# پایش وضعیت توربین بخار بر مبنای عملکرد ترمودینامیکی

محمد علی افشار ارومیه[۱]، آرمان محسنی[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، m.afsharurumieh@mail.sbu.ac.ir
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، Ar_Mohseni@sbu.ac.ir

**چکیده - توربین بخار یکی از ماشین‌های مهم در نیروگاه حرارتی است که وظیفه تولید توان مکانیکی از انرژی بخار را بر عهده دارد. این دستگاه به دلیل وجود اجزای متحرک فراوان و تلرانس‌های بسیار کم، نیاز به تعمیر و نگهداری خاص دارد. اضافه شدن یک برنامه پایش وضعیت به برنامه تعمیر و نگهداری توربین، باعث هدفمند و بهینه شدن برنامه تعمیر و نگهداری آن و درنهایت کاهش هزینه تولید توان الکتریکی می‌شود. برای انتخاب روش پایش وضعیت مناسب بایستی به شرایط عملکرد و عیب‌های محتمل توربین بخار توجه داشت. تا به امروز در زمینه‌ی پایش وضعیت ارتعاشی توربین بخار تلاش‌های بسیاری صورت گرفته و پیشرفتهای چشمگیری در این زمینه حاصل شده است. در این مقاله، مقوله پایش وضعیت توربین بخار از دیدگاه ترمودینامیک و مکانیک سیالات مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس با بررسی عیوب قابل تشخیص و نحوه تأثیرگذاری این عیوب بر عملکرد توربین، یک روش پایش وضعیت توسعه داده شده و نتایج اجرای آن بر یک نمونه ارائه می‌شود.**

کلید واژه‌ها: پایش وضعیت، توربین بخار، عملکرد ترمودینامیکی

## ۱- مقدمه

پایش وضعیت همواره به منظور کاهش زمان تعمیرات خارج از برنامه و افزایش زمان بین تعمیرات تجهیزات، مورد توجه مهندسان بوده است. افزایش سلامت تجهیزات صنعتی و اطمینان از کارکرد صحیح آن‌ها از جمله دلایل این توجه است. با توجه به نقش نیروگاه‌های حرارتی در صنعت برق، سلامت و عملکرد صحیح تجهیزات مورد استفاده در این نیروگاه‌ها از اهمیت بسیار برخوردار است. از جمله تجهیزات مهم نیروگاه‌های حرارتی می‌توان به توربین بخار اشاره کرد که تا به امروز تلاش‌های بسیاری در مورد پایش وضعیت آن انجام شده است. بسیاری از این تلاش‌ها بر مبنای پایش وضعیت ارتعاشی بوده و پایش وضعیت توربین بر مبنای عملکرد ترمودینامیکی، موضوعی است که کم‌تر به آن توجه شده است. مهم‌ترین نکته در انتخاب روش پایش وضعیت این است که روش انتخابی بیش‌ترین همخوانی را با حالت‌های خرابی و فرسودگی ماشین داشته باشد [۱]. با رجوع به استاندارد ISO 13380 [۲] می‌توان مشاهده کرد که روشهای پایش عملکرد (Performance Monitoring)، توانایی شناسایی عیوب احتمالی توربین بخار را دارند و همچنین برخی از عیوبی که با پایش وضعیت ارتعاشی قابل تشخیص نیستند را نیز پوشش می‌دهند.

با گذشت زمان، اهمیت بازده و اهمیت گنجاندن آن در برنامه‌های پایش وضعیت هرچه بیش‌تر نمایان شد. در همین راستا پلزانس (Stephen E. Plaisance)[۳] در سال ۱۳۸۵ هش. به بررسی نسبی پایش ارتعاشی و عملکرد توربین بخار و تطابق خروجی آن‌ها پرداخته است. در سال ۱۳۸۲ هش. بیبه ( Ray Beebe) [۴] مقاله‌ای در مورد پایش عملکرد توربین بخار منتشر، و مبانی و اصول این روش را مطرح کرد. وی در سال ۱۳۹۱ هش. [۵] کتابی در همین زمینه به چاپ رساند و در آن به تبیین روش‌های مختلف و همچنین انتقال تجربیات خود در زمینه پایش وضعیت توربین بخار پرداخته است. در سال ۱۳۸۷ هش. کارلسون (Christer Karlsson) و همکاران [۶] در مقاله خود با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و بیزی ( Bayesian Networks) یک برنامه پایش وضعیت برای توربین بخار به منظور تشخیص و محدود کردن عیوب، ارائه کرده‌اند. از این برنامه برای پیدا کردن دلایل عیوب مورد نظر و کمک به اپراتور توربین برای محدود کردن عیب استفاده می‌شود. همچنین در سال ۱۳۸۹ هش. علیرضا بهادری [۷] روشی برای تخمین عملکرد توربین بخار ارائه کرد. در این روش ابتدا ضریب تصحیح بازده بار جزئی (Part Load Efficiency) به صورت همبسته (Correlated)، به صورت تابعی از توان خروجی یک توربین تبدیل می‌شود. سپس ضرایب محاسبه شده برای این تابع به عنوان تابعی دیگری از تعداد طبقات تبدیل می‌شوند. تابع مشتق شده برای بدست آوردن ضرایب جدید، به کار برده می‌شود تا بازده محاسبه شود. این روش دارای خطای ۱/۴٪ است. در همین سال پاول آلبرت در گزارشی [۸] به بررسی انواع تست‌های عملکردی توربین و در ادامه به مکانیزم‌های افت قابل محاسبه با آن پرداخته است.

سازمان استاندارد جهانی، ISO، در دو استاندارد خود به

شماره‌های ۱۳۳۸۰ [۲] و ۱۸۱۲۹ [۹] به معرفی پارامترهای لازم برای پایش عملکرد ماشین‌های مختلف و ارائه راهنمایی‌هایی برای شرایط مورد نیاز جهت انجام تست‌ها پرداخته است. همچنین انجمن مهندسان مکانیک آمریکا، ASME ( American Society of Mechanical Engineers)، در استاندارد PTC 6 خود [۱۰]، نحوه انجام یک تست نرخ حرارتی (Heat Rate) را ارائه کرده است. این تست به منظور تعیین شرایط عملکرد توربین انجام می‌شود. اما از آنجایی که پایش وضعیت نیاز به انجام این نوع تست‌ها به صورت دوره‌ای دارد و هزینه انجام این آزمون بالاست، این انجمن در گزارش PTC 6S [۱۱] تست‌های ساده شده نرخ حرارتی، آزمون ظرفیت و آزمون افت آنتالپی را برای انواع مختلف توربین ارائه کرده است.

## ۲- پایش عملکرد توربین بخار

یکی از پارامترهای مهم هر دستگاهی عملکرد آن است که به صورت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اگر دستگاهی در یک کارخانه با عملکرد مناسب کار نکند، می‌تواند در کارایی دیگر دستگاه‌ها و در نتیجه محصولات نهایی کارخانه تأثیرگذار باشد. البته عملکرد تنها برای یک دستگاه تعریف نمی‌شود، بلکه برای فرایندهای مختلف هم معنی‌دار است. بر اساس استاندارد ISO 13380 [۲]، عملکرد هر ماشین با ظرفیت آن تعریف می‌شود. ظرفیت نیز با یک یا چند مقدار مشخصه مانند قدرت، دبی، بازده و یا سرعت تعریف می‌شود.

پایش عملکرد ترمودینامیکی مانند تمامی روش‌های پایش وضعیت مزایا و معایب خاص خود را دارد. از جمله مزایای این روش، پایش همزمان عملکرد است و از معایب آن می‌توان به هزینه‌ی نسبتاً بالای تهیه و نصب ابزار دقیق و کالیبراسیون آنها برای اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر در کارایی اشاره کرد. بالا بودن این هزینه از آن جهت است که اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر، نیاز به دقت بالایی دارد [۴].

### ۲-۱- کاهش عملکرد توربین

با بالا رفتن سن توربین بخار، بر روی پره‌های آن خوردگی و رسوب تشکیل می‌شود و به علت سایش، لقی بین نشت‌بندها افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه این پدیده‌ها، بازده توربین کاهش پیدا می‌کند. این افت در ماه‌های ابتدایی کارکرد توربین بخار بیش‌تر بوده و در مابقی عمر کاری، اگر توربین در شرایط عملکردی مناسب مورد بهره برداری قرار گیرد و وضعیت شیمیایی آب مورد استفاده در چرخه بخار مناسب باشد، کاهش بازده با نرخ کم ادامه می‌یابد. برای واحدهای سوخت فسیلی با یا بدون بازیاب، انجمن مهندسان مکانیک آمریکا در استاندارد PTC 6 [۱۰] نحوه تخمین افت بازده را برای ۴۸ ماه اول کاری توربین ارائه کرده است، معادله (۱). این تخمین، میانگین افت بازده یک واحد توربین بخار در شرایط مطلوب و همچنین شرایط مناسب شیمیایی آب است. این تخمین زمانی برای استفاده در نظر گرفته می‌شود که آزمون پذیرش (acceptance test) به تعویق افتاده باشد.

$$D = \frac{f}{\log(W_{\text{gen}})}\sqrt{\frac{p_{1,g}}{16548}} \qquad (۱)$$

که در آن $D$ درصد افت بازده، $W_{\text{gen}}$ توان ژنراتور بر حسب مگاوات، $p_{1,g}$ فشار نسبی بخار قبل از ورودی به توربین ( main stop valve pressure) بر حسب کیلو پاسکال و $f$ درصد افت پایه (ضریبی است که بر حسب تجربه بدست می‌آید.) است که مقادیر آن در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱- درصد افت پایه [۵]

| ماه‌های سرویس | ۲ | ۱۲ | ۲۴ | ۳۶ | ۴۸ |
|---|---|---|---|---|---|
| درصد افت پایه | ۰ | ۱ | ۱/۵ | ۱/۸ | ۲/۲ |

### ۲-۲- آزمون‌های پایش عملکرد

پایش وضعیت بر اساس مقایسه عملکرد یک دستگاه با وضعیت گذشته خود و یک وضعیت مرجع صورت می‌گیرد. پس در ابتدا باید وضعیت مرجع توربین مشخص شود. در این خصوص استاندارد ASME PTC 6 یک روش برای تعیین عملکرد یک واحد توربین بخار ارائه کرده است [۵]. این آزمایش شامل بدست آوردن تمامی پارامترهای اساسی اجزای چرخه بخار از جمله عملکرد توربین است. همچنین این آزمون به عنوان آزمون پذیرش توسط سازنده انجام می‌شود [۸]. هرچند این آزمون استاندارد برای عملکرد پایه نتایج خوبی ارائه می‌کند، اما از نظر اقتصادی برای ارزیابی‌های دوره‌ای به منظور پایش عملکرد توجیه پذیر نیست [۸]. با این حال این آزمایش استاندارد می‌تواند به منظور تعیین وضعیت مرجع یک توربین بخار مورد استفاده قرار گیرد.

### ۲-۳- آزمون نرخ حرارتی ساده شده

نسبت حرارت دیگ بخار که به توربین منتقل می‌شود به توان خروجی ژنراتور، *نرخ حرارتی* نامیده می‌شود. واحد نرخ حرارتی kJ/kWh است. معمولاً برای واحدهای دارای بازیاب حرارتی با شرایط بخار زیر نقطه بحرانی، مقدار نرخ حرارتی حدود ۸۵۰۰ kJ/kWh است [۵].

نرخ حرارتی توربین بخار یکی از پارامترهایی است که می‌توان از آن به عنوان معیار سلامت توربین استفاده کرد. در این

روش تغییرات نرخ حرارتی در طول زمان بر روی یک نمودار نمایش داده می‌شود و هر گونه افت در آن بیانگر افتی در داخل توربین است.

بر اساس گزارش ASME PTC 6S هنگامی که تغییر عملکرد توسط آزمون ظرفیت یا آزمون VWO ( Valve Wide Open Test) (بخش ۲-۴) تشخیص داده می‌شود، برای تشخیص علت نیاز به اجرای آزمون نرخ حرارتی به صورت ساده شده است. هنگامی که تغییر عمکرد توسط این آزمون نیز تشخیص داده شود، باید اندازه‌گیری‌های اضافه‌ای برای تعیین محل ایراد انجام شود. این اندازه‌گیری‌ها شامل موارد زیر می‌شود:

- فشار تمامی طبقات در دسترس توربین
- میزان نشتی از نشت بندها
- تفاوت دمای ورودی‌ها و خروجی‌های مبدل‌ها

در محاسبه مقدار نرخ حرارتی نیاز است برای تمامی پارامترها یک ضریب تصحیح در نظر گرفته شود. با بدست آوردن تمامی ضرایب تصحیح و اعمال آن‌ها بر داده‌های خام اندازه‌گیری شده، می‌توان نرخ حرارتی را از معادله (۲) بدست آورد. خود نرخ حرارتی نیز نیاز به یک ضریب تصحیح دارد که برابر است با حاصلضرب ضرایب تصحیح دیگر پارامترها است [۱۱].

$$\zeta = \frac{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2}{W_{gen}} \qquad (۲)$$

در این معادله $\zeta$ نرخ حرارتی سیکل، $\dot{m}_1$ و $h_1$ به ترتیب دبی جرمی و آنتالپی ورودی توربین، $\dot{m}_2$ و $h_2$ دبی جرمی و آنتالپی خروجی آخرین مبدل حرارتی و $W_{gen}$ توان ژنراتور است.

## ۲-۴- آزمون ظرفیت

به دلیل سختی اندازه‌گیری دبی، معمولاً برای پایین نگه‌داشتن هزینه تعمیرات از آزمون ظرفیت (Capability Test) استفاده می‌شود. در این آزمون تمامی شیرهای کنترل دبی بخار توربین در حالت کاملاً باز قرار می‌گیرند، به همین خاطر این آزمون، آزمون VWO نیز نامیده می‌شود. این آزمون یک آزمایش دوره‌ای برای تعیین روند عملکرد توربین بوده و زمانی که توسط آن تغییری تشخیص داده شود، فرآیند عیب یابی با انجام آزمون نرخ حرارتی انجام می‌شود.

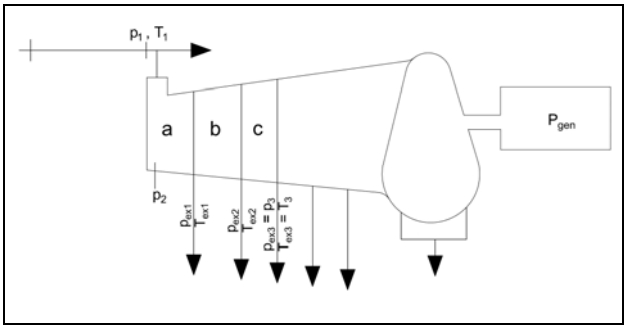
لازم به ذکر است خروجی آزمون VWO تنها برای پایش وضعیت توربین به کار می‌رود. اگر این آزمون به صورت هفتگی انجام شود، در صورت مشاهده افت عملکرد، می‌توان تشخیص داد که این افت ناگهانی بوده یا به آرامی اتفاق افتاده است [۵].

## ۲-۵- آزمون افت آنتالپی

آزمایش افت آنتالپی به شکل متداول برای پایش توربین‌های بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد و در آن از بازده آیزنتروپیک به عنوان شاخص سلامت توربین استفاده می‌شود. این آزمایش به تجهیزات کمی نیاز دارد، با این وجود بازدهی بخش‌هایی از توربین را مشخص می‌کند که بیش از بقیه مستعد زوال هستند. یک آزمایش افت آنتالپی می‌تواند بر روی هر بخشی از توربین که کاملاً در ناحیه مافوق گرم کار می‌کند، مانند بخشهای فشار بالا و فشار متوسط واحدهای بازیاب حرارت انجام شود [۸]. برای این آزمایش، فشار و دمای ورودی و خروجی بخش مورد نظر باید اندازه‌گیری شود. سپس بازده قسمت اندازه‌گیری شده با محاسبه نسبت افت آنتالپی واقعی به افت آیزنتروپیک آنتالپی محاسبه شود. در توربین‌های سرعت متغیر برای انجام آزمایش افت آنتالپی، با توجه به تغییر عملکرد توربین با تغییر سرعت، نیاز به در نظر گرفتن یک سرعت مبنا برای آزمایش است [۱۱].

## ۳- پایش بازده آیزنتروپیک

در این مقاله، با توجه به مطالب ذکر شده در بخش ۲ و استاندارد ISO 13380، بازده آیزنتروپیک به عنوان یکی از پارامترهای تعیین کننده وضعیت توربین بخار برای پایش عملکرد انتخاب شده است. اهمیت این موضوع از آن جهت است که بازده آیزنتروپیک به سادگی و با داشتن فشار و دمای نقاط مختلف، قابل محاسبه است. باید به این نکته توجه داشت که این سادگی فقط در قسمت‌هایی از توربین وجود دارد که در ناحیه مافوق گرم کار می‌کنند. در صورت ورود بخار به ناحیه اشباع، وضعیت بخار را نمی‌توان به وسیله پارامترهای فشار و دما بدست آورد. به منظور انجام یک شبیه سازی و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر بازده توربین، توربینی مانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.




شکل ۱- شماتیک یک توربین بخار با پنج زیرکش

از آنجایی که وضعیت بخار را فقط در بخش مافوق گرم توربین می‌توان با دما و فشار مشخص نمود، پایش بازده در چنین توربینی که ورودی آن بخار مافوق گرم بوده و خروجی آن در ناحیه اشباع می‌باشد، تنها بین ورودی تا زیرکش سوم مقدور

است. همچنین برای شبیه سازی نیاز به در نظر گرفتن فرض‌هایی است تا تحلیل ترمودینامکی بر روی توربین قابل انجام باشد. فرض‌های زیر در شبیه سازی اعمال شده است:

۱- فشار و دمای دریچه ورودی بخار تحت تأثیر شرایط عملکرد دیگ بخار بوده و ثابت است.

۲- سرعت چرخش محور توربین ثابت است.

۳- نسبت فشار ورودی به خروجی طبقات سالم توربین ثابت است.

۴- فاصله‌ی بین هر دو زیرکش یکسان است.

فاصله بین هر دو زیرکش، یک قسمت از توربین درنظر گرفته می‌شود و عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تحلیل صفر بعدی توربین بخار بین هر زیرکش و استفاده از فرض‌های بالا می‌توان تخمین بسیار خوبی از وضعیت توربین و همچنین تأثیر تغییرات دما و فشار بر بازده آیزنتروپیک بدست آورد. در این روش از بازده آیزنتروپیک به عنوان نشانگر سلامت توربین استفاده می‌شود. همچنین تغییرات دما و فشار از روندیابی تغییرات این پارامترها در تست پذیرش بدست می‌آید. توابع زیر بر همین اساس از توربین مورد بررسی استخراج شده است:

$$T = (22.58251 - 4.8239895\ x + 3.5713328\ x^2 - 1.864138\ x^3 + 0.38008459\ x^4 - 0.0264453328\ x^5)^2 \quad (۳)$$

$$p = \exp(9.073351 - 1.8815786\ x + 1.5905342\ x^2 - 0.82277853\ x^3 + 0.17450132\ x^4 - 0.013118589\ x^5) \quad (۴)$$

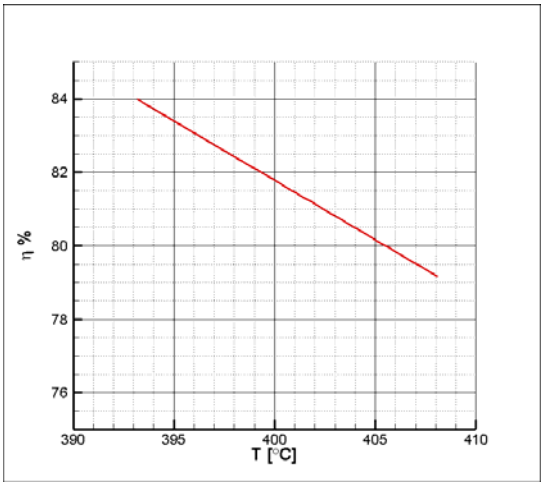
در این معادلات، $x$ شماره زیرکش (برای ورودی مقدار $x$ برابر صفر است)، $T$ دما برحسب سانتیگراد و $P$ برحسب کیلو پاسکال است.

در این روش با توجه به حساسیت پارامترها، تغییرات دما تأثیر بیشتری نسبت به تغییرات فشار بر بازده دارد. به همین خاطر دقت بالاتری را در اندازه‌گیری طلب می‌کند. برای انجام محاسبات نیاز به اندازه‌گیری دما به صورت استاتیک است. با توجه به کاهش سرعت بخار در زیرکش‌ها، بخار در آنها در شرایطی نزدیک سکون است و مقادیر اندازه‌گیری شده دما برای استفاده باید به مقادیر استاتیک تبدیل شوند. با بررسی بازده آیزنتروپیک و مقایسه مقادیر فشار و دما در زیرکش‌ها می‌توان عیوب زیر را پیش‌بینی کرد:

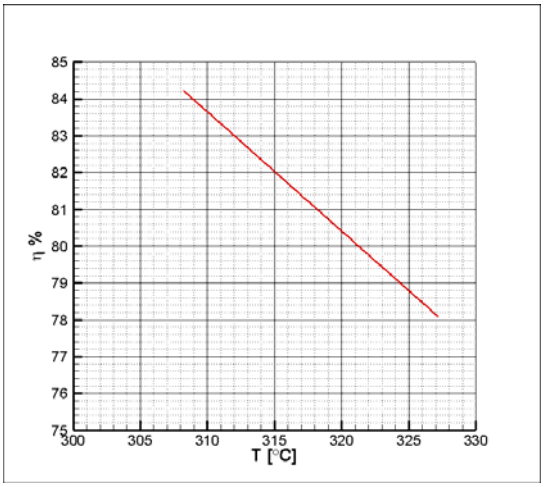
- نشتی نوک پره
- خوردگی پره
- تشکیل رسوب بر پره

## ۳-۱- تأثیر نشتی نوک پره

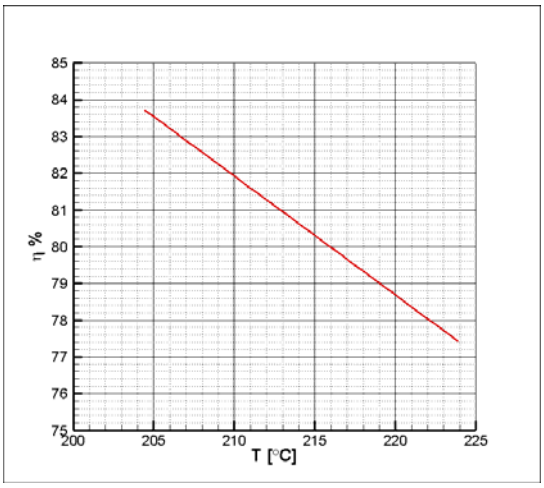
یکی از افتهای رایج که به علت وجود فاصله بین پره و پوسته در توربین رخ می‌دهد، نشتی جریان عبوری از نوک پره است. هنگامی که این جریان اضافی یا نشتی، از بالای پره عبور کند و بر روی پره کار انجام ندهد، باعث افت توان توربین می‌شود. همچنین به علت عدم انتقال انرژی به پره، جریان نشتی باعث بالا رفتن دمای بخار عبوری از توربین نسبت به شرایط طراحی می‌شود. این تغییر وضعیت را می‌توان از بالا رفتن دمای زیرکش‌ها تشخیص داد. در شکل‌های ۲ تا ۴ می‌توان تأثیر افزایش دمای زیرکش‌ها را بر بازده آیزنتروپیک مشاهده کرد. همان طور که از نمودارها مشخص است، افزایش دمای هر زیرکش، یعنی افزایش جریان عبوری از نوک پره طبقات بالادست آن، باعث کاهش بازده آیزنتروپیک می‌شود، به طوری که سه درجه سانتیگراد افت در دمای یک زیرکش، باعث افت بازده به میزان تقریبی یک درصد می‌شود. محاسبات در این بخش از قبل از ورودی توربین تا زیرکش سوم انجام شده است.




شکل ۲- کاهش بازده به دلیل افزایش دما در زیرکش اول




شکل ۳-کاهش بازده به دلیل افزایش دما در زیرکش دوم




شکل ۴-کاهش بازده به دلیل افزایش دما در زیرکش سوم

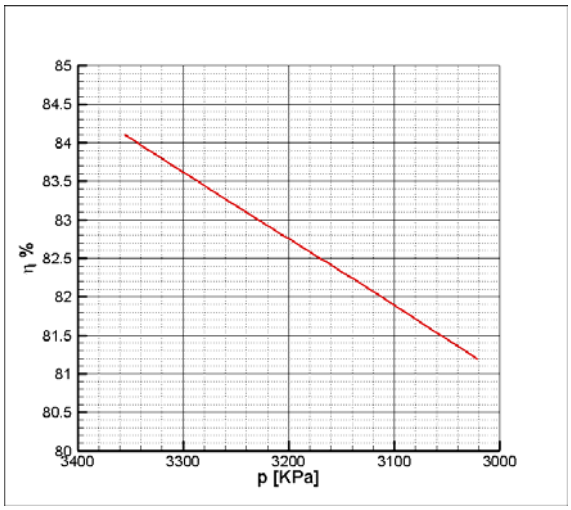
## ۳-۲- تأثیر خوردگی پره

خوردگی و آسیب پره که معمولاً به دلیل برخورد ذرات جامد یا قطرات ریز مایع با پره‌ها و یا در اثر خوردگی شیمیایی ایجاد می‌شود، به دو دلیل باعث افت توان خروجی توربین می‌شود:

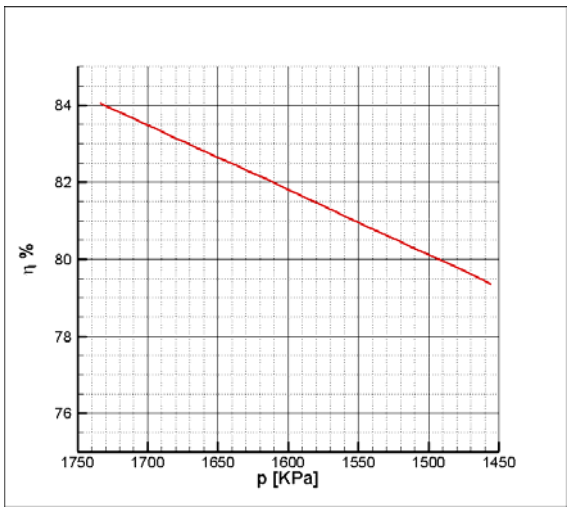
۱- افت فشار طبقات پایین دست محل خوردگی، به دلیل تغییر مساحت مؤثر (Effective Area) عبوری جریان

۲- تغییر در زبری سطح و شکل آیرودینامیکی پره و ایجاد گردابه و احتمالا جدایش در جریان

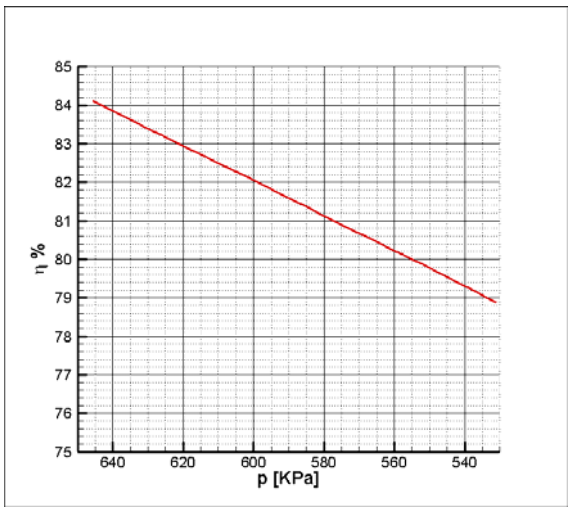
افت فشار هر زیرکش می‌تواند نشانه خوردگی در طبقات بالا دست باشد که تأثیر آن بر بازده آیزنتروپیک در شکل‌های ۵ تا ۷ نمایش داده شده است. خوردگی در یک طبقه باعث کاهش نسبت فشار خروجی به ورودی طبقه می‌شود که با توجه به ثابت بودن نسبت فشار دیگر طبقات این افت به طبقات دیگر منتقل می‌شود. محاسبات در این بخش از قبل از ورودی توربین تا زیرکش سوم انجام شده است.




شکل ۵- کاهش بازده به دلیل کاهش فشار زیرکش اول




شکل ۶-کاهش بازده به دلیل کاهش فشار زیرکش دوم

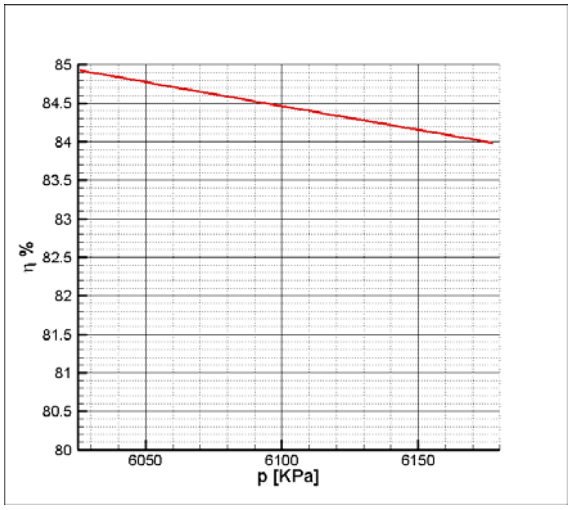



شکل ۷- کاهش بازده به دلیل کاهش فشار زیرکش سوم

همانطور که در شکل‌های ۵ تا ۷ ملاحظه می‌شود، افت فشار زیرکش‌ها باعث افت بازده می‌شود.

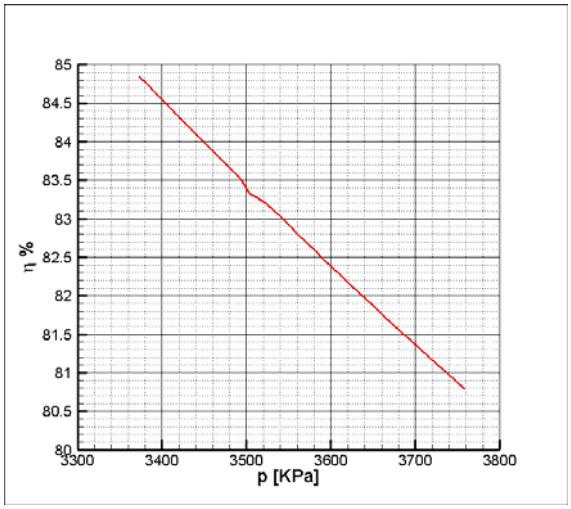
## ۳-۳- تأثیر تشکیل رسوب بر پره

تشکیل رسوب بر پره‌ها یکی از عوامل شایع افت عملکرد توربین است که به دلایل مختلف باعث افت در عملکرد و هدر رفتن انرژی می‌شود. هنگامی که رسوب بر روی پره‌های توربین تشکیل شود، زبری سطح پره افزایش می‌یابد و شکل ایرفویل را تغییر می‌دهد و همچنین باعث کاهش مساحت موثر عبور جریان مخصوصاً در قسمت نازل می‌شود. این امر باعث افزایش فشار بالادست می‌شود. تأثیر این افزایش فشار را بر بازده آیزنتروپیک می‌توان در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده نمود. این محاسبه از ورودی طبقه اول توربین تا خروجی زیرکش سوم بوده است.

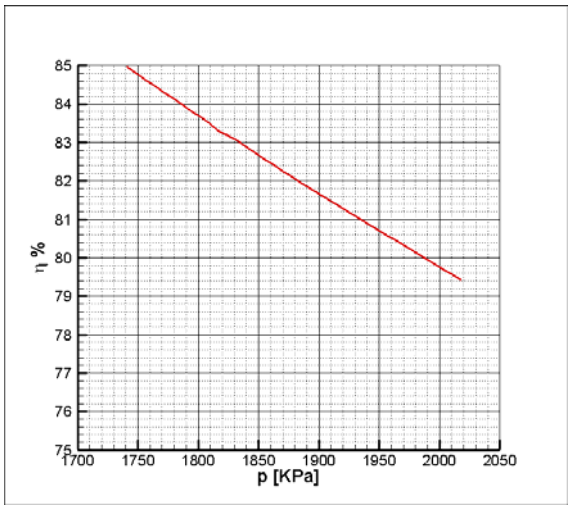



شکل ۸- کاهش بازده به دلیل افزایش فشار طبقه اول

در شکل‌های ۹ و ۱۰ یک شکستگی وجود دارد که دلیل آن نزدیکی داده‌ها به مرز ناحیه اشباع بخار در جداول آب و بخار مربوط می‌شود.




شکل ۹- کاهش بازده به دلیل افزایش فشار زیرکش اول




شکل ۱۰- کاهش بازده به دلیل افزایش فشار زیرکش دوم

همانطور که در شکل های ۲ الی ۱۰ مشخص شده است، تغییر مقدار پارامترهای ذکر شده از مقدار طراحی آن، باعث افت بازده آیزنتروپیک می‌شود. با توجه به این مطلب، در صورتی که شرایط عملیاتی توربین با شرایط عملیاتی طراحی یکسان باشد، تغییر در فشار و دمای زیرکش‌ها باعث افت بازده آیزنتروپیک شده و همچنین نشان دهنده وجود عیبی در توربین است.

باتوجه به مقدار دما و فشار زیرکش‌ها و شیب نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌شود که حساسیت بازده آیزنتروپیک به تغییر پارامترهای مربوط به بخش c مدل ارائه شده در شکل ۱ بیش‌تر از سایر بخش‌ها بوده و دلیل آن نیز میزان تغییرات دما یا فشار نسبت به مقدار پایه آن است. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات نسبی دما در یک زیرکش نسبت به تغییرات نسبی فشار در همان محل، تأثیر بیش‌تری بر بازده آیزنتروپیک کل مجموعه دارد. این مطلب نشان‌دهنده اهمیت عدم وجود نشتی‌ها در توربین بخار برای بازدهی هرچه بیش‌تر آن است

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا به معرفی و مقایسه آزمون‌های عملکردی توربین بخار و نتایج هر کدام پرداخته شده است. در ادامه روشی برای پایش عملکرد و در انتها نمودارهای تأثیر تغییرات دما و فشار زیرکش‌های توربین بر بازده آیزنتروپیک ارائه شده است.

در نمودارهای حاصل، مشاهده می‌شود که تغییرات دما نسبت به تغییرات فشار تأثیر بیشتری بر بازده دارد به صورتی که تنها سه درجه سانتیگراد افت در دمای یک زیرکش، باعث افت بازده به میزان تقریبی یک درصد می‌شود.

نتایج حاصل حاکی از آن است که می‌توان برای پایش وضعیت توربین بخار از بازده آیزنتروپیک، به صورت همزمان یا غیر همزمان بهره برد و این روش حساسیت مناسبی نسبت به

وضعیت کلی توربین داراست.

همچنین لازم به ذکر است که می‌توان از روش پایش عملکرد برای دیگر اجزای توربین مانند: سیستم گاورنر، شیرهای کنترل بخار، صافی ورودی بخار و غیره بهره برد.

## سپاسگزاری

با سپاس از جناب آقای مهندس مهران فضلی خانی که در انجام این کار ما را یاری نمودند.

## مراجع

[1] Davies, A., "Handbook of Condition Monitoring", Springer Science+Business Media Dordrecht, 1998.
[2] ISO 13380:2002(E), Condition Monitoring and Diagnosics of Machines-general guidelines on using performance parameters, International Organization for Standadization (ISO), 2002.
[3] Plaisance, Stephen E., "Integrated Performance and Condition Monitoring at Dupont", Optimization and Control Services, GE Energy, ORBIT, Vol. 26 No. 3 2006.
[4] Beebe, R., "Condition Monitoring of Steam Turbines by Performance Analysis", Journal of Quality in Maintenance Engineering, 9(2):102-112, 2003.
[5] Beebe, R., "Steam Turbine: Performance and Condition Mointoring". Terrence O'Hanlon, 2012.
[6] Karlsson, Ch. and Arriagada, J. and Genrup, M., "Detection and Interactive Isolation of Faults in Steam Turbines to Support Maintenance Decisions", Simulation Modelling Practice and Theory, 16:1689-1703, 2008.
[7] Bahadori, Alireza and Vuthaluru, Hari B, "Estimation of Performance of Steam Turbines Using a Simple Predictive Tool", Applied Thermal Engineering, 30:1832-1838, 2010.
[8] Albert, Paul, "Steam Turbine Thermal Evaluation and Assessment", tech. rep., GE Power Systems, 2010.
[9] ISO 18129:2014(E), Condition Monitoring and Diagnosics of Machines-approaches for performance diagnosis, International Organization for Standadization (ISO), 2014.
[10] ASME PTC 6:1996, Prefromance test code 6 on steam turbine, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1998.
[11] ASME PTC 6S Report: Prosedures for routine prefromance tests of steam turbines, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1988.