

بررسی و مقایسه جریان اکسرژی در سه شرایط متفاوت، واحد ۳ توربین گاز نیروگاه قم بر حسب درصد سوخت ورودی

حمید رضا خلیلی^۱، محمد نجمی^۱، محمد رضا دولیخانی^۱

۱- شرکت مدیریت تولید برق قم

چکیده:

آنالیز اکسرژی به معنای آنالیز یک سیستم بر پایه قانون دوم ترمودینامیک است. این آنالیز به منظور رفع محدودیت های آنالیز بر پایه قانون اول توسعه پیدا کرده است. برای استفاده بهتر از انرژی، محاسبه مقدار و کیفیت انرژی ضروری می باشد. این کار با استفاده همزمان از قوانین اول و دوم ترمودینامیک ممکن خواهد بود. در این مقاله هدف بررسی جریان اکسرژی در توربین گاز و تعیین نقاط بازگشت ناپذیری بالا می باشد همچنین با مقایسه شرایط قبل و بعد از تعمیرات، تغییرات بازگشت ناپذیری ها بررسی و تحلیل شده است. با توجه به سه حالت تست کارایی میتسوبیشی، قبل و بعد از تعمیرات اساسی واحد ۳ توربین گاز نیروگاه قم و با استفاده از نتایج حاصل از اکسرژی عملکرد سیکل در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد منابع مهم بازگشت ناپذیری در سیکل توربین گاز بر حسب نوع اتلاف شامل: احتراق، خروج گاز گرم به جو، اصطکاک مکانیکی و هیدرولیک می باشد.

کلمات کلیدی: اکسرژی، بازگشت ناپذیری، توربین گازی، تعمیرات اساسی

۱- مقدمه:
برآورد حداکثر کار بدست آمده از انرژی را با استفاده از پارامترهای محیط داشته باشد. این استاندارد تحت عنوان اکسرژی شناخته شده است که با علامت E نشان داده می شود.

در ادبیات اکسرژی، کار و کار مفید از یکدیگر متمایز هستند. کار مفید، کاری است که می تواند موجب بلند کردن یک وزنه یا متراکم کردن یک فنر شود در حالیکه کار حاصل از حرکت پیستون در یک سیلندر که صرف پس زدن هوای اطراف می شود، کار مفید بشمار نمی آید.

انرژی بر اساس نحوه ذخیره سازی آن به دودسته منظم و نامنظم تقسیم می شود. انرژی منظم منظم تحت عنوان انرژی پتانسیل و جنبشی شناخته شده است در حالی که انرژی نامنظم ترکیبی است از انرژیهای داخلی، تشعشعی، شیمیایی و حرکات آشفته جریان [۱].

در پروسه های کاملاً بازگشت پذیر انرژی نامنظم بطور کامل به انرژی منظم تبدیل می شود. لذا نیاز به یک استاندارد جامع در راستای برآورد انواع متفاوت انرژی های نامنظم می باشد. بهترین و موثرترین استاندارد باید توانایی

$$\epsilon = \frac{\dot{E}}{m} \epsilon_k + \epsilon_p + \epsilon_{ph} + \epsilon_o \quad (4)$$

اکسرژی شیمیایی:

اکسرژی شیمیایی برابر با حداکثر کار بدست آمده زمانی که مواد از حالت تعادل محیطی به حالت تعادل مرده می‌رسند، می‌باشد این پروسه شامل انتقال حرارت و تغییر مواد تنها به محیط می‌باشد. لذا نمونه‌های مرجعی در محیط بصورت استاندارد مشخص شده‌اند که رسیدن به آنها حالت تعادل مرده را در بردارد. در حالت کلی اکسرژی شیمیایی بصورت زیر خواهد بود [۳].

$$\epsilon_o = \bar{R} T_o \ln \frac{P_o}{P_{o0}} \quad (5)$$

اکسرژی جنبشی:

اکسرژی جنبشی برای جریانی با سرعت C_o نسبت به سطح زمین بصورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$\dot{E}_K = \dot{m} \frac{C_o^2}{2} \quad (6)$$

اکسرژی پتانسیل:

اکسرژی پتانسیل برای جریانی به ارتفاع Z_o نسبت به سطح دریا بصورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

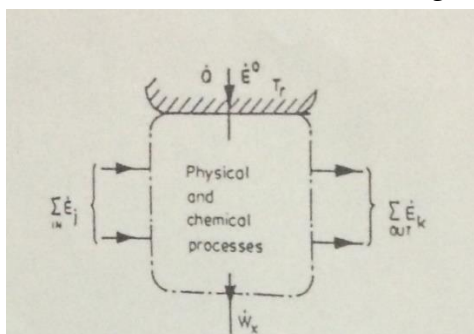
$$\dot{E}_P = \dot{m} \cdot g_E \cdot Z_o \quad (7)$$

اکسرژی فیزیکی:

اکسرژی فیزیکی برابر با حداکثر کار بدست آمده از جریان مواد است که از حالت ابتدایی به حالت محیطی با شرایط T_o و P_o می‌رسند. در این حالت پروسه فیزیکی شامل انتقال حرارت با محیط است که اگر جریان حاوی گاز کامل باشد آنگاه [۳]:

$$\epsilon_{ph} = C_p (T_1 - T_o) - T_o \left(C_p \ln \frac{T_1}{T_o} \right) - R \ln \frac{P_1}{P_o} \quad (8)$$

۳- آنالیز اکسرژی پروسه شیمیایی شامل احتراق: ناحیه کنترلی برای یک سیستم باز و جریان پایدار در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: ناحیه کنترلی یک سیستم باز

قبل از هر چیز سیستم باید دارای تعادل انرژی و جرم باشد. در این حالت بالانس اکسرژی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$\sum_{IN} \dot{E}_j - \sum_{out} \dot{E}_k = -\dot{E}_Q + \dot{W}_x + i \quad (9)$$

یک سیستم در حال تعادل کامل با محیط، بدون اکسرژی است. چرا که هیچ اختلافی در دما، فشار، غلظت و پتانسیل شیمیایی سیستم و محیط، جهت انجام فرآیند وجود ندارد. با بیشتر شدن اختلاف بین خواص سیستم و محیط، مقدار اکسرژی افزایش می‌یابد [۲].

بالانس انرژی معرف قانون بقای انرژی است که انتقال حرارت و انرژی توسط انتقال جرم را در بر می‌گیرد. و بالانس اکسرژی معرف قانون انحطاط انرژی است. انحطاط انرژی مساوی افت اکسرژی ناشی از پروسه‌های بازگشت ناپذیر می‌باشد [۳].

آنالیز اکسرژی به معنای آنالیز یک سیستم بر پایه قانون دوم ترمودینامیک است. این آنالیز به منظور رفع محدودیت های آنالیز بر پایه قانون اول توسعه پیدا کرده است. در این مقاله هدف بررسی جریان اکسرژی در توربین گاز و تعیین نقاط با برگشت ناپذیری بالا می‌باشد همچنین با مقایسه شرایط قبل و بعد از تعمیرات، تغییرات بازگشت ناپذیری‌ها بررسی و تحلیل شده است [۱].

۲- تئوری محاسبه اکسرژی:

۲-۱- محاسبه اکسرژی در راستای انتقال حرارت:

اکسرژی محاسبه شده در راستای انتقال حرارت در سطح کنترل معرف حداکثر کار بدست آمده از محیط بعنوان انرژی حرارتی مرتبه صفر می‌باشد و با علامت \dot{E}_Q (اکسرژی حرارتی) نمایش داده می‌شود [۳].

$$\dot{E}_Q = \dot{W}_{max} = \dot{Q}_r \cdot \tau \quad (1)$$

در رابطه فوق Q_r حرارت جابجا شده بین سیستم با دمای سطح کنترل T_r می‌باشد. τ دمای بدون بعد اکسرژی است که از راندمان سیکل کارنو $\eta = 1 - \frac{T_o}{T_r}$ بدست می‌آید. اگر دمای سطح کنترل ثابت نباشد:

$$\dot{E}_Q = \int \left(\frac{T - T_o}{T} \right) Q_r \cdot dA \quad (2)$$

که A معرف سطح مقطع می‌باشد.

۲-۲- محاسبه اکسرژی در راستای انتقال جرم (در حجم کنترل و یا سیستم باز):

در این حالت اکسرژی برابر حداکثر کاری است که جریان از حالت اولیه تا حالت تعادل مرده بدست می‌آورد. در این حالت اکسرژی ترکیبی از عناصر زیر خواهد بود:

$$\dot{E} = \dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{E}_{ph} + \dot{E} \quad (3)$$

که \dot{E}_K معرف اکسرژی جنبشی، \dot{E}_P معرف اکسرژی پتانسیل، \dot{E}_{ph} معرف اکسرژی فیزیکی و \dot{E} معرف اکسرژی شیمیایی می‌باشند. اگر معرف دبی جرمی جریان باشد:

محصولات احتراق همراه با هوای فشرده شده وارد توربین می‌شود. بدیهی است که قسمتی از کار تولید شده صرف به حرکت درآوردن کمپرسور می‌گردد.

در این واحد توربین گاز، مقادیر اکسرژی با توجه به اطلاعات در سه مرحله متفاوت (اطلاعات اولیه شرکت میتسوبیشی، اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری قبل از تعمیرات اساسی و بعد از تعمیرات اساسی) محاسبه شده و در نهایت با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

مشخصات ترمودینامیکی جریان به عنوان اطلاعات اولیه واحد در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. جرم مولکولی سوخت و محصولات احتراق از رابطه زیر محاسبه می‌گردند:

$$M_T = \sum x_j m_j \mid \sum x_j \quad (19)$$

فرضیات:

۱- افت دما در تمام واحد به غیر از محفظه احتراق قابل صرفنظر می‌باشد.

۲- اکسرژی پتانسیل و جنبشی اعضاء به دلیل سرعت کم هوا در ورودی قابل صرفنظر هستند.

۳- پروسه احتراق کامل صورت گرفته است.

۴- تمام گازها رفتار ایده ال دارند.

۵- راندمان مکانیکی توربین و کمپرسورها $\eta_m = 0.98$ فرض شده است [۲].

جزئیات محاسبات برای شرایط قبل از تعمیرات در ادامه به تفصیل آورده شده محاسبات برای شرایط دیگر نیز به همین شکل میباشد.

اکسرژی جریان:

جهت محاسبه نرخ اکسرژی طبق رابطه (۱۰) با فرض آنکه اکسرژی جنبشی و پتانسیل قابل صرفنظر باشد می‌توان نوشت:

$$\dot{E} = \dot{E}_{ph} + \dot{E}^o \quad (20)$$

اکسرژی فیزیکی برای ترکیبی از گازهای ایده ال از رابطه (۱۴) و یا (۱۵) محاسبه می‌شود و همچنین اکسرژی شیمیایی آن چنانچه فشار جزئی عناصر مشخص باشد از رابطه (۵) لذا برای سوخت رابطه زیر پیشنهاد می‌شود.

$$\dot{E} = \dot{n} \sum_i x_i \dot{\epsilon}_i^{\Delta T} + \dot{n} \dot{R} T_o \ln(P/P_o) + \quad (21)$$

$\dot{n} [\sum_i \dot{\epsilon}_{o,i} + \sum_i x_i \ln x_i] + \dot{n}_{H_{2o}} \dot{R} T_o \ln(P^{000}/P_{oo}) H_{2o}$
که ترم آخر آن معرف تصحیح اختلاف فشارهای جزئی بخار آب بین حالت واقعی و حالت استاندارد می‌باشد و برای محصولات احتراق خواهیم داشت:

$$(\dot{E}_{RS})_M = \dot{n} \sum_i x_i \dot{\epsilon}_i^{\Delta T} + \dot{n} \dot{R} T_o \sum_i x_i \ln \frac{x_i P}{P_{oo,i}} \quad (22)$$

نتایج حاصل از روابط (۱۷) و (۱۸) در ستون پنجم جدول شماره ۳ آورده شده است. محاسبه اکسرژی ستون

اگر از اکسرژی های پتانسیل و جنبشی صرفنظر شود آنگاه:

$$\dot{E} = \dot{E}_{ph} + \dot{E}^o \quad (10)$$

اکسرژی فیزیکی:

در حالت کلی اکسرژی فیزیکی به فرم مولی زیر می‌باشد:

$$\dot{\epsilon}_{ph} = (\tilde{h} - h_o) - T_o(\tilde{S} - \tilde{S}_o) \quad (11)$$

که با توجه به ساده‌سازی‌های ممکن برای گازهای ایده‌ال می‌توان به یکی از دو فرم ذیل تبدیل نمود:

$$\dot{\epsilon}_{ph} = C_p^e(T - T_o) + \dot{R} T_o \ln \frac{P}{P_o} \quad (12)$$

می‌توان را به صورت ترکیبی از $\tilde{C}_p^h, \tilde{C}_p^s$ مطرح نمود:

$$\dot{\epsilon}_{ph} = \tilde{C}_p^h(T - T_o) - T_o \tilde{C}_p^s \ln(T/T_o) + \dot{R} T_o \ln P/P_o \quad (13)$$

و اگر ترکیبی از گاز ایده‌ال باشد بصورت:

$$(\dot{\epsilon}_{ph})_M = \sum_{i=1}^N x_i \dot{\epsilon}_i^{\Delta T} + \dot{R} T_o \ln \frac{P}{P_o} \quad (14)$$

و یا:

$$(\dot{\epsilon}_{ph})_M = \sum_{i=1}^N x_i [\tilde{C}_p^h \left(\frac{T}{T_o}\right) - T_o \tilde{C}_p^s \ln(T/T_o) + \dot{R} T_o \ln P/P_o] \quad (15)$$

$$(\dot{\epsilon}_{ph})_M = (T - T_o) \sum_{i=1}^N x_i [\tilde{C}_{p,i}^e \left(\frac{T}{T_o}\right) + \dot{R} T_o \ln(P/P_o)] \quad (16)$$

که مقادیر $\tilde{C}_p^e, \tilde{C}_p^s, \tilde{C}_p^h$ از جداول بدست خواهد آمد. همچنین می‌توان از روابط زیر استفاده نمود:

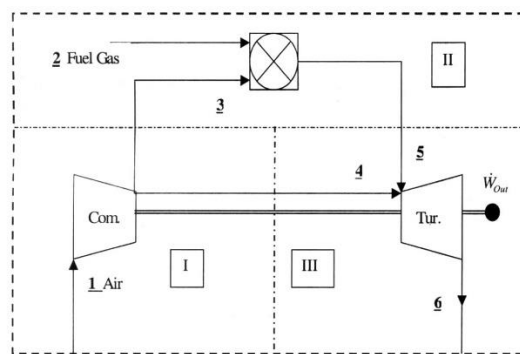
$$\tilde{C}_p^h = \frac{1}{T - T_o} \int_{T_o}^T \tilde{C}_p dT \quad (17)$$

$$\tilde{C}_p^e = \frac{1}{\ln(T/T_o)} \int_{T_o}^T \frac{\tilde{C}_p dT}{T} \quad (18)$$

که برای سوخت رابطه $\tilde{C}_p = a + bT + cT^\gamma + dT^\gamma$ تعریف شده است [۱, ۲].

۴- محاسبه اکسرژی برای واحد ۳ توربین گاز نیروگاه قم:

شکل ۳-۶ نمای ساده شده یک واحد توربین گاز نیروگاه قم را نشان می‌دهد.



شکل ۲: شماتیک واحد ۳ توربین گاز نیروگاه

قم [۴]

هوا پس از فشرده‌سازی همراه با سوخت وارد محفظه احتراق شده و با فرض آنکه احتراق کامل صورت گیرد

حرارت تلف شده وارد محیط می‌گردد حاوی مقدار زیادی اکسرژی بوده که به صورت بازگشت ناپذیری خروجی در بالانس انرژی سیکل ظاهر می‌گردد. در صد بازگشت ناپذیری خروجی \dot{I}_{EXT} خواهد شد:

$$\dot{I}_{EXT} = \dot{E}_f$$

$$\dot{I}_{EXT} = 35.40\%$$

بازگشت ناپذیری محفظه احتراق از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\dot{I}_{II} = \dot{E}_r + \dot{E}_t - \dot{E}_d$$

$$\dot{I}_{II} = 37.87 + 100 - 113.73 = 24.14\%$$

نرخ بازگشت ناپذیری محفظه احتراق معادل 24/14٪ انرژی ورودی است. قابل توجه است که حجم زیادی از این بازگشت ناپذیری صرف سیستم خنک کاری محفظه احتراق می‌شود. بازگشت ناپذیری توربین خواهد شد \dot{I}_{III} :

$$\dot{I}_{III} = \dot{E}_r + \dot{E}_f - \dot{W}_I - \dot{W}_{EXT} - \dot{I}_{EXT} - \dot{I}_{III,m}$$

$$\dot{I}_{III} = 113.73 + 1.86 - 44.37 - 31.59 - 35.40 - 1.54 = 2.69\%$$

بازگشت ناپذیری کمپرسور \dot{I}_I خواهد شد:

$$\dot{I}_I = \dot{W}_I - \dot{E}_r - \dot{E}_f - \dot{I}_{I,m}$$

$$\dot{I}_I = 44.37 - 37.87 - 1.87 - 0.86 = 3.75\%$$

راندمان منطقی یا راندمان قانون دوم ترمودینامیک (ψ):

$$\psi = \frac{11518}{86595 \times \dot{n}_f} \times 100 = 31.59\%$$

که معادل کار مفید داده شده به ژنراتور می‌باشد [4].

۵- تحلیل اکسرژی و نتیجه گیری:

تحلیل اکسرژی در بررسی افزایش راندمان سیکل‌های نیروگاهی، ابزاری موثر و کارآمد می‌باشد. در زیر به چند نمونه از استفاده اکسرژی در تخمین‌های مهندسی اشاره می‌شود:

۱- مقایسه عملکرد سیکل‌های مختلف

۲- مقایسه عملکرد یک سیکل در شرایط مختلف (تغییرات محلی، تغییرات دما، فشار و دبی جریان در نقاط مختلف سیکل)

۳- بررسی امکان سنجی ساخت یک نیروگاه (بررسی همزمان ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی)

۴- بررسی تاثیر تغییرات در یک سیکل به عنوان مثال افزایش گرمکن‌های آب تغذیه، تبدیل سیکل ساده به یک سیکل CHP، بازیافت CO_2 ، افزایش تعداد کمپرسورها و یا توربین‌ها و... (بررسی همزمان ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی)

با توجه به سه حالت تست کارایی میتسویشی، قبل و بعد از تعمیرات اساسی واحد ۳ توربین گاز نیروگاه قم، می‌توان از نتایج حاصل از اکسرژی مقایسه عملکرد سیکل را در شرایط مختلف بررسی نمود. جدول شماره ۴ تحلیل

پنجم برای محصولات احتراق (نقطه ۶) از رابطه (۱۸) به اضافه ترم $\dot{n}\dot{R}T_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$ بدست می‌آید. تغییرات آنتروپی ستون هشتم از رابطه زیر برای گاز کامل محاسبه می‌شود:

$$S_x - S_z = C_p \ln \frac{T_x}{T_z} - R \ln \frac{P_x}{P_z} \quad (23)$$

برای R و C_p متوسط بین دو سطح X, Z در نظر گرفته می‌شود مقادیر \bar{C}_p^s و \bar{C}_p^h سوخت از روابط (۱۷) و (۱۸) و دمای T_2 محاسبه می‌گردد. برای اکسرژی ورودی (\dot{E}_{In}):

$$\dot{E}_{In} = \dot{E}_r$$

$$\dot{E}_{In} = 366546$$

از آنجایی که اکسرژی ورودی به عنوان معیار در نظر گرفته شده است. لذا مقدار آنرا ۱۰۰٪ در نظر گرفته و مابقی اکسرژی و بازگشت ناپذیریها نسبت به آن سنجیده خواهد شد.

$$\dot{E}_{In} = 100\%$$

محاسبات مکانیکی:

توان ایجاد شد در توربین (توان داخلی):

$$\dot{W}_{f-5.6} = \dot{n}_f \Delta h = 0.4233(17700.94 + 11900.77 - 542314.7) = 281690 \text{ kW}$$

توان داخلی مورد نیاز برای کمپرسور:

$$\dot{W}_{f,4-3} = 0.4233(17700.94 + 358919.7 - 0) = 15923.5 \text{ kW}$$

بازگشت ناپذیری مکانیکی توربین $\dot{I}_{m,III}$:

$$\dot{I}_{m,III} = (1 - \eta_m) \dot{W}_{f-5.6} = 5633.8 \text{ kW}$$

که معادل $(5633.8 \text{ kW} * 100 / 366546 = 1.53\%)$

اکسرژی ورودی است و بصورت حرارت در یاتاقانها و سایر اجزاء تلف می‌شود. خروجی موثر توربین \dot{W}_{III} :

$$\dot{W}_{III} = \dot{W}_{f-5.6} - \dot{I}_{m,III} = 276056.8 \text{ kW}$$

که معادل $(276056.8 \text{ kW} * 100 / 366546 = 75.31\%)$

اکسرژی ورودی است. یعنی 75/31 انرژی سوخت در توربین تبدیل به کار مکانیکی مفید می‌شود و بقیه بصورت بازگشت ناپذیری در اجزاء مختلف تلف می‌شود که حدود 25 درصد می‌باشد. حدود 43/5 درصد کار تولید شده در توربین صرف به حرکت درآوردن کمپرسور می‌شود و 1/54 درصد اتلاف مکانیکی توربین میباشد. بنابراین فقط حدود 30 درصد اکسرژی برای کار مفید یعنی تولید برق باقی می‌ماند.

بازگشت ناپذیری مکانیکی کمپرسور $\dot{I}_{m,I}$:

$$\dot{I}_{m,I} = \left(\frac{1}{\eta_m}\right) \dot{W}_{f,4-3} = 3188.5 \text{ kW}$$

که معادل $(3188.5 \text{ kW} * 100 / 366546 = 0.86\%)$

اکسرژی داخلی است. در نتیجه ورودی موثر کمپرسور \dot{W}_I :

$$\dot{W}_I = \dot{W}_{f,4-3} + \dot{I}_{m,I} = 162612 \text{ kW}$$

که معادل $(162612 \text{ kW} * 100 / 366546 = 44.37\%)$

انرژی ورودی است. دود خروجی از توربین که به صورت

توربین گاز در جدول شماره ۵ خلاصه شده است. در صورت ایجاد نقصی در سیستم میزان بازگشت ناپذیری اکسرژی به شدت افزایش می‌یابد.

۶- مراجع:

[۱] Kotas, T.j., "The exergy method of thermal plant analysis", ۱۹۹۵, ISBN ۰۸۹۴۶۴۹۴۱۸

[۲] Bejan, Adrian, "Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-time processes", ۱۹۹۶, ISBN ۰۸۴۹۳۹۶۵۱۴

[۳] Cohen, Henry, Gas turbine theory, ۱۹۸۷, ISBN ۰۴۷۰۲۰۷۰۵۱

[۴] گزارش مرحله دوم پروژه تحلیل عملکرد سیکل ترکیبی نیروگاه قم، پژوهشگاه نیرو

اکسرژی را برای سه حالت فوق جهت مقایسه نشان می‌دهد [۴].

قابل ذکر می‌باشد که بیشتر بازگشت ناپذیری محفظه احتراق ناشی از سیستم خنک کاری آن بوده که نتیجه مثبت بر عملکرد سیستم می‌گذارد، لذا میزان آن در تست میتسوبیشی نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر بوده و بیانگر آن است که در دو حالت قبل و بعد از تعمیرات سیستم خنک کاری محفظه احتراق کیفیت مطلوب اولیه را ندارد.

در رابطه با بازگشت ناپذیری‌های مکانیکی به دلیل آنکه در اثر کارکرد سیستم راندمان مکانیکی آن نسبت به حالت اولیه کاهش یافته است ولی در این محاسبات همان راندمان اولیه سازنده در نظر گرفته شده است، لذا مقادیر بازگشت ناپذیری مکانیکی آنها برابر تست میتسوبیشی بدست آمده است. به دلیل آنکه در این مبحث بازگشت ناپذیری‌های اکسرژی ملاک می‌باشد لذا از محاسبه راندمان مکانیکی واقعی صرف نظر می‌شود. همچنین در این جدول کل بازگشت ناپذیری‌های اکسرژی بعد از تعمیرات نسبت به قبل از تعمیرات کمی بهبود یافته که در مجموع باعث افزایش اکسرژی کار خروجی شده است.

به طور کلی در حالت عدم وجود خرابی در سیستم (مانند حالت طراحی) منابع مهم بازگشت ناپذیری در سیکل

جدول شماره ۱: اطلاعات اولیه واحد

	شرایط آزمون میتسوبیشی	شرایط قبل از تعمیرات	شرایط بعد از تعمیرات
Power(kw)	۱۰۰۴۰۰	۱۱۵۸۱۰	۹۹۲۳۲
LHV(kj/kg)	۴۹۲۲۶٫۵	۴۵۷۷۰٫۷۰	۴۵۷۷۰٫۷
Nf(kmol/s)	۰٫۳۲۴۶	۰٫۴۲۳۳	۰٫۳۵۸۸
Tamb(k)	۳۰۸٫۹۵	۲۸۱٫۰۹	۳۰۷٫۵۳
Pamb(bar)	۰٫۸۹	۰٫۹۰	۰٫۸۹

جدول شماره ۲: مشخصات ترمودینامیکی واحد ۳ توربین گاز نیروگاه قم

شرایط آزمون میتسوبیشی								
State (X)	Working fluid	P(kpa)	T(k)	Mollar (kg/kmol)	Flow rate(kmol/s)	H (kj/s)	Cp (kj/kmol.k)	R (kj/kmol.k)
۰	Environment Air	۸۷	۳۰۸٫۹۵	۲۸٫۹۷	-	-	-	۸٫۴۰
۱	Air	۸۶	۳۰۸٫۹۵	۲۸٫۹۷	۱۱٫۷۸	۵۷۳٫۰۳	۲۹٫۲۶	۸٫۴۰
۲	Fuel Gas	۲۳۰۱	۲۹۶٫۹۵	۱۸٫۱۶	۰٫۳۳	۱۸۱٫۶۰	۳۷٫۵۹	۸٫۳۵
۳	Air	۱۱۶۶	۶۸۹٫۵۵	۲۸٫۹۷	۱۱٫۳۲	۱۱۶۱۵٫۸۱	۲۹٫۲۶	۸٫۴۰
۴	Air	۱۱۶۶	۶۸۹٫۵۵	۲۸٫۹۷	۰٫۵۶	۱۱۶۱۵٫۸۱	۲۹٫۲۶	۸٫۴۰
۵	Combustio Product	۱۱۳۱	۱۴۳۸٫۳۵	۲۷٫۳۱	۱۲٫۱۸	۳۴۸۱۲٫۶۲	۳۵٫۰۸	۸٫۴۰
۶	Combustio Product	۹۶	۸۲۰٫۹۵	۲۷٫۳۵	۱۲٫۸۰	۱۵۱۰۵٫۱۳	۳۱٫۴۵	۸٫۴۱

شرایط قبل از تعمیرات اساسی								
State (X)	Working fluid	P(kpa)	T(k)	Mollar (kg/kmol)	Flow rate(kmol/s)	H (kj/s)	Cp (kj/kmol.k)	R (kj/kmol.k)
۰	Environment Air	۹۰	۲۸۱,۰۹	۲۸,۹۷	-	-	-	۸,۴۰
۱	Air	۸۹	۲۸۱,۰۹	۲۸,۹۷	۱۴,۸۷	-۲۱۵,۵۴	۲۸,۹۷	۸,۴۰
۲	Fuel Gas	۲۲۴۴	۲۸۶,۰۲	۱۸,۱۶	۰,۴۲	۳۶,۵۰	۳۷,۵۹	۸,۳۵
۳	Air	۱۳۰۶	۶۵۷	۲۸,۹۷	۱۴,۰۸	۱۱۶۱۵,۸۱	۲۹,۲۶	۸,۴۰
۴	Air	۱۳۰۶	۶۵۷	۲۸,۹۷	۰,۶۹	۱۱۶۱۵,۸۱	۲۹,۲۶	۸,۴۰
۵	Combustio Product	۱۲۶۶	۱۳۹۰,۵۲	۲۷,۴۱	۱۵,۲۲	۳۲۸۸۳,۷۰	۳۴,۶۸	۸,۴۰
۶	Combustio Product	۹۲	۱۳۹۰,۵۲	۲۷,۲۵	۱۵,۹۹	۱۴۱۴۴,۶۶	۳۱,۰۷	۸,۴۱

شرایط بعد از تعمیرات اساسی								
State (X)	Working fluid	P(kpa)	T(k)	Mollar (kg/kmol)	Flow rate(kmol/s)	H (kj/s)	Cp (kj/kmol.k)	R (kj/kmol.k)
۰	Environment Air	۸۹	۳۰۷,۵۳	۲۸,۹۷	-	-	-	۸,۴۰
۱	Air	۸۸	۳۰۷,۵۶	۲۸,۹۷	۱۲,۲۱	۵۳۰,۴۴	۲۹,۲۶	۸,۴۰
۲	Fuel Gas	۲۲۷۷	۲۹۸,۷۷	۱۸,۱۶	۰,۳۶	۱۹۵,۷۶	۳۷,۱۷	۸,۳۵
۳	Air	۱۱۶۰	۶۸۹	۲۸,۹۷	۱۱,۶۳	۱۱۵۴۸,۳۱	۳۱,۲۹	۸,۴۰
۴	Air	۱۱۶۰	۶۸۹	۲۸,۹۷	۰,۵۷	۱۱۵۴۸,۳۱	۳۱,۲۹	۸,۴۰
۵	Combustio Product	۱۱۲۶	۱۴۳۲,۳۸	۲۷,۳۷	۱۲,۵۵	۳۴۴۶,۷۹	۳۵,۰۳	۸,۴۰
۶	Combustio Product	۹۱	۸۲۴,۴۱	۲۷,۳۰	۱۳,۱۹	۱۵۱۳۸,۹۴	۳۱,۴۰	۸,۴۱

جدول شماره ۳: محاسبات انرژی در نقاط مختلف واحد توربین گاز نیروگاه قبل از تعمیرات اساسی

نتایج محاسبات برای داده های آزمون میتسویشی										
Working Fluid	γ kmol [kmol of Dry fuel]	X	A	B	C	D	A+B-C-DT ₀	\dot{E}_x = $\dot{n}_f \cdot \gamma_x$ kW	$\frac{\dot{E}_x}{\dot{E}_f}$ × ۱۰۰٪	
			$\frac{\gamma \epsilon_z}{\text{[kmol of Dry fuel]}}$ kj	$\frac{\gamma \Delta h^z}{\text{[kmol of Dry fuel]}}$ kj	$\frac{\gamma \Delta h^z}{\text{[kmol of Dry fuel]}}$ kj	$\frac{\gamma \Delta s^x}{\text{[kmol of Dry fuel]}}$ kj	$\frac{\gamma \epsilon_x}{\text{[kmol of Dry fuel]}}$ kj			
	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
AIR	۳۴,۸۴۸۴۴ ۹۹۷	۳	۱	۰	۳۸۴۸۲۳,۹	۰	۸۰,۱۰۷۸۸	۳۶۰۰۷۴,۶	۱۱۶۹۲۹, ۷	۳۸,۳۰۹۶ ۸
AIR	۱,۷۱۸۷۳۸ ۱۵۵	۴	۱	۰	۱۸۹۷۹,۶۶	۰	۳,۹۵۰۹۴۹	۱۷۷۵۹,۰۱	۵۷۶۷,۰۱۶	۱,۸۸۹۴۴ ۷
Fuel gas	۱	۲	۲	۹۳۹۹۰۵,۱	-۱۹۸,۱۴۹	-۱۹۸,۱۴۹	۰	۹۳۹۹۰۵,۱	۳۰۵۲۲۲, ۴	۱۰۰
Combustion products	۳۷,۴۹۶۱۱ ۳۹۱	۵	۶	۳۰۴۱۶۲,۱	۱۲۸۴۷,۷	۵۴۵۶۵۲,۸	-۳۴,۷۸۸	۱۰۵۳۹۶۴	۳۴۲۲۶۱,۶	۱۱۲,۱۳۵ ۱

Combustion products	۳۹,۴۰۵۴۴ ۶۱۵	۶	۶	۳۱۹۶۵۰,۳	۵۷۳۴۳۷,۹	۵۷۳۴۳۷,۹	.	۳۱۹۶۵۰,۳	۱۰۳۸۰۲,۴	۳۴,۰۰۸۷ ۹
---------------------	-----------------	---	---	----------	----------	----------	---	----------	----------	--------------

نتایج محاسبات برای داده های آزمون قبل از تعمیرات اساسی

				A	B	C	D	A+B-C-DT _o		
Working Fluid	$\frac{\gamma}{\text{kmol of Dry fuel}}$	X	Z	$\frac{\gamma \varepsilon_Z}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \Delta h^Z}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \Delta h^Z}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \Delta s^X}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \varepsilon_x}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\dot{E}_x = \dot{n}_f \cdot \gamma_x$ kW	$\frac{\dot{E}_x}{\dot{E}_f} \times 100\%$
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
AIR	۳۳,۲۷۶۱۰ ۴۲۷	۳	۱	.	۳۵۸۹۱۹,۷	.	۱۰۹,۷۶۰۶	۳۲۸,۶۷,۱	۱۳۸۸۲۶, ۵	۳۷,۸۷۴ ۲۳
AIR	۱,۶۴۱۰۸۶ ۹۱۳	۴	۱	.	۱۷۷۰۰,۹۴	.	۵,۴۱۳۰۹۳	۱۶۱۷۹,۳۸	۶۸۴۶,۵۴۳	۱,۸۶۷۸ ۵۴
Fuel gas	۱	۲	۲	۸۶۶۲۰,۱,۵	۹۳,۲۰۲۳۶	۹۳,۲۰۲۳۶	.	۸۶۶۲۰,۱,۵	۳۶۶۵۴۶	۱۰۰
Combustion products	۳۵,۹۶۰۴۷ ۴۴۲	۵	۶	۲۹۱۸۰,۷	۱۱۹۰۰,۷۷	۵۱۶۰۶۶,۲	-۶۸,۸۴۳۴	۹۸۵۱۶۸,۶	۴۱۶۸۸۸, ۷	۱۱۳,۷۳ ۴۴
Combustion products	۳۷,۷۸۹۵۱ ۸۷۸	۶	۶	۳۰۶۶۴۹	۵۴۲۳۱۴,۷	۵۴۲۳۱۴,۷	.	۳۰۶۶۴۹	۱۲۹۷۶۳, ۱	۳۵,۴۰۱ ۵۹

نتایج محاسبات برای داده های آزمون بعد از تعمیرات اساسی

				A	B	C	D	A+B-C-DT _o		
Working Fluid	$\frac{\gamma}{\text{kmol of Dry fuel}}$	X	Z	$\frac{\gamma \varepsilon_Z}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \Delta h^Z}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \Delta h^Z}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \Delta s^X}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\frac{\gamma \varepsilon_x}{\text{kmol of Dry fuel}}$	$\dot{E}_x = \dot{n}_f \cdot \gamma_x$ kW	$\frac{\dot{E}_x}{\dot{E}_f} \times 100\%$
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
AIR	۳۲,۴۳۳۰۲ ۳۵۴	۳	۱	.	۳۵۷۳۴۲,۹	.	۸۹,۳۵۹۷۳	۳۲۹۸۶۲,۱	۱۱۸۳۲۲, ۸	۳۸,۰۵۷ ۳۵
AIR	۱,۵۹۹۳۸۲ ۷۵۹	۴	۱	.	۱۷۶۲۱,۷۹	.	۴,۴۰۶۶۳۲	۱۶۲۶۶,۶۲	۵۸۳۴,۸ ۹۸	۱,۸۷۶۷ ۳۷
Fuel gas	۱	۲	۲	۸۶۶۷۵۰	۱۵۸,۳۰۲۴	۱۵۸,۳۰۲۴	.	۸۶۶۷۵۰	۳۱۰۹۰۶ ۰,۵	۱۰۰
Combustion products	۳۴,۹۹۲۸۲ ۴۸۸	۵	۶	۲۷۶۲۶۱,۳	۱۱۸۷۷۳۰	۵۱۱۹۷۷,۱	-۵۵,۷۴۶۸	۹۶۹۱۵۸	۳۴۷۶۴۰, ۰,۶	۱۱۱,۸۱ ۵۲
Combustion	۳۶,۷۷۲۹۷ ۶۶۴	۶	۶	۲۹۰۳۱۵,۲	۵۳۸۰۲۲,۳	۵۳۸۰۲۲,۳	.	۲۹۰۳۱۵,۲	۱۰۴۱۳۷ ۰,۱	۳۳,۴۹۴ ۶۹

products										
----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

جدول شماره ۴: مقایسه تحلیل اکسرژی در سه شرایط متفاوت واحد توربین گاز نیروگاه قم بر حسب درصد سوخت ورودی

بعد از تعمیرات اساسی	قبل از تعمیرات اساسی	داده های میتسویشی	
۳۱,۹۲	۳۱,۵۹	۳۲,۸۹	اکسرژی کار خروجی
۰,۸۸	۰,۸۶	۰,۸۸	بازگشت ناپذیری مکانیکی کمپرسور
۳,۳۷	۲,۰۲	۲,۸۶	بازگشت ناپذیری کمپرسور
۲۶,۲۵	۲۴,۱۴	۲۶,۱۷	بازگشت ناپذیری محفظه احتراق
۱,۵۴	۱,۵۴	۱,۵۵	بازگشت ناپذیری مکانیکی توربین
۲,۵۸	۴,۴۵	۱,۷۵	بازگشت ناپذیری توربین
۳۳,۴۹	۳۵,۴	۳۴	بازگشت ناپذیری خروجی (دودکش)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	جمع

جدول شماره ۵: منابع مهم بازگشت ناپذیری در سیکل توربین گاز

ردیف	نوع اتلاف	عامل تولید بازگشت ناپذیری	توضیحات
۱	احتراق	بازگشت ناپذیری انتقال حرارت	منبع مهم اتلاف انرژی است
۲	خروج گاز گرم به جو	آزاد شدن حرارت به محیط	هر چند کیفیت انرژی در این مقطع پایین است ولی اکثر تلفات موجود از این طریق است. باید حتی المقدور از حرارت حاصل از گازهای گرم استفاده نمود تا بازگشت ناپذیری کاهش یابد.
۳	اصطکاک مکانیکی	بلبرینگها و آب بندی نامناسب	مقدار ناچیزی است که از طریق روغن کاری و اصلاحات طراحی اجزاء بهینه می شود.
۴	هیدرولیک	آشفتنگی در جریان سیال	یک اتلاف مشخص و قابل ملاحظه در سیستم های مختلف