شبیه سازی سیکل گازی ۱۰۰ مگاواتی و تحلیل انرژیتیک و اگزرژیتیک استفاده از تزریق بخار به محفظه احتراق (مطالعه موردی)

نویسندگان

سهیلا مهدی زاده[۱]، امیر توکلی[۲]،دارا فتوحی[۲]

۱. کارشناس ارشد مهندسی شیمی *soheilamehdizadeh@gmail.ir*

۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

چکیده- در این مقاله با شبیه سازی سیکل گازی ۱۰۰ مگاواتی یکی از نیروگاههای ایران در مناطق گرم و خشک، توسط نرم افزار *GT Pro* تزریق بخار به محفظه احتراق دربهبود سیکلهای توربین گازی بر اساس مفهوم اگزرژی پرداخته شده است. در این مطالعه به بررسی اثر دما، فشار و دبی جرمی بخار تزریقی به محفظه احتراق بر میزان کاهش تلفات اگزرژی سیکل و افزایش توان خالص دریافتی از سیکل پرداخته شده است .افزایش دمای بخار تزریقی منجر به افزایش راندمان اگزرژی و توان خالص سیکل میگردد. افزایش دبی نیزمنجر به کاهش تلفات اگزرژی و انتشار میگردد .در این مطالعه همچنین اثر فشار بخار تزریقی نیز بررسی گردیده است

کلید واژه- تزریق بخار، سیکل گازی، ترموفلو

۱- مقدمه

امروزه مدلسازی حرارتی نیروگاه های مولد برق، بمنظور بررسی کارایی و راندمان نیروگاه ها و بررسی راههای بهینه سازی و افزایش توان نیروگاه مورد توجه قرار گرفته است. یکی از ابزارهای توانا جهت مدل سازی نیروگاه های مولد برق مجموعه نرم افزاری Thermo flow است که قابلیت شبیه سازی انواع نیروگاههای بخار، گازی و سیکل ترکیبی و همچنین ساختار داخلی نیروگاه را دارا می باشد. در این مقاله با شبیه سازی سیکل گازی مورد مطالعه توسط نرم افزار GT Pro تزریق بخار به محفظه احتراق دربهبود سیکلهای توربین گازی بر اساس مفهوم اگزرژی پرداخته شده است.

با افزایش روزافزون سهم نیروگاههای گازی در تولید و تأمین برق مورد نیاز شبکه سراسری، همچنین به منظور مقابله با بحران انرژی و استفاده مطلوب از منابع انرژی موجود، روشهای مختلفی برای بهبود عملکرد این نوع نیروگاهها پیشنهاد شده است .در این میان، استفاده از روش تزریق بخار به سیکل توربین گاز (در سرویس قرار گرفتن تجهیزات تزریق بخار به محفظه احتراق) عملی و سریع بوده و باعث می گر دد تزریق بخار یک راهکار منا سب در بهبود عملکرد سیکل توربین گازی باشد. لذا در دهه های اخیر مورد توجه و استقبال بسیار طراحان واقع شده است .هدف اصلی این مقاله، مطالعه تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل دما، فشار و دبی بخار ورودی به سیکل توربین گازی بر میزان اتلافات انرژی و اگزرژی و تاثیر آن بر توان تولیدی و راندمان واحدهای گازی است .برای این کار یک سیکل گازی ۱۰۰MW در نظر گرفته شده است و اطلاعات عملکردی آن برای انجام آنالیز انرژی و اگزرژی بکار گرفته شده است.

تزریق آب و بخار وسیله‌ای مناسب برای کنترل NOx کاهش دمای شعله است. تولید NOx بطور نمایی با افزایش تزریق آب یا بخار (افزایش رطوبت) کاهش می‌یابد. البته افزایش مصرف سوخت جهت گرم کردن آب و رساندن آن به دمای احتراق بایستی در این روش مد نظر قرار گیرد. همچنین این روش به دلیل بالابردن دبی جرمی توربین باعث بالا رفتن خروجی توربین گاز نیز می شود که این مسئله نیز بایستی در طراحی کوپلینگ ها و محور مد نظر

قرار گیرد. آب مورد استفاده در این روش بایستی دارای کیفیتی مشابه آب بویلر باشد تا از تشکیل رسوب و خوردگی اجزاء داغ پایین دست اتاق احتراق جلوگیری شود. تزریق آب یکی از موثرترین روشها برای کاهش تشکیل NOx است ملاحظاتی ویژه در طراحی اتاق های احتراق جهت کاربرد این تکنولوژی ضروری است. به منظور موثرتر کردن این روش نازلهای سوخت بایستی طوری طراحی شوند که یک مسیر اضافی برای تزریق آب به قسمت انتهایی اتاق احتراق داشته باشند. تزریق بخار جهت کاهش NOx نیز مشابه تزریق آب است منتها اثر بخشی تزریق بخار به اندازه تزریق آب نیست که علت آن این است که گرمای نهان آب به عنوان یک چاه حرارتی قوی برای کاهش دمای شعله عمل می‌کند. در حالت کلی برای یک مقدار مشخص کاهش NOx جرم بخار مورد نیاز ۱/۶ برابر بیش از جرم معادل آب است، قابل ذکر است که به لحاظ عملی محدودیتهایی برای مقدار آب یا بخار تزریقی وجود دارد که این محدودیت بایستی در طراحی اتاق احتراق برای اطمینان از عمر طولانی قطعات مدنظر قرار گیرد. از محدودیتهای دیگر این روش ترکیب. SO3 موجود در اگزوز توربین گاز با بخار آب موجود در اگزوز و تولید اسید سولفوریک می‌باشد. این مسئله در بویلرهای بازیاب که در خروجی توربین گاز نصب و ممکن است باعث کاهش دمای اگزوز تا نقطه شبنم شوند، می‌تواند مسئله ساز باشد.

۲- روش کار

از آنجاییکه منبع انرژی اولیه در نیروگاههای سیکل گازی، سوختهای فسیلی می باشد و با توجه مشکلات ناشی از مصرف این نوع سوختها، ارائه راهکارهایی در بهبود عملکرد سیکل که منجر به بهینه سازی مصرف انرژی می گردد، اجتناب ناپذیر می باشد .به خاطر اینکه انرژی بقاء دارد برای سیستمهایی که با آنها سر و کار داریم اصل بقای انرژی یا رابطه قانون اول را به کار می بریم ولی در مورد اگزرژی نمی توان لفظ بقاء را به کار برد چون مقداری از اگزرژی در طی یک فرآیند به علت وجود بازگشت ناپذیری از بین می رود و در نتیجه مجموع اگزرژیهای حالت نهایی فرآیند با اگزرژی اولیه مساوی نیست و اختلاف بین اگزرژی اولیه و نهایی همان بازگشت ناپذیری فرآیند می باشد[۱]. روشهای پیشین در این مورد، فقط انرژی را از لحاظ کمیت مورد مطالعه قرار می دهد و تفاوتی بین کار و حرارت قائل نمی شود .در حالیکه بین گرما و کار اختلاف کیفی وجود دارد .بعنوان مثال با حذف بازگشت ناپذیریها، کار را به طور کامل می توان به گرما تبدیل کرد اما در تبدیل گرما به کار، بیشینه راندمان همان راندمان سیکل کارنو است .در واقع، کیفیت یک انرژی عبارت است از پتانسیل آن انرژی برای تولید کار مفید و بنابراین آنچه اهمیت دارد این است که چه میزان از انرژی، پتانسیل تبدیل به کار را داراست. از این جهت است که امروز استفاده از مفهوم اگزرژی در آنالیز نیروگاهها اهمیت یافته است .مفهوم اگزرژی برآمده از قانون دوم ترمودینامیک است و آنالیز بر اساس آن نتایج پر معناتری را در مقایسه با روشهای مبتنی بر قانون اول ترمودینامیک ارائه می دهد .تعریف اگزرژی عبارت است از حداکثر کاری که از یک جریان ماده و یا انرژی می توان گرفت تا آن جریان یا انرژی به شرایط تعادل با محیط که در اصطلاح شرایط مرده میگویند، برسد .حداکثر کاری که از یک جریان میتوان گرفت تا به شرایط مرده برسد را اگزرژی جریان می گویند و بیشینه کاری که از یک مقدار انرژی حرارتی میتوان دریافت نمود تا به شرایط مذکور برسد را اگزرژی ناشی از انتقال حرارت می نامند .اگزرژی شیمیایی نیز عبارت است از حداکثر کاری که از یک سیستم می توان گرفت تا آن سیستم به تعادل شیمیایی با محیط برسد. روشی که در این مطالعه مورد تحلیل قرار میگیرد تزریق بخار آب به محفظه احتراق است .تزریق بخار علاوه بر آنکه منجر به افزایش توان سیکل میگردد به کاهش انتشار NOx نیز کمک میکند .یک مزیت ویژه روش تزریق بخار، سرعت در سرویس قرار گرفتن تجهیزات مورد نیاز برای این سیستم میباشد .انرژی مورد نیاز برای تولید بخار جهت تزریق به محفظه احتراق از گازهای خروجی توربین گازی دریافت میگردد .در این مقاله به بررسی اثر پارامترهای تزریق بخار(دما، فشار و دبی بخار تزریقی) بر تلفات اگزرژی و توان خالص سیکل مورد مطالعه میپردازیم. اطلاعات مربوط به اگزرژی شیمیایی سوخت گازطبیعی مورد استفاده در واحد گازی نیروگاه مورد مطالعه در شرایط طراحی در جدول۱-۱ آمده است[۳].

جدول۱-۱. اگزرژی شیمیایی سوخت گازطبیعی مورد استفاده

Component	*%mole*	$\mu(Kj/Kgmole)$
Methane	87.6	836510
Ethane	4.8	1504360
Propane	1.77	2163190
i-butane	0.33	2818930
n- butane	0.39	2818930
i-pentane	0.14	3477050
n- pentane	0.10	3477050
Hexane	0.07	4134590
Carbon dioxide	0.1	20140
Nitrogen	4.7	720
Total	100	874870

$$\dot{E}x_{fuel} = \frac{8.057\,Kg/s}{18.29\,Kg/Kg\,mole}\times[874870]Kj/Kg\,mole = 385392.4\,KW = 385.39MW$$

بازده انرژیتیک(قانون اول) کلی سیکل، بازده تبدیل انرژی ورودی به کار مفید خروجی (توان الکتریکی خروجی ژنراتور) است، و بازده اگزرژتیک(قانون دوم) بازده تبدیل اگزرژی سوخت ورودی به کار مفید است. این دو بازده به صورت زیر محاسبه می شوند[۴]:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{fuel}} \qquad (۱۵-۲)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_{fuel}} \qquad (۱۶-۲)$$

اطلاعات ترمودینامیکی سیکل در شرایط بار پایه و دمای ۳۱ درجه سانتیگراد و سوخت گازطبیعی درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است مرجع انتالپی و انتروپی برای بخار نقطه سه گانه آب می باشد و مرجع انتالپی و انتروپی دود در واحد بخار براساس استاندارد ASME PTC4-2 دمای محیط (۳۱°C) و فشار۱ اتمسفر درنظر گرفته شده است.

۲-۱- شبیه سازی نیروگاه گازی ۱۰۰مگاواتی

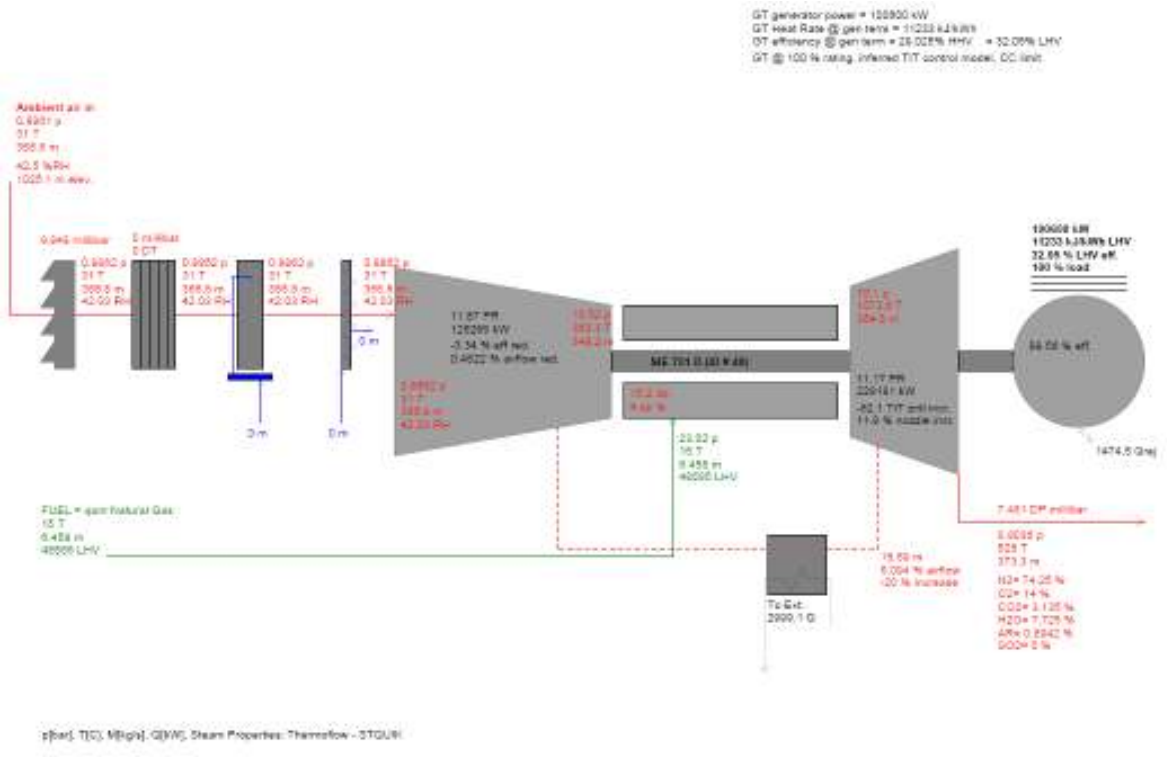
مطالعه مورد نظر برای نیروگاه گازی ۱۰۰مگاواتی انجام گرفته است که مشخصات عملکردی آن در جدول۱-۲ آمده است.

جدول۱-۲. مشخصات عملکردی سیکل ترکیبی در شرایط طراحی

مشخصات سیکل گازی نیروگاه مورد مطالعه	طراحی
توان تولیدی (*KW*)	۹۹/۷۵
راندمان٪	٪۳۲/۱۲
(*Kj/KW*) Heat Raet	۱۱۲۰۷
دمای محیط (*°C*)	۳۱
رطوبت محیط٪	۱۲
دمای گازهای خروجی (*°C*)	۵۳۲
راندمان اگزرژی٪	٪۳۱/۶۸

پس از مدلسازی نیروگاه با استفاده از اطلاعات طراحی، عملکرد آن در شرایط مختلف تزریق بخار با استفاده از نرم افزار ترموفلو براساس اطلاعات شرایط کارکرد شبیه سازی شده است و سپس عملکرد نیروگاه مورد تحلیل انرژیتیک و اگزرژیتیک قرار گرفته است. تحلیل انجام گرفته برای تزریق بخار با ۴ فشار ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰بار و دمای ۲۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد و سه دبی ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم بر ثانیه انجام گرفته است. مشخصات حرارتی سوخت گازطبیعی مورد استفاده در ۱-۳ آمده است. نمایش گرافیکی مدل ساخته شده سیکل گازی مورد مطالعه با نرم افزار GT Pro در شرایط سایت در زمان بهره برداری سیکل با سوخت گازطبیعی در شکل۱-۲ نمایش داده شده است.

energyenergy.ir



شکل۱-۲. نمایش گرافیکی مدل ساخته شده سیکل گازی نیروگاه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار GT Pro در شرایط سایت

جدول۱-۳. مشخصات حرارتی گازطبیعی مورد استفاده در نیروگاه مورد مطالعه

Fuel phase	= Gas
LHV @ 25C	= 45807 kJ/kg
HHV @ 25C	= 50672 kJ/kg
Fuel Supply Temperature	= 15C
Total LHV + Sensible Heat @ 15C	= 45788 kJ/kg
Fuel enthalpy referenced to 0C	= 50835 kJ/kg
Volumetric LHV @ 25C	= 34251 [kJ/scm]
Volumetric HHV @ 25C	= 37889 [kJ/scm]
(scm: m^3 @ 25 C & 1 atm)	
Molecular Weight	= 18.29

OK

۲-۲- بررسی تأثیر پارامترهای بخار تزریقی بر عملکرد سیکل

در سرویس قرار گرفتن تجهیزات تزریق بخار به محفظه احتراق عملی و سریع بوده و باعث می گردد.

تزریق بخار یک راهکار مناسب در بهبود عملکرد سیکل توربین گازی باشد . در این قسمت به بررسی اثر دما، فشار و دبی بخار تزریقی بر تلفات اگزرژی و توان سیکل می پردازیم.

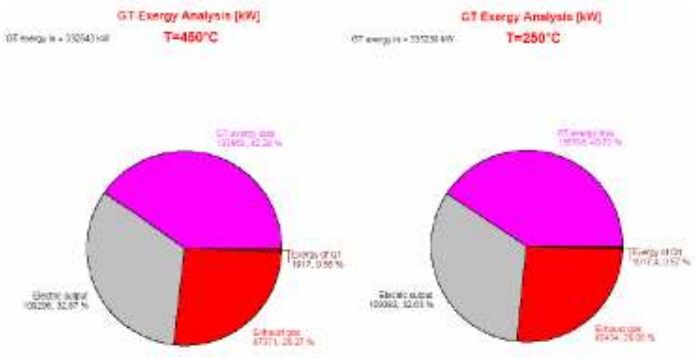
نتایج این قسمت در نمودارهای شکل۱-۴ تا شکل۱-۶ آمده است.

۲-۲-۱- اثر دمای بخار تزریقی

همانگونه که از نتایج مشخص است با افزایش دمای بخار تزریقی به محفظه احتراق راندمان سیکل افزایش می یابد.

یکی از دلایل این روند میزان مصرف سوخت کمتر جهت بالا بردن دمای بخار تا دمای محفظه احتراق با بالا رفتن دمای بخار خواهد بود.

لازم به ذکر است، با افزایش دمای بخار ورودی تلفات اگزرژی توربین کاهش می یابد(شکل۱-۳).



شکل۱-۳. مقایسه تلفات اگزرژی توربین گازی در دماهای متفاوت

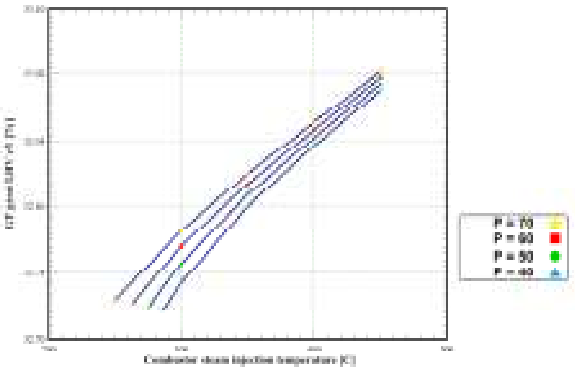
۲-۲-۲- اثر فشار بخار تزریقی

همانگونه که از نتایج مشخص است با افزایش فشار بخار از ۳۰بار تا ۷۰ بار راندمان سیکل کاهش می یابد، ولی این فشار نباید کمتر از فشار هوای خروجی از کمپرسور با شد. با افزایش فشار تلفات اگزرژی در محفظه احتراق کمی افزایش یافته و تلفات اگزرژی در توربین و کمپرسور تغییرات اساسی نداشته و تلفات اگزرژی در اگزور به میزان کمی کا هش می یابد. لذا فشار بخار ورودی به محفظه احتراق یک پارامتر موثر در کارآیی اگزرژی نمی باشد.

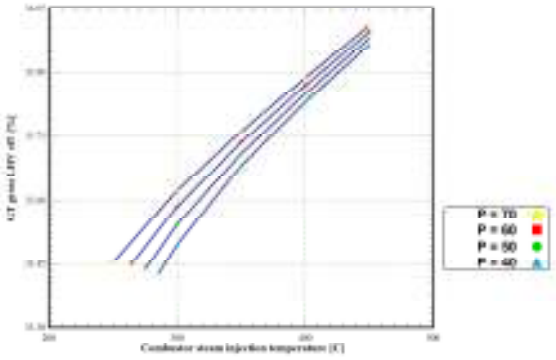
۲-۲-۳- اثر دبی جرمی بخار تزریقی

همانگونه که از نتایج مشخص است با افزایش دبی بخار تزریقی به محفظه احتراق راندمان سیکل افزایش می یابد.

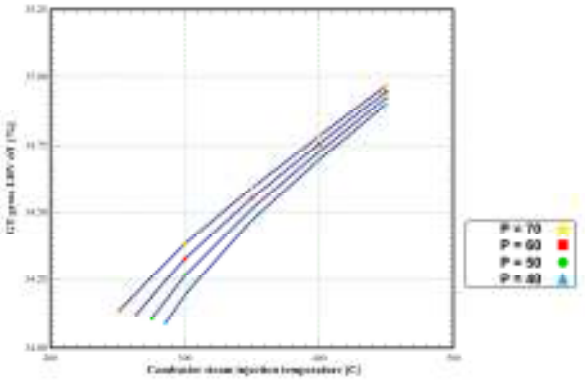
لازم به ذکر است، دبی جرمی بخار تزریقی را تا حداکثر 3 درصد دبی جرمی هوای خروجی از کمپرسور میتوان افزایش داد.



شکل۱-۴. تأثیر دما و فشار بخار تزریقی با دبی تزریق بخار ۳ کیلوگرم بر ثانیه بر راندمان سیکل



شکل۱-۵. تأثیر دما و فشار بخار تزریقی با دبی تزریق بخار ۵ کیلوگرم بر ثانیه بر راندمان سیکل



شکل۱-۶. تأثیر دما و فشار بخار تزریقی با دبی تزریق بخار ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه بر راندمان سیکل

۱-۲. نتیجه گیری

چنانچه پیش از این آمد، روش تزریق بخار به سیکل توربین گاز (در سرویس قرار گرفتن تجهیزات تزریق بخار به محفظه احتراق) عملی و سریع بوده و باعث می گردد تزریق بخار یک راهکار مناسب در بهبود عملکرد سیکل توربین گازی باشد.

تزریق آب و بخار وسیله‌ای مناسب برای کنترل NOx کاهش دمای شعله است. تولید NOx بطور نمایی با افزایش تزریق آب یا بخار (افزایش رطوبت) کاهش می‌یابد.

تزریق بخار جهت کاهش NOx نیز مشابه تزریق آب است منتها اثر بخشی تزریق بخار به اندازه تزریق آب نیست.

یک مزیت ویژه روش تزریق بخار، سرعت در سرویس قرار گرفتن تجهیزات مورد نیاز برای این سیستم میباشد .انرژی مورد نیاز برای تولید بخار جهت تزریق به محفظه احتراق از گازهای خروجی توربین گازی دریافت میگردد.

با افزایش دمای بخار تزریقی به محفظه احتراق راندمان سیکل افزایش و تلفات اگزرژی کاهش می یابد.

فشار بخار ورودی به محفظه احتراق یک پارامتر موثر در کارآیی اگزرژی نمی باشد.

با افزایش دبی بخار تزریقی به محفظه احتراق راندمان سیکل افزایش می یابد.

سپاسگزاری

لازم است از آقایان مهندس نجف زاده و مهندس غلامرضا بیاتی از سازمان بهره وری انرژی ایران (سابا) که ما را در انجام این پژوهش یاری کرده اند در این قسمت سپاسگزاری کنیم.

مراجع

[1] J. Szargut; " Exergy Analysis"; Academia Research in Progress Thermodynamics; 2005

[2] R. Kumar, S C Kaushik, A. Kumar; " Energy and Exergy Analysis of Non-reheat Thermal Power Plant"; International Conference on Energy and Environment; 2009

[3] R. C. Rosaler; " Standard Handbook of Plant Engineering"; 2nd edition;1994; McGraw Hill Book Company

[4] I. Dinceri, M. A. Rosen; " Exergy, Energy, Environment and Sustainable evelopment"; Elsevier; 2007

[5] M. Ameri, P. Ahmadi and S. Khanmohammadi Exergy analysis of a 420MW combined cycle power plant *Int J. Energy reaserch* 2007

[6] B. Facchini, D. Fiaschi, Exergy analysis of combined cycles using latest generation gas turbine, ASME J. Engrg. Gas Turbine Power 122(2000) 233-238