

## مدلسازی توربین‌های بخار تا ظرفیت 50 MW با استفاده از معادله خطی ویلان (LWL) و بررسی کارایی بخار خروجی

علی منشاری، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال؛ ali.menshari@gmail.com

علی گودینی، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال؛ ali.godini@gmail.com

مصطفی مافی، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)؛ m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

## چکیده

کامل‌تر گردید و برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مرجع [۱] مدل غیر خطی برای تجزیه و تحلیل ارتعاشات توربین ارایه گردیده است که به زمان زیادی برای تست در حالت‌های مختلف نیاز داشته و بطور مستقیم رابطه‌ای بین جریان جرمی بخار و توان ارائه نمی‌کند. در مرجع [۲] از سه روش متفاوت برای مدل‌سازی سیستم‌های تولید همزمان بهره گرفته شده که بدون ارائه نمونه عددی می‌باشد. در این مطالعه یک مدل خطی ساده و کارا جهت پیش‌بینی میزان تولید توان توربین بخار در جریان‌های جرمی مختلف ارائه شده است. مدلسازی بر روی توربین مدل SST-300 شرکت زیمنس<sup>۶</sup> صورت گرفته و تابعی خطی جهت پیش‌بینی رفتار این توربین در بارهای جزئی ارائه شده است.

## تئوری مدلسازی توربین بخار

با توجه به وجود روابط ترمودینامیکی برای تحلیل مسایل توربین‌های بخار با فرض بار ثابت برای محاسبه مقدار توان خروجی، در صورت اینکه فرآیند انبساط بخار بصورت آیزنتروپیک انجام گیرد، داریم:

$$\Delta h_{is} = h_1 - h_2 \quad (1)$$

با توجه به اینکه هیچگاه در عمل فرآیند انبساط بصورت آیزنتروپیک صورت نمی‌گیرد و آنتالپی خروجی بخار، مقداری بیشتر از حالت فوق دارد که عبارت است از:

$$\Delta h_{real} = h_1 - h'_2 \quad (2)$$

پس داریم:

$$W_{out} = \Delta h_{real} \cdot m - W_{loss} \quad (3)$$

شکل (۱) با توجه به رابطه (۳) در محدوده حداقل و حداکثر جریان جرمی بخار ممکن برای توربین بخار نمایش داده شده است.

پیش‌بینی میزان تولید توان توربین بخار در جریان‌های جرمی مختلف و مقدار دما و حالت بخار خروجی از توربین در کنترل سیستم‌های تولید برق یا تولید همزمان برق و حرارت، ضرورت مدلسازی توربین‌های بخار و یافتن رابطه‌ای مناسب بین جریان جرمی بخار ورودی و کار دریاقتی از توربین را نمایان می‌سازد. در این مطالعه از روش مدلسازی با توابع ریاضی با استفاده از 'LWL' استفاده شده است و یک نمونه توربین صنعتی بخار شرکت زیمنس که تا ۵۰ مگاوات قابلیت تولید توان دارد، بصورت عددی مدل شده است. نتایج حاصل از مدلسازی عددی، شرایط مختلف بهره‌برداری از توربین بخار، شرایط بخار خروجی و تاثیرات جریان‌های جرمی مختلف بخار بر عملکرد توربین را نشان می‌دهد. همچنین شرایط تولید بیشینه کار توسط توربین تعیین شده است.

کلمات کلیدی: توربین بخار، مدلسازی، LWL، توان توربین بخار

## مقدمه

نزدیک به ۲۰۰۰ سال پیش، ارشمیدس<sup>۱</sup> فیزیکدان یونانی برای تبدیل انرژی حرارتی بخار آب به نیروی مکانیکی، دستگاهی نسبتاً ساده ساخت که از دیدگاه اصول اولیه هنوز دستگاهی کامل‌تر از آن ساخته نشده و اساس کار ماشین بخار امروزی نیز تقریباً همان است. البته با گذشت زمان، به لحاظ ظاهری و تکنیکی، تغییرات و پیشرفت‌های اساسی در توربین‌های بخاری انجام شده است که قابل مقایسه با توربین‌های اولیه نیست.

برای نخستین بار فردی ایتالیایی به نام جیووانی برانکا<sup>۲</sup> به فکر افتاد که بخار آب تحت فشار را با سرعت زیاد از سوراخ یک دهانه عبور دهد و از انرژی جنبشی آن استفاده کند. وی سرانجام در سال ۱۶۲۹ میلادی توانست چرخه‌ای را که در پیرامون آن چند پره نصب شده بود در برابر این دهانه قرار داده و آن را به گردش در آورد ولی به دلیل نداشتن وسیله کار و ماشین ابزار دقیق، اختراع وی به مدت دویست سال به حال اولیه خود باقی ماند.

با پیشرفت علم در سال ۱۸۸۳ یک مهندس سوئدی به نام گوستاو دولوال<sup>۳</sup> موفق به ساخت نخستین توربین بخاری با یک طبقه گردید. سپس در سال ۱۸۸۴، چارلز پارسون<sup>۴</sup> توربینی ساخت که کاهش فشار آن در چند طبقه پره‌ها صورت می‌گرفت و این امر باعث می‌شد تا مانع از سرعت زیاد بخار شود و در نتیجه سرعت زیاد گردش روتور توربین (مشکل توربین دولوال) کم گردد. از آن پس، روز به روز نقایص توربین برطرف شد و ساختمان آن

<sup>1</sup> Linear Willan's Line

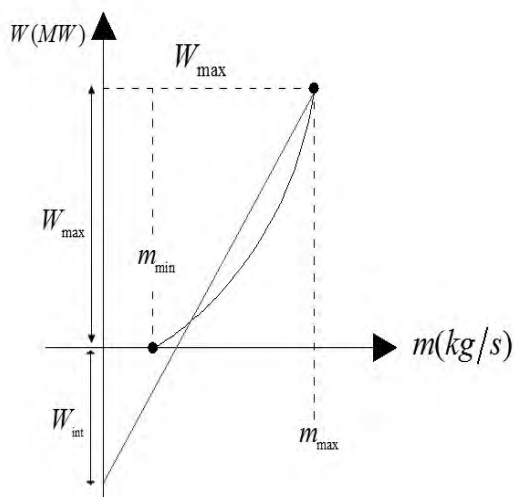
<sup>2</sup> Archimedes

<sup>3</sup> Giovanni Branca

<sup>4</sup> Gustaf de Laval

<sup>5</sup> Charles Algernon Parsons

<sup>6</sup> Industrial Steam Turbines



شکل ۳: نمودار کار برحسب جریان جرمی ورودی

که معادل رابطه زیر است:

$$W_{int} = L W_{max} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق L شیب خط می باشد و به فاکتورهای زیر وابسته است:

- سائز توربین
- کارخانه سازنده
- نوع کاربرد

مقدار عددی L بصورت تقریبی در محدوده (2 → 0.05) متغیر است.

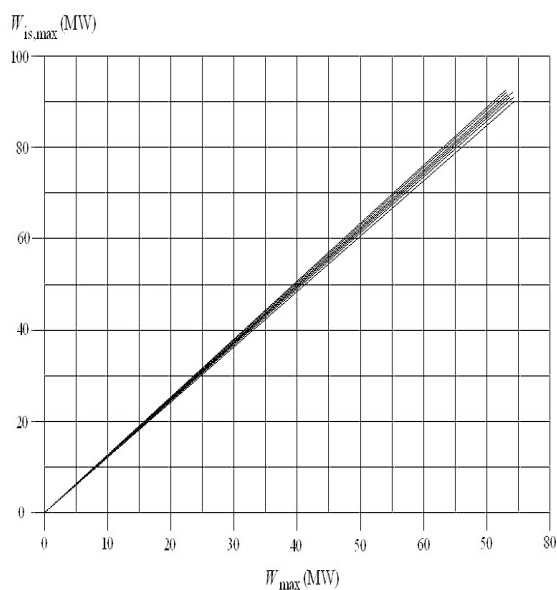
از طرفی با توجه به رابطه (۸) در توربین های بخار داریم:

$$\eta = \frac{W_{max}}{W_{is,max}} \quad (۸)$$

با ترسیم نمودار  $W_{is,max}$  بر حسب  $W_{max}$  برای فشار های مختلف

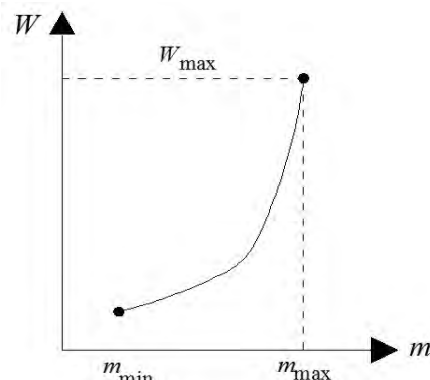
(شکل ۴) مشخص است که رابطه ای خطی بین دو پارامتر فوق برقرار است که با استفاده از روش رگرسیون خطی می توان معادله خطی را یافت (رابطه

۹).



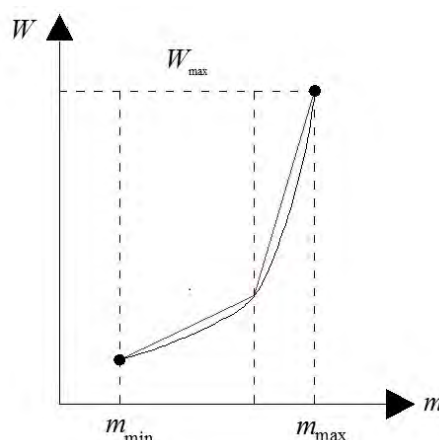
شکل ۴: نمودار کار خروجی ماکزیمم آیزنتروپیک بر حسب کار خروجی ماکزیمم

$$W_{is,max} = A + B * W_{max} \quad (۹)$$



شکل ۱: نمودار کار خروجی توربین برحسب

با استفاده از خطوط ویلان نمودار فوق را با دوخط مشخص شده در شکل ۲ معادل می کنیم.



شکل ۲: خطوط خطی ویلان

معادلات LWL نمودار واقعی را با میانگین ثابتی از  $\eta_{is}$  و تلفات، تقریب می زنند. که از رابطه (۴) محاسبه می گردد.

$$W_{approx} = n.m - W_{int} \quad (۴)$$

با توجه به رابطه آیزنتروپیک توربین داریم:

$$W_{is} = \Delta h_{is} . m \quad (۵)$$

در نتیجه شیب معادله Willan's lines می تواند تابعی از جریان جرمی و تغییرات آنتالپی آیزنتروپیک باشد.

$$n = n(\eta_{is}, \Delta h_{is}) \quad (۶)$$

از قطع کردن خط ویلان با محور متصات مقدار متوسط تلفات ( $W_{int}$ ) مشخص می گردد (شکل ۳)

حرارت و برای یک واحد حرارتی با ظرفیت 29 MW در جمهوری چک در حال استفاده می شوند.

این توربین قابلیت تولید حداکثر 50 MW انرژی الکتریکی را دارد. با توجه به مشخصات تعیین شده برای این توربین که در جدول ۲ مشخص است

| Back Pressure Turbines |                                 |                                  |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|                        | $W_{max} < 2MW$                 | $W_{max} > 2MW$                  |
| A                      | $0 + 0.00108\Delta T_{sat}$     | $0 + 0.00423\Delta T_{sat}$      |
| B                      | $1.097 + 0.00172\Delta T_{sat}$ | $1.155 + 0.000538\Delta T_{sat}$ |

مدلسازی عددی بر اساس ۸ سناریو برای جریان جرمی ورودی از  $m_{min}$  تا  $m_{max}$  انجام گردیده است.

جدول ۲: اطلاعات توربین

با توجه به اطلاعات شرکت سازنده و تعیین قید برای جریان جرمی بخار و استفاده از جداول ۳ و ۴ ترمودینامیکی داریم:

جدول ۳: میان یابی بر اساس دما

جدول ۴: میان یابی بر اساس فشار

| P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | S (kJ/kg.k) |
|---------|--------|-----------|-------------|
| 10      | 540    | 3476.2    | 6.72686     |
| 12      | 540    | 3445.18   | 6.62408     |
| 12.5    | 540    | 3449.92   | 6.59838     |

با خواندن دماهای ورودی و خروجی اشباع از جداول مربوطه داریم:

$$T(\text{sat, in}) @ 12000 \text{ kPa} = 324.68 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$T(\text{sat, out}) @ 800 \text{ kPa} = 170.4 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13)$$

با استفاده از رابطه ۱۴ کیفیت بخار خروجی را تعیین کرده و آنتالپی خروجی در حالت آیزنتروپیک را تعیین می نمایم.

$$S_{in} = S_{out} = S_f + x_{out} S_{fg} \quad (14)$$

$$h_{out, is} = 2751.5805 \text{ kJ/kg} \quad (15)$$

حال روابط مدلسازی بدست آمده را بصورت عددی بر روی این نوع توربین اعمال و نتایج را بررسی می نمایم.

با در نظر گرفتن شرایط  $W_{max} > 2MW$  و استفاده از روابط حاکم بر این حالت داریم:

$$A = 0.00423 * \Delta T_{sat} \quad (16)$$

$$B = 1.155 + 0.000538 * \Delta T_{sat} \quad (17)$$

که:

$$\Delta T_{sat} = \Delta T_{sat, in} - \Delta T_{sat, out} \quad (18)$$

$$\Delta h_{is} = h_{is, in} - h_{is, out} \quad (19)$$

پارامترهای A و B محاسبه شده برای توربین BPT<sup>1</sup> در جدول (۱) مشخص گردیده است.

جدول ۱: پارامترهای A و B

که ضرایب تعیین شده در جدول برای پارامتر A به ترتیب  $a_0$  و  $a_1$  و برای

پارامتر B به ترتیب  $b_0$  و  $b_1$  می باشند.

با توجه به رابطه ۴ و ۵ در  $m_{max}$ :

| Superheated water |        |           |             |
|-------------------|--------|-----------|-------------|
| P (MPa)           | T (°C) | h (kJ/kg) | S (kJ/kg.k) |
| 10                | 500    | 3375.1    | 6.5995      |
|                   | 540    | 3476.2    | 6.72686     |
|                   | 550    | 3502      | 6.7585      |
| 12.5              | 500    | 3343.6    | 6.4651      |
|                   | 540    | 3449.92   | 6.59838     |
|                   | 550    | 3476.5    | 6.6317      |

$$W_{max} = n.m_{max} - W_{int} \quad (4)$$

$$W_{is, max} = \Delta h_{is} * m_{max} \quad (5)$$

و رابطه ۷:

$$W_{int} = L W_{max} \quad (7)$$

مقادیر n و  $W_{int}$  بر حسب پارامترهای رگرسیونی A و B به ترتیب در روابط ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است:

$$n = \frac{L+1}{B} * \left( \Delta h_{is} - \frac{A}{m_{max}} \right) \quad (10)$$

$$W_{int} = \frac{L}{B} * (\Delta h_{is} * m_{max} - A) \quad (11)$$

### مدلسازی توربین بخار SST و ارائه نتایج

توربین مدل SST-300 از توربین های صنعتی شرکت زمینس می باشد

| جدول اطلاعات توربین |         |
|---------------------|---------|
| $P_{in}$            | ۱۲۰ bar |
| $T_{in}$            | 540 °C  |
| $P_{out}$           | 8 bar   |
| $m_{max}$           | 300 t/h |
| $m_{min}$           | 75 t/h  |
| L                   | 0.1     |
| $\eta_t$            | 85%     |

که به عنوان نمونه در کشور برزیل برای تولید شکر و اتانول با ظرفیت 26 MW، با ظرفیت 21 MW در کشور لهستان برای تولید همزمان برق و

<sup>1</sup> Bac Pressure Turbines

HVACConf-1-011

|                   |         |         |         |         |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| A                 | 0.653   | 0.653   | 0.653   | 0.653   |
| B                 | 1.238   | 1.238   | 1.238   | 1.238   |
| n                 | 0.169   | 0.169   | 0.169   | 0.169   |
| W (int)<br>Mw     | 4.620   | 4.620   | 4.620   | 4.620   |
| W (Mw)            | 8.085   | 12.319  | 16.554  | 20.789  |
| W (tot)<br>Mw     | 9.511   | 14.493  | 19.476  | 24.458  |
| h (out)<br>Mwh/t  | 0.831   | 0.813   | 0.802   | 0.795   |
| h' (out)<br>kj/kg | 2988.99 | 2923.82 | 2884.72 | 2858.65 |
| P (out)<br>bar    | 8.000   | 8.000   | 8.000   | 8.000   |
| T (out) °C        | 267.943 | 237.665 | 219.888 | 208.269 |

اولین کنفرانس بین المللی تهویه مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی

حال با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ مدل ریاضی توربین مورد بررسی به صورت زیر خواهد بود:

$$W = (0.16939266 * m) - 4.619799811 \quad (۲۰)$$

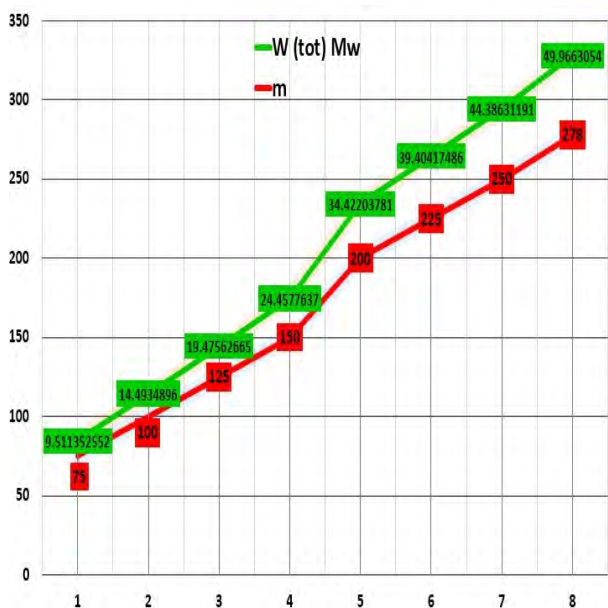
اکنون با در نظر گرفتن ۸ سناریو برای جریان جرمی بخار، حداکثر و حداقل کار تولیدی، آنتالپی و دمای خروجی واقعی را بررسی و با استفاده از مقایسه داده های واقعی و فرضیات حالت ایده آل نتیجه گیری خواهیم نمود. جدول های شماره ۴ و ۵ نشان دهنده روند حرکت مدلسازی و به ترتیب نتایج کلی مربوط به سناریوی یک تا چهار و چهارتا پنج می باشند.

جدول ۵: نتایج مدل سازی توربین بخار (سناریوی ۸-۵)

|                     | 5       | 6       | 7       | 8       |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| m (max)             | 300     | 300     | 300     | 300     |
| m                   | 200     | 225     | 250     | 278     |
| L                   | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| η (t)               | 0.85    | 0.85    | 0.85    | 0.85    |
| T (in,sat)<br>°C    | 324.68  | 324.68  | 324.68  | 324.68  |
| T (out,sat)<br>°C   | 170.4   | 170.4   | 170.4   | 170.4   |
| h (in,is)<br>kj/kg  | 3445.17 | 3445.17 | 3445.17 | 3445.17 |
| h (in,is)<br>Mwh/t  | 0.958   | 0.958   | 0.958   | 0.958   |
| h (out,is)<br>kj/kg | 2751.58 | 2751.58 | 2751.58 | 2751.58 |
| h (out,is)<br>Mwh/t | 0.765   | 0.765   | 0.765   | 0.765   |
| ΔT (sat)<br>°C      | 154.280 | 154.280 | 154.280 | 154.280 |
| Δh (is)<br>Mwh/t    | 0.193   | 0.193   | 0.193   | 0.193   |
| a0                  | 0       | 0       | 0       | 0       |
| a1                  | 0.004   | 0.004   | 0.004   | 0.004   |
| b0                  | 1.155   | 1.155   | 1.155   | 1.155   |
| b1                  | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.001   |

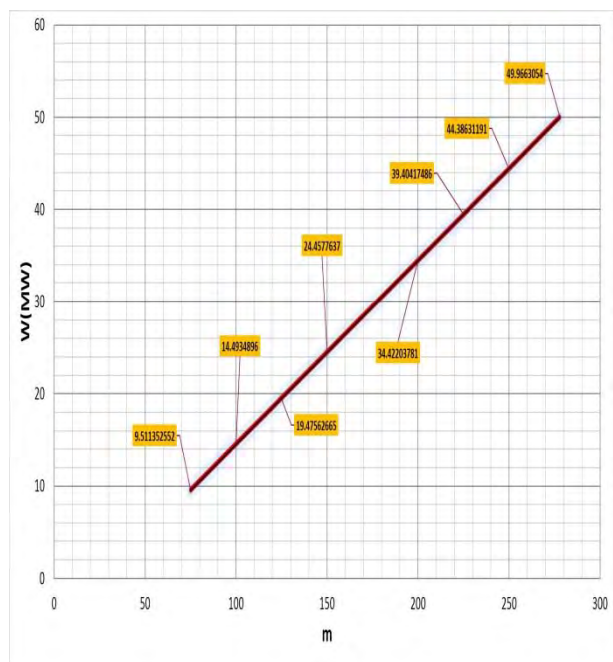
جدول ۴: نتایج مدل سازی توربین بخار (سناریوی ۴-۱)

|                     | 1       | 2       | 3       | 4       |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| m (max)             | 300     | 300     | 300     | 300     |
| m                   | 75      | 100     | 125     | 150     |
| L                   | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| η (t)               | 0.85    | 0.85    | 0.85    | 0.85    |
| T (in,sat)<br>°C    | 324.68  | 324.68  | 324.68  | 324.68  |
| T (out,sat)<br>°C   | 170.4   | 170.4   | 170.4   | 170.4   |
| h (in,is)<br>kj/kg  | 3445.17 | 3445.17 | 3445.17 | 3445.17 |
| h (in,is)<br>Mwh/t  | 0.958   | 0.958   | 0.958   | 0.958   |
| h (out,is)<br>kj/kg | 2751.58 | 2751.58 | 2751.58 | 2751.58 |
| h (out,is)<br>Mwh/t | 0.765   | 0.765   | 0.765   | 0.765   |
| ΔT (sat)<br>°C      | 154.280 | 154.280 | 154.280 | 154.280 |
| Δh (is)<br>Mwh/t    | 0.193   | 0.193   | 0.193   | 0.193   |
| a0                  | 0       | 0       | 0       | 0       |
| a1                  | 0.004   | 0.004   | 0.004   | 0.004   |
| b0                  | 1.155   | 1.155   | 1.155   | 1.155   |
| b1                  | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.001   |



شکل ۵: مقایسه روند رشد جریان جرمی بخار و مقدار توان تولیدی

همانطور که انتظار داریم با نزدیک شدن به ماکزیمم جریان ممکن بدست آمده توسط تابع مدل سازی که بیشترین توان خروجی ممکن از توربین را به دنبال دارد روند رشد توان خروجی توربین با شتاب بیشتری به ماکزیمم مقدار خود نزدیک می شود. در نهایت با رسم نمودار خطی توان خروجی توربین بر حسب جریان جرمی بخار ورودی به توربین (شکل ۸) می توان رفتار توربین را به ازای جریان های مختلف جرمی بخار مشاهده نمود که دید مناسبی از عملکرد توربین را نشان می دهد.

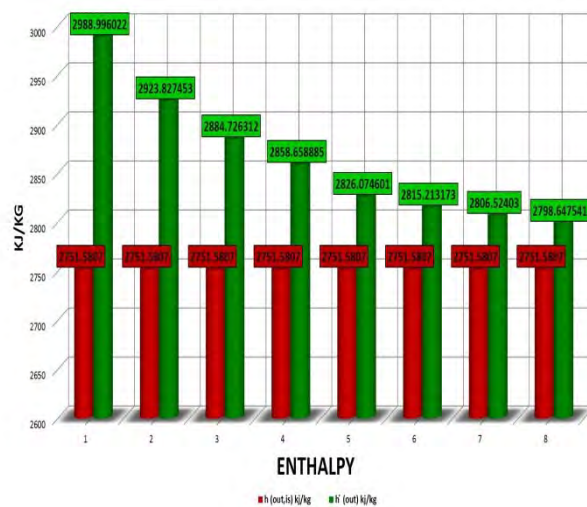


شکل ۸: نمودار خطی توان خروجی توربین بر حسب جریان جرمی بخار ورودی به توربین

|               |         |         |         |         |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| A             | 0.653   | 0.653   | 0.653   | 0.653   |
| B             | 1.238   | 1.238   | 1.238   | 1.238   |
| n             | 0.169   | 0.169   | 0.169   | 0.169   |
| W (int) Mw    | 4.620   | 4.620   | 4.620   | 4.620   |
| W (Mw)        | 29.259  | 33.494  | 37.728  | 42.471  |
| W (tot) Mw    | 34.422  | 39.404  | 44.386  | 49.966  |
| h (out) Mwh/t | 0.786   | 0.783   | 0.780   | 0.778   |
| h (out) kj/kg | 2826.07 | 2815.21 | 2806.52 | 2798.64 |
| P (out) bar   | 8.000   | 8.000   | 8.000   | 8.000   |
| T (out) °C    | 194.090 | 189.470 | 185.820 | 182.551 |

نتیجه گیری و دست آورد علمی صنعتی

با توجه به نمودار مقایسه ای بین  $(h'_{out}$  و  $h_{out, is}$ ) محاسبه شده توسط تابع مدلسازی داریم:



شکل ۴: نمودار مقایسه ای بین آنتالپی خروجی آیزنتروپیک و آنتالپی خروجی واقعی

همانطور که از مقایسه نموداری فوق مشخص است با نزدیکتر شدن سناریوی ۸ که نتیجه آن تولید ماکزیمم توان ممکن از این نوع توربین است آنتالپی خروجی توربین بخار در نزدیکترین مقدار نسبت به حالت آیزنتروپیک است.

نمودار شکل ۵ نشان دهنده قیاس همزمان روند رشد جریان جرمی بخار و کار تولیدی توربین است.

HVACConf-1-011

اولین کنفرانس بین المللی تهویه مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی

Electrical Power and Energy Systems 19 (1997)  
469–479.  
[۲]Tor-Martin Tveit, Tuula Savola\_and Carl-Johan  
Fogelholm , ProtectionModelling of steam turbines  
for mixed integer nonlinear programming  
(MINLP) in design and off-design conditions of  
CHP plants,Helsinki University of Technology,  
2088

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| $h$    | آنتالپی (m <sup>2</sup> ) |
| $w$    | کار (mw)                  |
| $m$    | جریان جرمی (t/h)          |
| $\eta$ | بازده                     |
| $p$    | فشار (KPa)                |
| $T$    | دما (°C)                  |
|        | زیر نویس ها               |
| $sat$  | اشباع                     |
| $f$    | فاز مایع                  |
| $g$    | فاز گازی                  |
| $fg$   | دو فازی                   |
| $in$   | ورودی                     |
| $out$  | خروجی                     |

مراجع

[۱] W.C. Tsai, T.P. Tsao, C. Chyn, A nonlinear model  
for the analysis of the turbine-generator vibrations  
including the design of a flywheel damper,