

محاسبه اقتصادی نقطه بهینه تعویض فیلتر کمپرسور توربین گازی V94.2

قائم پرویزی

g_parvizi@yahoo.com

شرکت مدیریت تولید برق جنوب فارس

ایران

واژه‌های کلیدی: توربین گاز، فیلتر کمپرسور، توان، راندمان

چکیده

یکی از قطعات مصرفی مهم و پر هزینه در توربین های گازی فیلتر هوای کمپرسور می باشد که عملکرد آن علاوه بر سلامت کمپرسور و قطعات داغ توربین بر توان تولیدی و راندمان توربین گاز نیز تاثیر گذار است لذا تعویض آن در زمان مناسب ضمن تامین سلامت واحد باعث افزایش توان تولیدی و راندمان واحد شده کاهش هزینه بهره برداری را در پی دارد که با توجه هدفمندی یارانه ها و آزاد شدن قیمت حاملهای انرژی بعد اقتصادی این موضوع پرننگتر خواهد شد. همانگونه که می دانیم در توربین گازی با افزایش اختلاف فشار فیلتر توان تولیدی و راندمان واحد کاهش می یابد این میزان کاهش تقریبا معادل ۱/۵ درصد توان تولیدی و ۰/۵ درصد راندمان واحد به ازای ۱۰۰ میلیمتر اختلاف فشار فیلتر می باشد. بنا براین بنظر میرسد که بهتر است این فیلترها در اختلاف فشار کمتری تعویض گردد اما تعویض فیلتر هم هزینه های خاص خود را دارد لذا در این مقاله با محاسبه هزینه کاهش توان تولیدی و راندمان و هزینه تعویض فیلترها نقطه بهینه تعویض فیلتر را محاسبه و مشاهده می کنیم که بر

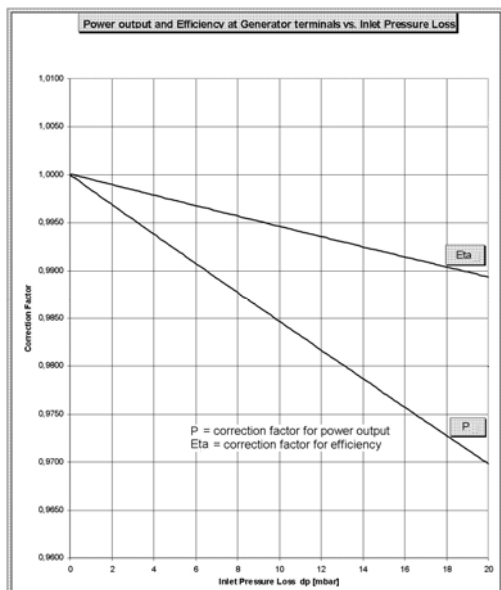
خلاف تصورات موجود نقطه بهینه تعویض فیلتر اختلاف فشار ۷۵ میلیمتر آب است.

مقدمه

در حال حاضر نیروگاههای گازی یکی از مهمترین منابع تولید انرژی الکتریکی در ایران هستند و بالغ بر ۵۰ درصد قدرت نامی نصب شده در کشور را واحدهای گازی تشکیل میدهند [۱]. در این میان واحدهای مدل V94.2 سهم قابل توجهی از واحدهای گازی کشور را به خود اختصاص داده اند به همین دلیل در این مقاله این نوع واحدها بصورت مشخص مورد بررسی قرار گرفته اند اگر چه نتایج این مقاله در مورد سایر واحدهای گازی هم قابل تعمیم است.

همانطور که می دانیم یکی از قطعات مصرفی مهم و پر هزینه در توربین های گازی فیلتر هوای کمپرسور می باشد که جهت حفظ سلامت کمپرسور و قطعات داغ در توربین گازی تعبیه شده است. در عین حال این قطعات مهم بدلیل مقاومتی که در مسیر هوای ورودی به کمپرسور ایجاد می کنند باعث افت فشار در ورودی کمپرسور و در نتیجه کاهش توان

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱ - نمودار تغییرات توان و راندمان برحسب اختلاف فشار

برای استفاده از این منحنی در محاسبات بعدی نیاز به فرموله کردن آن می باشد لذا فرمول منطبق با آن نیز که یک چند جمله ای است از مدارک سازنده استخراج گردید که به شرح ذیل و جدول ۱ می باشد [۴]:

$$F = \sum_{i=0}^5 A_i * x^i$$

جدول ۱ - ضرایب چندجمله ای

	F(Power)	F(Eta)
Range limitation	0~20 mbar	0~20 mbar
A0	1.000000362E+00	1.000000340E+00
A1	-1.454663055E-03	-4.653166130E-04
A2	-2.093249020E-05	-1.665599526E-05
A3	3.036622559E-06	2.614006464E-06
A4	-1.646395223E-07	-1.720754224E-07
A5	3.906249962E-09	3.662109352E-09

برای محاسبه دقیق میزان افت توان و راندمان با افزایش Δp این فرمول وارد کامپیوتر گردید و محاسبات آن انجام شد که ضریب کاهش توان تولیدی و راندمان به ازای افزایش اختلاف فشار فیلتر در جدول ۲ خلاصه شده است.

تولیدی و راندمان می گردد [۲ و ۳].

این موضوع به اندازه ای مهم است که شرکت توانیر طی مکاتباتی از نیروگاهها خواسته است که با استفاده از فیلترهای مناسب با حداقل فشار، شرایط لازم برای تولید حداکثری واحدها را (بخصوص در فصل تابستان) فراهم آورند. اما سوال اینجاست که در چه اختلاف فشاری فیلتر تعویض گردد تا ضمن کاهش هزینه خرید و تعویض فیلتر از حداکثر ظرفیت واحد هم استفاده شود؟

واقعیت این است که این دو مطلب در تضاد با یکدیگر می باشند یعنی اگر بخواهیم توان تولیدی و راندمان را به حداکثر برسانیم باید فیلترها را در کمترین اختلاف فشار تعویض کنیم که در این صورت هزینه زیادی صرف خرید و تعویض فیلترها می شود و اگر بخواهیم از فیلتر کمال استفاده را ببریم باید اجازه دهیم که فیلتر تا حداکثر مجاز اختلاف فشار کار کند لذا در این مقاله در نظر داریم که اختلاف فشار بهینه را با توجه به شرایط مختلف محاسبه کنیم.

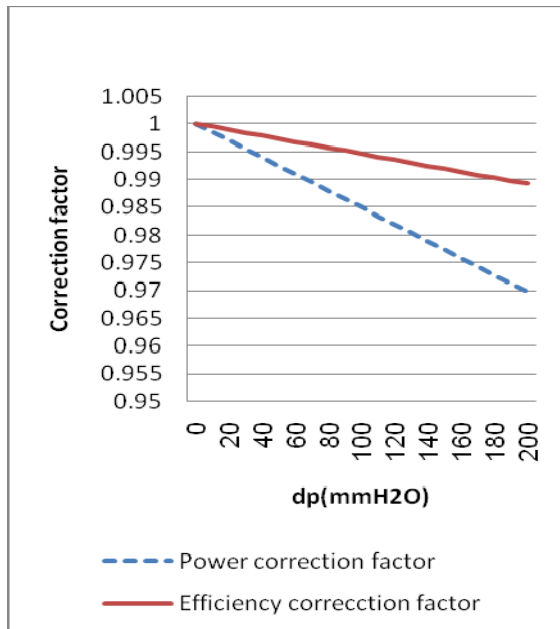
رابطه اختلاف فشار با توان و راندمان

می دانیم که با افزایش اختلاف فشار طرفین فیلتر هوای کمپرسور (Δp) توان تولیدی و راندمان واحد کاهش می یابد. محاسبه تئوریک این کاهشها بدلیل نیاز به مقادیر دقیق طراحی پارامترهای توربوکمپرسور و عدم ارائه این اطلاعات از طرف سازنده امکان پذیر نمی باشد. اما از آنجا که سازندگان توربین گاز جهت تحویل واحدها به کارفرما می باست مطابق مشخصات فنی قرارداد عمل نمایند و اختلاف فشار فیلتر هم یکی از پارامترهای موثر در این امر می باشد بنابراین منحنی افت توان و راندمان توربین برحسب افزایش اختلاف فشار فیلتر معمولاً در مدارک تست کارایی (که از وظایف سازنده توربین است) ارائه می شود و ما در این مقاله از آن استفاده می کنیم. در مورد واحدهای V94.2 این منحنی به شکل ۱ می باشد [۴]:

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

نمودار کاهش توان و راندمان با افزایش اختلاف فشار فیلتر که از فرمول ذکر شده بدست آمده است به شکل ۳ می باشد.

شکل ۳ - نمودار توان و راندمان برحسب اختلاف فشار



از این نمودار و جدول در محاسبات بعدی استفاده خواهد شد.

عملکرد فیلتر

همانگونه که عنوان گردید فیلتر نو از ابتدای زمان نصب اختلاف فشار اولیه ای بین ۳۵ تا ۴۵ میلی‌متر آب دارد و پس از آن با کارکرد واحد اختلاف فشار به تدریج افزایش می یابد. نمودار واقعی افزایش Δp با زمان برای ۴ واحد V94.2 طی یکسال اخیر در شکل ۴ نشان داده شده است.

روند افزایش Δp به عوامل مختلفی از جمله [۵]:

- ساختار فیلتر (نوع، جنس و کیفیت مدیا، نحوه چین دهی و تا زدن مدیا)
- شرایط آب و هوایی منطقه (رطوبت و گردوخاک)
- ساختار Air intake واحد (وجود یا عدم وجود پیش فیلتر)
- نحوه عملکرد سیستم پالس جت (سیستم تمیز کننده فیلتر با فشار هوای کمپرسور)
- بستگی دارد و با این شرایط ممکن است زمان رسیدن Δp

جدول ۲ - ضریب کاهش توان تولیدی و راندمان

Δp (mmH2O)	Power	Eff
0	1	1
10	0.9985274	0.99949881
20	0.9970283	0.99897416
30	0.9955153	0.99843762
40	0.993997	0.99789717
50	0.992479	0.997358
60	0.9909645	0.99682292
70	0.9894544	0.99629278
80	0.9879481	0.99576697
90	0.9864438	0.99524382
100	0.9849391	0.99472104
110	0.9834314	0.99419615
120	0.9819181	0.99366697
130	0.9803976	0.993132
140	0.9788695	0.99259088
150	0.9773348	0.99204486
160	0.975797	0.99149717
170	0.9742618	0.99095355
180	0.9727383	0.9904226
190	0.971239	0.98991628
200	0.9697804	0.98945034

چنانچه از جدول ۲ ملاحظه می گردد در اختلاف فشار ۱۰۰ میلی‌متر آب توان تولیدی بالغ بر ۱/۵ در صد کاهش می یابد و همزمان راندمان هم بالغ بر ۰/۵ درصد کاهش می یابد و این به معنی افزایش مصرف سوخت می باشد که علاوه بر مسائل اقتصادی از نظر زیست محیطی هم قابل بررسی می باشد.

شایان ذکر است که فیلتر نو بصورت طبیعی اختلاف فشار اولیه ای بین ۳۵ تا ۴۵ میلی‌متر آب دارد (این میزان بستگی به نوع مدیای فیلتر و کارخانه سازنده دارد) و طبق مدارک فنی توربین حداکثر اختلاف فشار قابل قبول در این واحدها ۱۴۰ میلی‌متر آب می باشد ضمن اینکه سیستم کنترل توربین هم بگونه ای تنظیم شده که اجازه کارکرد واحد بیش از این مقدار هم داده نمی شود.

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

محاسبه هزینه های ناشی از افزایش Δp

برای محاسبه نقطه بهینه تعویض فیلترها بهترین روش بررسی موضوع از منظر مالی و حداقل کردن هزینه هاست چنانچه ملاحظه گردید با افزایش Δp توان تولیدی و همچنین راندمان واحد کاهش می یابد بنابراین می بایست هزینه های مرتبط با این دو پارامتر محاسبه گردد.

با توجه به تاثیر متقابل این پارامترها روی هم و جهت جلوگیری از پیچیده شدن محاسبات از اصل جمع آثار (super position) استفاده می شود بدینصورت که ابتدا هزینه های ناشی از افت توان بدون در نظر گرفتن راندمان محاسبه می شود و پس از آن هزینه های ناشی از کاهش راندمان به تنهایی محاسبه و سپس نتیجه محاسبات با هم جمع می شود. ضمناً از آنجا که اختلاف فشار اولیه فیلتر حداقل ۳۵ و حداکثر اختلاف فشار قابل تحمل واحد ۱۴۰ میلیمتر آب می باشد محاسبات بعدی در این محدوده انجام خواهد شد.

برای محاسبه هزینه های مرتبط با افت توان تولیدی درصد کاهش توان در Δp های مختلف را محاسبه می کنیم و پس از محاسبه هزینه فروش برق (بدون هزینه سوخت مصرفی) هزینه خالص افت توان تولیدی بدست آید.

از آنجا که شرایط مختلفی در نرخ فروش برق وجود دارد (مثلاً از دید شرکتهای برق منطقه ای، بازار برق یا از دید شرکتهای مدیریت تولید) در ابتدا محاسبات بصورت درصدی و بصورت ضرایب خام انجام می شود سپس با توجه به حالت‌های مختلف محاسبه هزینه ها بصورت ریالی انجام خواهد شد.

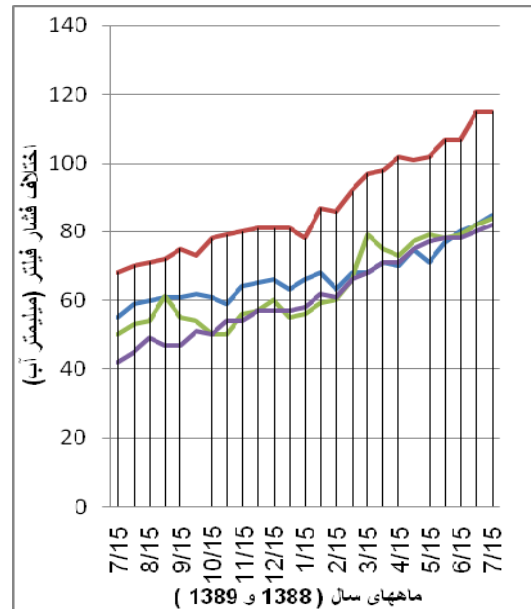
برای محاسبه هزینه ناشی از کاهش راندمان با توجه به اینکه کاهش راندمان موجب افزایش مصرف سوخت می شود این افزایش از فرمول راندمان قابل محاسبه می باشد. فرمول ساده شده راندمان به شرح ذیل می باشد:

$$\eta = \frac{P_{out}(MW)}{Fuel\ consp(nm^3)} \times a \times 100$$

که در آن ضریب a حاصل تمام ضرایب است و به LHV گاز بستگی دارد و بصورت دوره ای به روز می گردد

به حداکثر مجاز از چند ماه تا دو سال (و در مواردی حتی بیشتر) متغیر باشد.

شکل ۴ - نمودار واقعی افزایش اختلاف فشار بر حسب زمان



اختلاف فشار لحظه ای طرفین فیلتر هوای کمپرسور از طریق فرمول ذیل قابل محاسبه می باشد:

$$\Delta p = K \rho \frac{V}{2} = K \frac{m}{2A} \rho$$

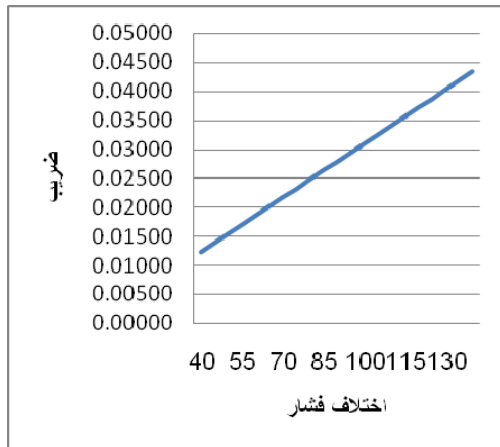
که در آن

- K = coefficient
- ρ = fluid density
- m = fluid mass flow rate
- V = fluid velocity
- A = area of the duct section

طبق این فرمول ملاحظه می گردد که مقدار اختلاف فشار به توان تولیدی (بار) واحد هم بستگی دارد (بدلیل تغییرات m و V با بار) و در شرایط یکسان به ازای بارهای بالاتر Δp هم بیشتر می شود بنابراین برای ثبت روند افزایش Δp باید واحد در بار حداکثر باشد و بهتر است این کار در زمان پیک شب شبکه (که بیشترین بار از واحد اخذ می گردد) صورت پذیرد تا اطلاعات ثبت شده قابل تفسیر بوده به تصمیم گیری صحیح منجر شود.

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

شکل ۵ - نمودار ضریب کلی افزایش هزینه ها



بمنظور محاسبه ریالی هزینه های فوق الذکر این ضریب در نرخ فروش برق و مقدار تولید واحد در یک روز اعمال می شود.

محاسبه هزینه تعویض فیلترها

تعویض هر سری فیلتر واحدهای V94.2 که تعداد آن

۱۲۰۰ عدد می باشد هزینه های ذیل را در بر دارد [۶]:

۱. هزینه خرید فیلتر که با توجه به مشخصات و

سازنده حدودا بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلیون ریال می باشد و در

محاسبات بعدی ۵۰۰ میلیون ریال در نظر گرفته می شود.

۲. هزینه تعویض فیلتر که با توجه به شرایط مختلف

بین ۲۰ تا ۴۰ میلیون ریال می باشد و در محاسبات بعدی ۳۰

میلیون ریال در نظر گرفته می شود.

۳. هزینه عدم تولید واحد که به شرایط مختلفی بستگی

دارد از جمله مدت زمان توقف واحد، نوع توقف (با برنامه

یا بدون برنامه)

مدت زمان تعویض فیلتر معمولا ۲ تا ۳ روز می باشد و در

حالت عادی بگونه ای برنامه ریزی می شود که تعویض فیلتر

در زمان توقف واحد جهت تعمیرات انجام می شود اما در

اینجا چون ما می خواهیم نقطه بهینه تعویض فیلتر را بیابیم و

دقیقا در همان زمان اقدام کنیم هزینه عدم تولید را هم باید

حساب می کنیم. در اینجا مدت زمان تعویض فیلتر را ۲ روز

خروج با هماهنگی (بدون جریمه بازار برق) در نظر می

گیریم.

طبق آخرین آنالیز گاز مصرفی مقدار آن ۱۰۳/۱۵ می باشد.

لذا با توجه به فرمول فوق و با لحاظ تولید ثابت با این

میزان افزایش سوخت مقداری برق قابل تولید می باشد که

عدم تولید آن بصورت تلفات تولید لحاظ می گردد. لذا با این

دیدگاه هزینه ناشی از افت راندمان در Δp های مختلف را

محاسبه می کنیم.

بدین منظور با استفاده از فرمول چند جمله ای و جدول

قبل محاسبات لازم انجام شد و نتیجه آن بصورت ضریب

افزایش هزینه تولید برق ناشی از افت توان و راندمان در

جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳ - ضرایب افزایش هزینه تولید برق

Δp (mmH2O)	ضریب افزایش هزینه تولید برق ناشی از افت توان	ضریب افزایش هزینه تولید برق ناشی از افت راندمان	ضریب کلی افزایش هزینه ها
40	0.00600	0.00632	0.01232
45	0.00676	0.00713	0.01389
50	0.00752	0.00794	0.01546
55	0.00828	0.00875	0.01702
60	0.00904	0.00955	0.01858
65	0.00979	0.01035	0.02014
70	0.01055	0.01114	0.02169
75	0.01130	0.01193	0.02323
80	0.01205	0.01272	0.02477
85	0.01280	0.01351	0.02631
90	0.01356	0.01429	0.02785
95	0.01431	0.01508	0.02939
100	0.01506	0.01587	0.03093
105	0.01581	0.01665	0.03247
110	0.01657	0.01744	0.03401
115	0.01732	0.01824	0.03556
120	0.01808	0.01903	0.03711
125	0.01884	0.01983	0.03868
130	0.01960	0.02064	0.04024
135	0.02037	0.02145	0.04182
140	0.02113	0.02227	0.04340

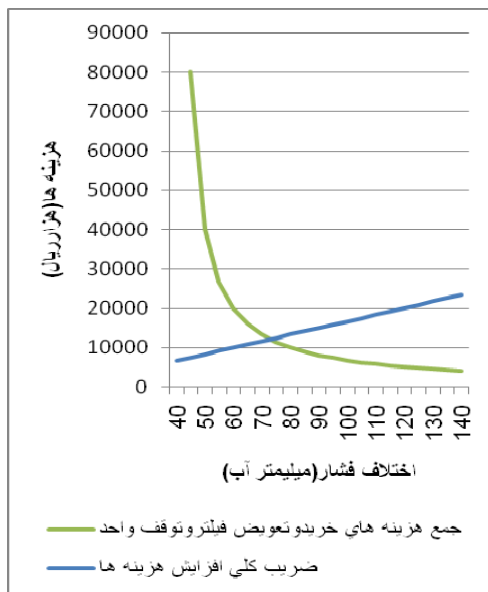
منحنی ضریب کلی افزایش هزینه ها بر حسب Δp به شکل

۵ می باشد:

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدید پس از هدف‌مندی‌سازی یارانه‌ها) با انجام محاسبات ذکر شده فوق و رسم نمودار هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه تعویض فیلتر روی یک محور مختصات مشترک نتیجه به شکل ۷ حاصل می‌گردد.

شکل ۷- نمودار تعیین نقطه بهینه تعویض فیلتر هوای کمپرسور (حالت اول)



چنانچه ملاحظه می‌گردد نقطه برخورد دو منحنی که نقطه بهینه و حداقل هزینه است در اختلاف فشار ۷۵ میلیمتر آب حادث شده است.

حالت دوم - از دید شرکت مدیریت تولید برق (دیدگاه شرکتی) به عنوان بهره‌بردار نیروگاه:

در این حالت قیمت فروش برق در شرکت‌های مختلف متفاوت است و برای محاسبه ۱۰ ریال در نظر گرفته می‌شود ضمناً شرکت‌های مدیریت تولید برق بابت مصرف سوخت هزینه‌ای پرداخت نمی‌کنند. نتیجه محاسبات به نمودار شکل ۸ منجر می‌شود.

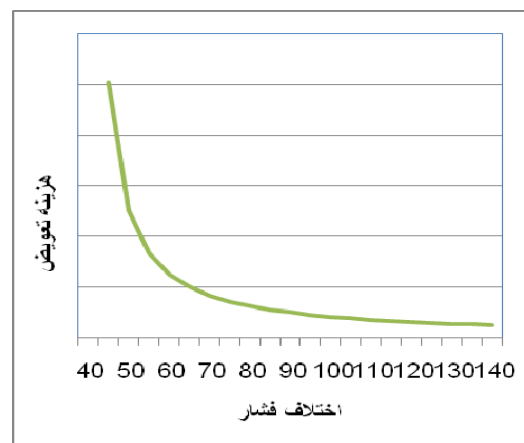
چنانچه ملاحظه می‌گردد نقطه بهینه تعویض فیلتر در این حالت در اختلاف فشار ۱۳۸ حادث شده است. بعبارت دیگر با توجه به نرخ پایین فروش برق در شرکت‌های مدیریت تولید برای این شرکتها مقرون بصرفه‌ترین حالت استفاده از فیلترها تا آخرین حد قابل تحمل واحد است.

ضمناً برای محاسبه هزینه‌های خرید و تعویض فیلتر باید روند افزایش اختلاف فشار و زمان کارکرد فیلتر را در نظر گرفت و بر حسب هزینه در روز نرمالایز کرد در این مورد به دو روش می‌توان عمل نمود.

روش اول ثبت اختلاف فشار فیلترها در فواصل زمانی مشخص مثلاً هفتگی و ورود اطلاعات بصورت پیوسته در کامپیوتر و انجام محاسبات Online

روش دوم محاسبه زمان متوسط کارکرد فیلترهای نصب شده قبلی. که در این مقاله از این روش استفاده می‌کنیم و ۱۴ ماه می‌باشد. البته همانگونه که ذکر شد در نیروگاه‌های مختلف این مدت متفاوت است. نمودار هزینه خرید و تعویض فیلترها بر حسب اختلاف فشار به شکل ۶ می‌باشد.

شکل ۶ - نمودار هزینه تعویض فیلترها



تعیین نقطه بهینه تعویض فیلتر

چنانچه عنوان گردید و در منحنی‌های فوق هم مشاهده می‌گردد با افزایش Δp هزینه‌های بهره‌برداری افزایش می‌یابد و در عوض هزینه خرید و تعویض فیلتر کاهش می‌یابد بنابر این نقطه بهینه تعویض فیلتر حداقل کردن هزینه‌هاست که از برخورد دو منحنی فوق بدست می‌آید. در ادامه نقطه بهینه را در دو حالت مختلف محاسبه می‌کنیم.

حالت اول - از منظر توانیر (دیدگاه ملی) به عنوان مالک نیروگاه:

در این حالت با لحاظ قیمت فروش هر کیلووات ساعت برق ۴۰۰ ریال و قیمت هر مترمکعب گاز ۸۰۰ ریال (قیمتهای

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

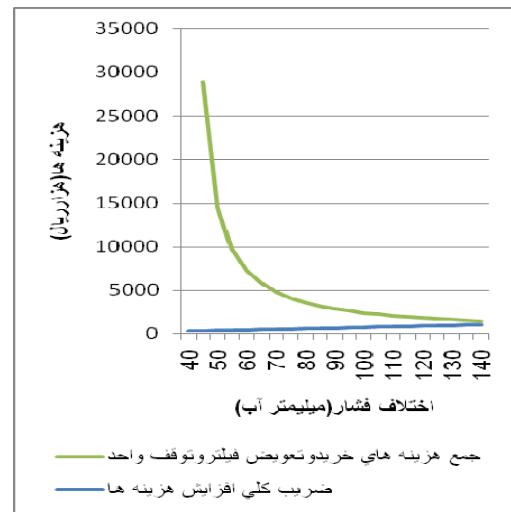
نتیجه گیری

در این مقاله جهت یافتن نقطه بهینه تعویض فیلترهای هوای کمپرسور از روش هزینه یابی و حداقل کردن هزینه استفاده شده است. بدین منظور هزینه های بهره برداری ناشی از افزایش Δp محاسبه و سپس هزینه های خرید، تعویض فیلتر و همچنین توقف واحد محاسبه گردید و منحنی های مربوطه روی یک محور مختصات رسم و نقطه برخورد دو منحنی که حداقل هزینه هاست تعیین گردید. و ملاحظه گردید که از دید توانیر مقرون به صرفه تر است که فیلترها در اختلاف فشار ۷۵ میلیمتر آب تعویض گردد اما از دید شرکتهای مدیریت تولید برق بهتر است فیلتر تا حد امکان مورد استفاده قرار گیرد. لذا با عنایت به تعداد قابل توجه واحدهای گازی در کشور تعویض فیلترها در اختلاف فشار بهینه محاسبه شده از لحاظ منافع ملی قابل توجه است.

فهرست مراجع

- ۱- سایت آمار و اطلاعات توانیر
- ۲- آرشیو فنی و لاگ شیت های واحدهای گازی
- ۳- تجربیات بهره برداری و تعمیرات نیروگاه
- 4- Gas turbine V94.2 performance test specification
- 5- Gas turbine operation and maintenance manual
- ۶- اسناد مالی شرکت تولید

شکل ۸ - نمودار تعیین نقطه بهینه تعویض فیلتر هوای کمپرسور (حالت دوم)



بنابراین نیروگاهها تلاش می کنند که فیلترها را در بالاترین اختلاف فشار ممکن تعویض نمایند در حالیکه این موضوع از منظر ملی هزینه های زیادی را به کشور تحمیل می کند و میزان این هزینه ها با توجه به مطالب پیش گفته و شرایط خاص هر منطقه در هر نیروگاه بصورت خاص قابل محاسبه است.