتی‌است که برای محاسبه توربین والترناتور ازنظر مقاومت باید مورد استفاده قرار گیرد.

۲ـ مطالعه خلاءزائی یاکاویتاسیون

باآنچه که گفته‌شد نتیجه‌های وخیم حاصل ازخلاءزائی‌را درماشین های آبی‌تذکردادیم. البته‌برای جلوگیری ازایجاد خلاء درتوربین باید تاآنجا که مقدور است ضریب اطمینان بزرگتری‌با رعایت نکته‌های زیربکار برد.

- افزایش جزئی اندازه‌های ماشین بیش ازآنچه که محاسبه تعیین کرده است
- پائین آوردن سرعت دوران
- کاستن ارتفاع مکش بوسیله پائین آوردن توربین

البته عملی نمودن هریک ازچاره جوئی‌های بالا توأم با بالارفتن هزینه‌های ساختمانی ومکانیکی خواهد بود. بنابراین بهترین ومناسبترین شرط کار آنستکه ماشین درحدنهائی خلاء زائی وبا در نظرگرفتن ضریب اطمینان کم محاسبه شده وکارکند.

خطر ایجاد خلاءزائی درماشین هائیکه درفشار هوا h_a و ارتفاع مکش h_s وارتفاع ریزش h باید کارکنند بوسیله عددی نمایش داده میشود که ضریب خلاءزائی توما نام دارد ومقدارآن مساوی است‌با:

$$\sigma = \frac{h_a - h_s}{h}$$

درهرنقطه عمل توربین خلاء هنگامی ایجاد میشود که مقدار σ پائین آمده ومساوی یا کمتر ازσ بحرانی گردد. σ_c بحرانی تابع‌شکل چرخ توربین ورژیم کارآنست. مبنای‌آزمایش برای تعیین شرط‌خلاءزائی بقرار زیر است:

در نقطه کار ثابت بتدریج‌ارتفاع مکش h_{se} را زیاد می‌کنند وبازاء هرمقدار از h_{se} مقدارهای نظیر C_e وh_e وQ_e وn_e را اندازه میگیرند و باین ترتیب در ارتفاع های مختلف مکش میتوان تغییرات ضریب بهره توربین را تحقیق نمود ومنحنی‌نمایش تغییرات σ را برحسب P رسم کرد. این منحنی معمولا یک خط افقی است ولی بازاء مقدار σ_c بحرانی که شروع خطر خلاء زائی میباشد این خط شکسته‌شده وبطرف پائین میآید. بدین وسیله میتوان σ_c را برای هریک از نقطه های کار توربین تعیین نمود. با تکرار آزمایش های بالا منحنی‌های σ_c ثابت را برای توربین درصفحهٔ (W_{e1} و n_{e1}) رسم می‌نمائیم واین منحنی‌ها درواقع‌مکمل مشخصه های هم‌بهره توربین درصفحهٔ (W_{e1} و n_{e1}) میباشند. تعیین‌ضریب‌بهره برحسب σ_c در هرنقطه ازکار

توربین بوسیله مقدارهای n_{e_1} و W_{e_1} و S درتوربین های فرانسیس وپلتون وبااندازه گرفتن اضافی i درتوربینهای کاپلان میسر است.

روش استفاده از ضریب خلاءزائی توما برای نصب یک توربین در ارتفاع معین بدین قرار است که ابتدا نقطه های عمل توربین را در رژیم های معمولی روی منحنی σ_c ثابت درصفحه (W_{e_1} و n_{e_1}) برده و σ_c ماکزیموم را بدست میآوریم اینمقدار نمودارکوچکترین σ_c صنعتی‌است که میتوان درنصب‌ماشین قبول نموده واز روی آن ارتفاع مکش ماکزیموم h_s تعیین ومشخص میگردد.

بوسیله‌آزمایش های خلاءزائی میتوان اثرخلاءزائی‌را روی سرعت فرار N_e وشدت‌آب روی توربین مشخص کرد. بعنوان مثال هرگاه منحنی (σ وN_e) را رسم نموده و مشاهده کنیم که این منحنی بازاء σ_1 شکسته شده و σ_1 بزرگتراز σ_c بحرانی‌باشد که برای توربین اختیار نموده‌ایم‌میتوان‌درمحاسبه مقاومت توربین والترناتورکمتر سختگیری کرد زیرا در چنین حالتی دراثرخلاءزائی بازاء σ_c بحرانی سرعت فرار توربین قبلاً سقوط کرده است.