Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۹۱، جلد ۵۰، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۲۷۱-۲۷۷

مدلسازی عددی و تحلیل اگزرژی تزریق دود اگزوز به درون برج هلر بر روی عملکرد توربینهای گازی و بخاری یک نیروگاه چرخه ترکیبی در شرایط وزش باد

محمد مهدی یحیی‌آبادی دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی و مهندسی عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

علی جهانگیری* استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی و مهندسی عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

عملکرد برج هلر به شرایط محیط وابسته است، بطوریکه علاوه بر دما و چگالی، دبی هوای مکیده شده به سمت برج، روی راندمان آن تاثیر خواهد گذاشت. در شرایط وزش باد، به‌علت از بین رفتن تقارن توزیع فشار در اطراف برج و همچنین ایجاد پدیده درپوشی در بالای برج، دبی ورودی به برج و راندمان برج خنک‌کن کاهش می‌یابد که درنتیجه، عملکرد کلی نیروگاه نیز کاهش می‌یابد. یکی از روش‌هایی که برای بهبود راندمان برج پیشنهاد شده‌است، تزریق دود خروجی از دیگ بخار که دمایی حدود ۱۳۰ درجه سلسیوس دارد، بدرون برج در نیروگاه‌های چرخه ترکیبی می‌باشد. در مطالعه حاضر از نتایج تحلیل عددی، در حالت‌های بدون تزریق دود و با تزریق دود تحت شرایط طراحی برج و وزش باد، جهت تحلیل ترمودینامیکی و اگزرژی اجزای مختلف نیروگاه استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، نشان‌دهنده افزایش ۱۷/۲MW توان گرمایی برج خنک‌کن در شرایط وزش باد با سرعت ۲۰m/s تحت تاثیر تزریق دود، نسبت به حالت بدون تزریق دود می‌باشد که این میزان باعث افزایش راندمان‌های قانون اول و دوم نیروگاه به میزان به‌ترتیب ٪ ۰/۹۴ و ٪ ۰/۸۸ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برج خنک کن هلر؛ تزریق دود اگزوز؛ توان تولیدی توربین گاز؛ توان تولیدی توربین بخار؛ چرخه ترکیبی.

Numerical Modeling and Exergy Analysis of Flue Gas Injection into Heller Tower on The Operation of Gas and Steam Turbines of a Combined Cycle Power Plant under Crosswind Conditions

M. M. YahyaAbadi Faculty of Mechanical & Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

A. Jahangiri Faculty of Mechanical & Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

The performance of dry cooling tower (Heller Type) is highly affected by environmental conditions, especially wind condition. Under wind conditions, due to the loss of symmetry of the distribution of pressure around the tower, as well as the wind covering phenomenon on the top of the tower, the inlet airflow to the tower and so the efficiency of the cooling tower decreases. One of the methods recently proposed to improve cooling tower performance under wind conditions is the flue gas injection from a recovery boiler, which is about 130°C, into the cooling tower at combined cycle power plants. In the present study, a Heller dry tower, with a solution domain around it, is modeled using computational fluid dynamics. The amount of numerically calculated heat released from the cooling tower, with and without injection at the design conditions of the tower under crosswind effect, has been used to perform an exergy analysis on the components of the combined cycle power plant. Finally, the positive and negative effects of flue gas injection into the Heller Tower have been studied on the overall performance of the combined cycle power plant, indicating an increase about 0.94% and 0.88% in the overall first and second law efficiencies of combined cycle power plant respectively.

Keywords: Heller Type Cooling Tower; Flue Gas Injection; Gas turbine Power; Steam Turbine Power; Combined Cycle.

۱- مقدمه

استفاده از برج‌های خنک‌کننده خشک هلر با توجه به کمبود منابع آبی، رشد چشمگیری یافته است. عملکرد برج‌های هلر بستگی زیادی به شرایط محیطی مانند دما، رطوبت نسبی، وزش باد و... دارد، بطوریکه علاوه بر دما و چگالی هوای ورودی، دبی هوای مکیده شده به سمت برج نیز مستقیماً روی راندمان آن تاثیر خواهد گذاشت. بر اساس پژوهش‌های متعدد انجام‌شده، وزش باد به دلیل برهم‌زدن تقارن توزیع فشار در اطراف برج و همچنین به‌دلیل ایجاد پدیده درپوشی در بالای برج، باعث کاهش دبی هوای ورودی به برج و درنتیجه افت عملکرد آن می‌شود. یکی از روش‌هایی که اخیراً برای بهبود عملکرد برج در شرایط وزش باد پیشنهاد شده است، استفاده از تزریق دود اگزوز دیگ بخار بازیاب نیروگاه چرخه ترکیبی به‌درون برج می باشد که بر اساس پژوهش‌ها باعث بهبود شرایط و افزایش دبی هوای ورودی به‌درون برج نسبت به حالت بدون تزریق دود می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از این روش دارای معایبی مانند افزایش پس فشار خروجی از توربین‌های گازی، افت های فشار و دما ناشی از ایجاد کانال مربوط به تزریق دود و سرو صدای ایجاد شده از نازل تزریق دود نیز می‌باشدکه بایستی در کنار بهبود عملکرد برج و تولید توان در توربین بخار مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و نتیجه‌گیری بر اساس مزایا و معایب پیش‌گفته منظور گردد. تاکنون مطالعاتی در زمینه عملکرد برج های هلر صورت گرفته است که تماماً به بررسی آثار مخرب وزش باد بر عملکرد آنها پرداخته و راهکارهایی جهت رفع این آثار ارائه داده اند. ال- ویکد و بهنیا[۱]؛ شبیه‌سازی سه بعدی جریان داخل و اطراف یک

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a_jahangiri@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۸
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۱/۲۶

www.SID.ir

Archive of SID

برج خشک مکش طبیعی را انجام دادند. غفاری و گلنشان[۲] و نیز جهانگیری و رحمانی[۳]؛ به بررسی اثرات باد و کاربرد دیوارهای بادشکن روی برج خنک‌کن خشک پرداختند؛ بطوریکه اثرات وزش باد با سرعت‌های مختلف بر روی یک برج خنک‌کن خشک (هلر) که دارای چهار دیواره بادشکن در اطراف برج می‌باشد را بررسی کرده و سپس به بررسی میزان آثار نامطلوب وزش باد روی برج پرداختند. الدرج و همکاران[۴] و کوپر و همکاران[۵]؛ به بررسی اثر قرار دادن یک منبع گرمایی درون برج تر روی عملکرد برج‌های خنک‌کن با مکش طبیعی از نوع تر پرداختند. جهانگیری و گلنشان[۶-۸] به بررسی بهبود عملکرد گرمایی یک برج هلر، در مجاورت وزش باد، به کمک تزریق دود خروجی از نیروگاه چرخه ترکیبی به درون آن پرداختند.

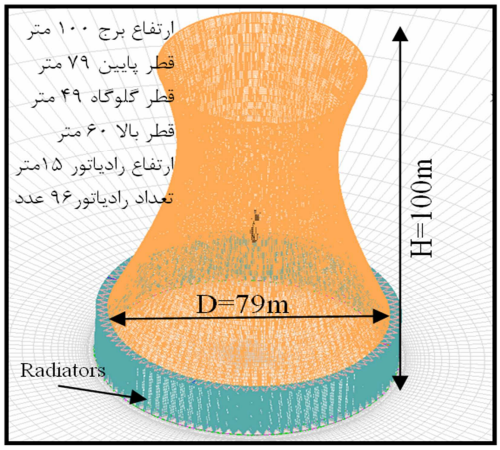
همانطور که مشخص است عملکرد برج در کل چرخه نیروگاه تاثیر خواهد گذاشت و بهبود عملکرد آن نیز منجر به بهبود کارایی چرخه خواهد شد و در ادبیات پیش گفته، تنها به بررسی عملکرد برج به تنهایی پرداخته شده است و اثرات آن بر کل چرخه دیده نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر ابتدا به مدلسازی عدی و بررسی تاثیر وزش باد روی عملکرد برج خنک‌کن هلر در دو حالت بدون تزریق دود و با تزریق دود پرداخته و سپس بادرنظرگرفتن مزایای این روش که شامل بهبود عملکرد برج و درنتیجه افزایش توان تولیدی چرخه بخار در شرایط وزش باد می‌باشد و همچنین معایب آن شامل کاهش توان تولیدی توربین گاز به‌دلیل افزایش فشار خروجی توربین گاز در اثر لوله‌کشی و ...، به بررسی ترمودینامیکی و تحلیل اگزرژی اجزای مختلف نیروگاه چرخه ترکیبی پرداخته و در نهایت تاثیر آن بر راندمان کلی قانون‌های اول و دوم نیروگاه بیان می‌شود.

۲-بیان مسئله

به منظور بررسی اثر وزش باد روی عملکرد نیروگاه، ابتدا کلیه اجزای نیروگاه چرخه ترکیبی فارس شامل اجزای واحد توربین گاز و واحد چرخه بخار برای شرایط عملکردی نیروگاه چرخه ترکیبی مدل¬سازی می¬شود. سپس با استفاده از نتایج حل عددی مدلسازی برج هلر نیروگاه، عملکرد و رفتار برج در شرایط وزش بادهای مختلف بر چگالنده، توربین بخار و در نهایت روی کل چرخه ترکیبی شبیه سازی خواهد شد. در ادامه جهت بهبود عملکرد برج روش تزریق دود اگزوز به درون برج بروش دینامیک سیالات محاسباتی و در شرایط وزش بادهای مختلف مدل شده و این بهبود در عملکرد در تمامی اجزای چرخه نیروگاه نیز دنبال خواهد شد. بطوریکه تحلیل اگزرژی چرخه نیروگاه و راندمانهای قانون اول و دوم ترمودینامیک در اثر اعمال سامانه تزریق دود به درون برج بدست آمده و مقایسه خواهد گردید.

۳-مدلسازی برج هلر

برج خنک‌کن هلر مطابق شکل ۱ شبیه یک دودکش عمل می‌کند که جریان هوا در اثر جابجائی طبیعی به داخل آن کشیده می‌شود. برج خنک کن مورد مطالعه یکی از برجهای خنک کن نیروگاه چرخه ترکیبی فارس بوده و اطلاعات هندسی مربوطه مطابق شکل ۱ بر اساس داده های استعلام شده از چرخه نیروگاه اقتباس شده است.



شکل ۱- طرحواره برج هلر مورد مطالعه (نیروگاه چرخه ترکیبی فارس)

انتقال گرما بین آب گرم ورودی به مبادله‌کن گرما و هوای خنک‌کننده ورودی به درون برج‌های با مکش طبیعی با رابطه زیر بیان می‌شود[۹]:

$$Q = h\left(T_{he} - T_{ai}\right) \quad (۱)$$

که در رابطه فوق T_{he} دمای متوسط آب رادیاتورها و T_{ai} دمای هوای ورودی است.

معادلات اصلی جریان شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال گرما که به ترتیب بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی را تضمین می‌کنند، بصورت زیر نوشته می‌شوند[۹]:

$$\nabla.V = 0 \quad (۲)$$

$$(V.\nabla)V = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nabla.\left(\frac{\sigma}{\rho}\right) - \beta(T - T_a)g + S \quad (۳)$$

$$\rho(V.\nabla)T = -\nabla.[(\Gamma + \Gamma_t)\nabla T] + Q \quad (۴)$$

با توجه به استفاده از مدل آشفته k-ε standard، انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ پخش ε می‌تواند بصورت معادلات زیر بیان گردد[۹]:

$$(V.\nabla)k = \nabla.[(v + v_t/\sigma_k)\nabla k] + P + G - \varepsilon \quad (۵)$$

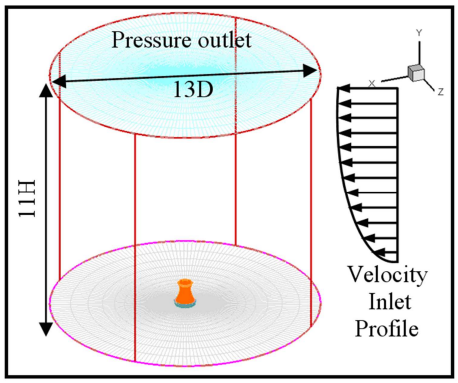
$$(V.\nabla)\varepsilon = \nabla.[(v+v_t/\sigma_\varepsilon)\nabla\varepsilon] + c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(P+G) - c_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۶)$$

که در رابطه فوق، P انرژی جنبشی تولیدی در اثر آشفتگی و G انرژی جنبشی تولیدی در اثر شناوری است.

شرایط مرزی، متغیرهای جریان و گرما را در ورودی مرزهای فیزیکی دامنه مشخص می‌کنند که در شکل۲ نحوه انتخاب آنها مشاهده می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- نمایی از دامنه حل و شرایط مرزی

شرط مرزی دیوار برای مرزهای جامد (زمین، جداره (پوسته برج) و لوله‌هایی که برای تزریق دود داغ به‌داخل برج وارد شده‌اند) به‌کار رفته است. شرط مرزی سرعت ورودی، به منظور تعریف سرعت و خصوصیات اسکالر جریان ورودی به مرز می‌باشد. مولفه‌های سرعت باد در جهت جریان مساوی سرعت وزشی باد بوده و دیگر مولفه‌ها مساوی صفر هستند. دمای هوا مساوی ۲۸۸ K و برای تمامی سرعت‌های وزش باد و تزریق دود ثابت در نظر گرفته می‌شود.

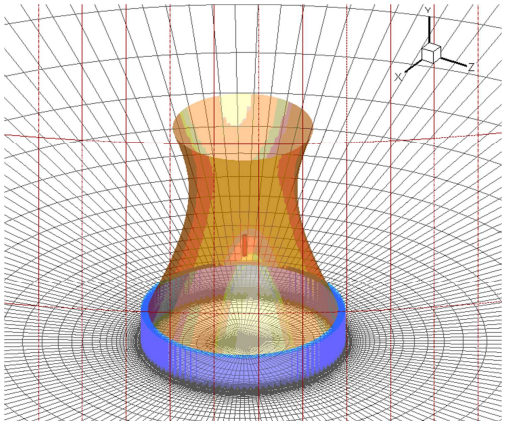
شایان ذکر است که در شرط مرزی رادیاتور که برای مدل کردن مبادله‌کن‌های گرمایی برج بکار می‌رود؛ رادیاتورها به‌صورت بینهایت نازک درنظرگرفته شده و افت فشار و ضریب انتقال گرمای آنها مطابق روابط زیر، متناسب با دبی هوا در نظر گرفته می‌شود[۴].

$$\Delta P = 2.1\dot{m}^{1.76} + 0.06\dot{m}^{2} \quad (۷)$$

$$h = 1374\dot{m}^{0.515} \quad (۸)$$

۴-شبکه‌بندی دامنه حل

جهت بررسی تاثیر وزش باد و تزریق دود بر نتایج جریان و انتقال گرما روی برج خنک‌کن پس از مطالعه شبکه و بررسی عدم وابستگی حل به شبکه؛ از شبکه‌های سازمان‌یافته نوع H-O استفاده شده است که شکل۳، این شبکه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایی از نحوه شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

برای اطمینان از مستقل بودن جواب‌ها نسبت به شبکه، مطابق تحقیق جهانگیری و گلنشان[۱] انتقال گرما از برج برای ۴ نوع شبکه متفاوت در جدول۱ مقایسه شده و با در نظر گرفتن بیشینه خطای ۱ درصد، تعداد شبکه ۲۸۷۴۷۶۰، بعنوان مناسبترین شبکه انتخاب شده است.

جدول ۱- گرمای دفع شده از برج برای شبکه‌های مختلف

حالت	تعداد شبکه	انتقال گرمای مبادله‌کن‌ها MW
۱	۲۲۲۰۲۲۰	۲۱۳/۵
۲	۲۵۱۶۹۲۹	۲۱۳/۶۸
۳	۲۸۷۴۷۶۰	۲۱۳/۸۱
۴	۳۰۱۷۶۶۰	۲۱۳/۸۶

۵-اعتبارسنجی نتایج حل عددی

جدول۲ نتایج بدست آمده از حل عددی را در مقایسه با شرایط طراحی (مقدار اسمی مورد اشاره توسط سازنده در کاتالوگ برج‌خنک‌کن) و مقادیر اندازه‌گیری شده (مقدار واقعی ثبت‌شده در نیروگاه چرخه ترکیبی فارس) برای یک برج خنک‌کن نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از حل عددی با نتایج گزارش شده توسط شرکت سازنده، در شرایط اسمی تطابق خوبی دارد.

جدول ۲- گرمای دفع شده در مبادله‌کن‌های برج هلر نیروگاه چرخه ترکیبی فارس (بدون تاثیر باد)

	شرایط طراحی[۷]	شبیه‌سازی عددی	مقادیر اندازه‌گیری شده[۷]
گرمای دفع شده MW	۲۱۴/۳	۲۱۳/۸۱	۲۰۲/۸

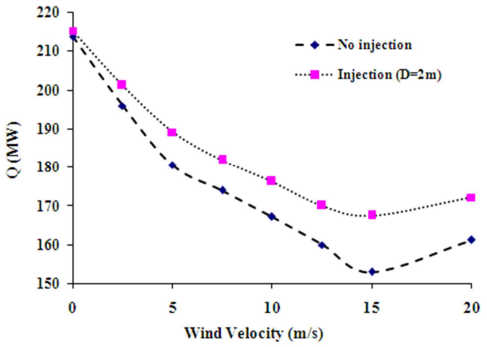
۶-نتایج دینامیک سیالات محاسباتی برج هلر

تزریق دود اگزوز به درون برج در شرایط وزش باد می تواند منجر به بهبود عملکرد خنک کاری برج شود که در نمودار شکل ۴ تاثیر مثبت تزریق دود در شرایط وزش باد با شرایط بدون تزریق دود مقایسه و مشاهده می شود. لازم به ذکر است که این تزریق توسط یک نازل با قطر ۲m و سرعت خروجی حدود ۹۱/۲۱ m/s که مربوط به تخلیه دود فقط یکی از واحدهای تولید بخار می باشد، انجام گرفته است. در پژوهش جهانگیری و گلنشان [۷] تاثیر ارتفاع تخلیه دود و قطر نازل خروجی تخلیه دود را روی عملکرد برج مورد بررسی قرار گرفته و حالت بهینه قطر ۲m و ارتفاع ۳۵m پیشنهاد شده است. بنابراین در پژوهش حاضر نیز از نتایج حالت بهینه تزریق دود استفاده شده تا برای وزش بادهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰m/s نتایج حل معادلات جریان و انرژی پس از اطمینان از همگرایی بصورت توزیع دما، توزیع فشار و بردارهای سرعت هوا؛ مورد بررسی قرار گیرد. البته در ادامه با استفاده از این نتایج، عملکرد ترمودینامیکی کل چرخه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به نمودار شکل ۴ عملکرد گرمایی برج در اثر وزش باد افت پیدا می‌کند که این امر را می‌توان به کاهش دبی

www.SID.ir

Archive of SID

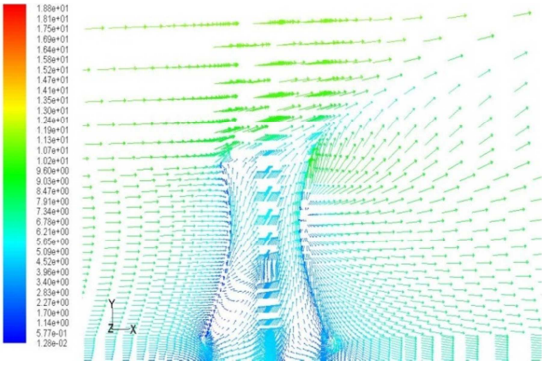
ورودی هوا به درون برج در اثر ایجاد جریان‌های ثانویه و دور شدن جریان از حالت مکش طبیعی نسبت داد که این دور شدن از حالت مکش طبیعی در شکل ۵ قابل مشاهده است.



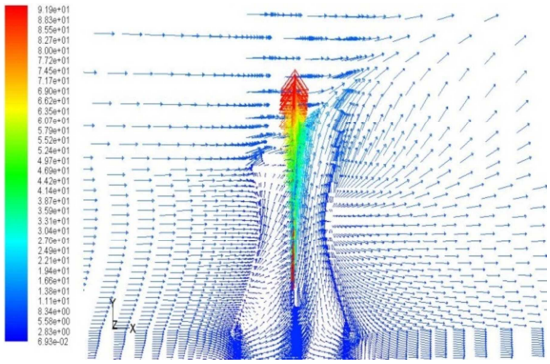
شکل ۴- استفاده از تزریق دود در میزان خنک کاری برج هلر در شرایط وزش باد با سرعت‌های مختلف

همانطور که قابل پیش‌بینی است تزریق دود داغ منجر به افزایش مکش هوا به‌درون برج شده و درنتیجه میزان گرمای دفع شده از برج را بالا می‌برد.

شکل‌های ۵ و ۶ (به ترتیب در حالت بدون تزریق دود و با تزریق دود) بردارهای سرعت در شرایط وزش باد ۱۰m/s و در مقطع عمودی را نمایش می‌دهند.



شکل ۵- بردارهای سرعت در مقطع z = 0 وزش باد ۱۰ m/s (بدون تزریق دود)



شکل ۶- بردارهای سرعت در مقطع z = 0 وزش باد ۱۰ m/s (با تزریق دود)

همانطور که از شکل ۵ برمی‌آید جریان باد همانند یک پوشش افقی بر روی دهانه خروجی برج اثر می گذارد و به این ترتیب مکش طبیعی برج را به شدت کاهش می دهد، درحالی‌که با تزریق دود داغ، اثر پدیده درپوشی کاهش‌یافته و دبی هوای عبوری از برج افزایش می‌یابد.

در حالت مکش طبیعی (بدون وزش باد) به‌علت تقارن توزیع فشار در اطراف برج و میدان جریان داخل برج، توزیع دما نیز کاملاً متقارن بوده و میزان گرمای دفع شده از تمامی مبادله‌کن‌ها یکسان می‌باشد. اما درحالت وزش باد، به علت عدم تقارن توزیع فشار در اطراف برج، جریان داخل برج از حالت متقارن خارج شده و میزان گرمای دفع شده از مبادله‌کن‌های اطراف برج یکسان نخواهد بود؛ به طوری که مبادله‌کن های جلویی (رو به باد) به علت عبور جریان هوای بیشتر به داخل آنها گرمای بیشتری نسبت به مبادله‌کن‌های کناری و عقبی دفع می‌کنند و در مجموع، گرمای دفع‌شده از برج نسبت به حالت بدون وزش باد کاهش می‌یابد که به معنی افزایش دمای آب خروجی از برج و در نتیجه کاهش توان تولیدی و راندمان چرخه بخار می باشد.

۷- بررسی ترمودینامیکی و اگزرژی تزریق دود به درون برج هلر در کل نیروگاه چرخه ترکیبی

معادلات موازنه جرم، انرژی و اگزرژی که برای هر یک از اجزاء در یک سامانه گرمایی به‌کار میرود را می‌توان با استفاده ازترکیب قانون اول و دوم ترمودینامیک به صورت موازنه اگزرژی بیان کرد[۹]:

$$\dot{E}_w = -\frac{d}{dt}(E + P_0V - T_0S) + \sum_{i=1}^{n}\dot{Q}_i(1-\frac{T_0}{T_i}) + \sum \dot{m}_{in}(h_{in}^t - T_0 s_{in}) - \sum \dot{m}_{out}(h_{out}^t - T_0 s_{out}) - T_0\dot{S}_{gen} \quad (۹)$$

هریک از عبارت‌های رابطه فوق، بخشی از تحلیل و نوع اگزرژی را تشکیل‌داده که عبارت‌اند از:

$\dot{E}_w$، بیانگر اگزرژی کار مبادله‌شده بین سیستم و محیط است.

$-\frac{d}{dt}(E + P_0V - T_0S)$، بیانگر اگزرژی غیرجریانی ذخیره‌شده در حجم‌کنترل است.

$\sum_{i=1}^{n}\dot{Q}_i(1-\frac{T_0}{T_i})$، بیانگر اگزرژی گرمای مبادله شده توسط سیستم است که در دمای T_i صورت می‌گیرد.

$\sum \dot{m}_{in}(h_{in}^t - T_0 s_{in})$ بیانگر اگزرژی جریان ورودی و $\sum \dot{m}_{out}(h_{out}^t - T_0 s_{out})$ اگزرژی جریان خروجی است.

$T_0\dot{S}_{gen}$، بیانگر مقدار بازگشت‌ناپذیری سیستم است که در اثر تولید آنتروپی در فرآیندهای بازگشت‌ناپذیر، ایجاد می‌شود. برای تحلیل دقیق اگزرژی و محاسبه بازگشت ناپذیری‌ها در چرخه باید هریک از اجزای آن‌را به صورت یک حجم کنترل در نظر گرفته و معادلات بقای انرژی و موازنه اگزرژی را برای آن نوشته و حل کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

لازم به‌ذکر است که برای محفظه احتراق توربین گاز که فرآیند شیمیایی در آن رخ می‌دهد، تغییرات اگزرژی شیمیایی نیز لحاظ شده است.

۸-شبیه سازی ترمودینامیکی چرخه نیروگاه

به منظور بررسی اثر وزش باد روی عملکرد نیروگاه، ابتدا کلیه اجزای نیروگاه چرخه ترکیبی شامل اجزای واحد توربین گاز و واحد چرخه بخار برایشرایط عملکردی نیروگاه چرخه ترکیبی فارس مدل‌سازی‌شده است. دیگ بخار بازیاب مورد استفاده، یک دیگ بخار بازیاب دوفشاره است، که برای نیروگاه فارس، فشار بالای آن روی ۱۰۴ بار و فشار پایین آن روی ۱۸/۲ بار تنظیم شده است. اجزای دیگ بخار بازیاب عبارتند از: پیش گرمکن، اکونومایزر، تبخیرکن و فراگرم‌کن فشار پایین، اکونومایزر ۱ و ۲، تبخیرکن و فراگرم‌کن فشار بالا.

شرایط محیطی نیز به صورت دما و فشار طرح نیروگاه فارس یعنی دمای ۱۵ درجه ی سلسیوس و فشار ۰/۸۶۷ بار در نظر گرفته شده است.

نکته قابل ذکر دیگر اینکه همانطور که واضح است افزایش فشار پشت توربین گاز در یک سیکل نیروگاه گازی منجر به کاهش توان تولیدی آن می‌گردد که با توجه به طول لوله کشی از انتهای سیکل ترکیبی تا برج‌های هلر و بروز افت فشار در مسیر که مستقیماً روی توان تولیدی توربین گازی اثر منفی خواهد طبق مدلسازی انجام شده و محاسبات سیالاتی این افت فشار ایجاد شده در مجموع حدود ۵ kPa می‌باشد.

در ادامه برای تمام اجزاء در مسیر چرخه ترکیبی نیروگاه، معادلات انرژی و اگزرژی به صورت موازنه انرژی و اگزرژی حل شده است و در ادامه جهت اعتبار سنجی نمونه هایی از این نتایج با داده های چرخه نیروگاه مقایسه می‌شود.

برای اعتبارسنجی صحت عملکرد کد نوشته شده، شرایط طرح نیروگاه فارس را در برنامه قرارداده و نتایج حاصل شامل توان تولیدی توربین گاز، توان تولیدی چرخه بخار، با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار داده شده است. نتیجه مقایسه در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳- مقادیر واقعی و نتایج مدلسازی ترمودینامیکی کل چرخه

	توان تولیدی توربین گاز MW	توان تولیدی توربین بخار MW
مقادیر واقعی	۱۱۶/۲	۹۸/۲
نتایج مدلسازی	۱۱۶/۲	۹۵/۶

همانطور که از جدول فوق مشخص است، نتایج مدلسازی تا حدزیادی به مقادیر واقعی نزدیکاست و اختلاف آنها زیاد نیست. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که مدلسازی به درستی انجام شده و نتایجبه دست آمده برای سایر حالت ها نیز معتبر می باشند.

پس از نوشتن معادلات برای تمام اجزای چرخه و حل آن‌ها، ارتباط بین نقاط مختلف چرخه تعیین‌شده و مقادیر تخریب اگزرژی اجزای مختلف چرخه و راندمان‌های قانون اول و دوم نیروگاه در دو حالت بدون تزریق دود و با تزریق دود برای وزش باد با سرعت‌های مختلف تعیین می‌شود. شکل‌های ۸ تا ۱۰ مقادیر اتلاف اگزرژی در اجزاء مختلف چرخه ترکیبی را نشان می‌دهند.

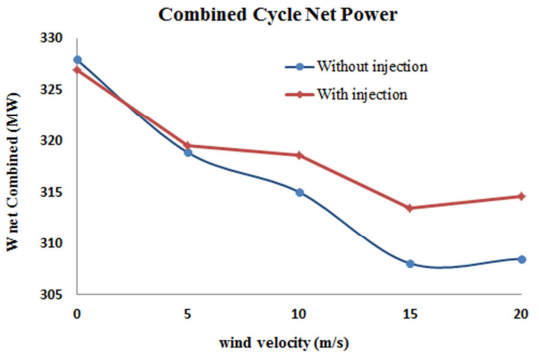
نکته قابل توجه دیگر مقایسه چرخه توربین گاز در دو حالت تزریق دود و بدون تزریق دود می باشد. تزریق دود خروجی دیگ بخار بازیاب به درون برج خنک‌کن، باعث افزایش پس‌فشار توربین و در نتیجه کاهش توان تولیدی و کاهش راندمان قانون اول و دوم در چرخه توربین گاز می شود، اما افزایش پس‌فشار توربین گاز، باعث افزایش دمای دود خروجی از آن می‌شود که اگرچه روی چرخه توربین گاز دارای تاثیر منفی است، اما باعث افزایش دمای بخار فراگرم فشاربالا و درنتیجه افزایش توان تولیدی و راندمان چرخه بخار می‌شود. کاهش توان تولیدی توربین گاز در اثر تزریق دود به درون برج خنک‌کن، برای سرعت های بسیار پایین باد، اثر نامطلوبی روی عملکرد کلی نیروگاه دارد، زیرا کاهش توان تولیدی توربین گاز، بیش از افزایش توان توربین بخار می باشد، اما همان‌طور که از شکل ۷ که به مقایسه توان تولیدی کل یک واحد چرخه ترکیبی شامل دو واحد توربین گاز و یک واحد توربین بخار می‌پردازد، برمی آید، با افزایش سرعت وزش باد به بیش از ۳m/s ، تاثیر مثبت تزریق دود روی چرخه بخار بر تاثیر منفی آن روی توربین گاز غالب شده و مجموعا توان تولیدی را افزایش می دهد و با افزایش هرچه‌بیش‌تر سرعت باد نیز این تاثیر مثبت خود را بیش‌تر نشان داده و اختلاف توان تولیدی بین نیروگاه چرخه ترکیبی که از روش تزریق دود به درون برج خنک‌کن استفاده می‌کند در مقایسه با حالت بدون تزریق دود ، بیش‌تر می‌شود.

تحت شرایط وزش باد، دبی هوای عبوری از برج خنک‌کن کاهش می‌یابد که باعث کاهش توان گرمایی برج خنک‌کن می‌شود. با کاهش میزان گرمای دفع‌شده توسط برج، توان کل تولیدی چرخه بخار کاهش می‌یابد که برای حفظ خلاء چگالنده و جلوگیری از افزایش فشار چگالنده، این کاهش توان به‌صورت کاهش دبی جرمی بخار در چرخه بخار انجام‌می‌شود. بنابراین، با کاهش دبی جرمی، توان تولیدی چرخه بخار کاهش‌یافته و همچنین میزان تخریب اگزرژی اجزاء نیز کاهش‌می‌یابد، زیرا میزان تخریب در هر جزء، به دبی جرمی عبوری از آن جزء نیز بستگی‌دارد.

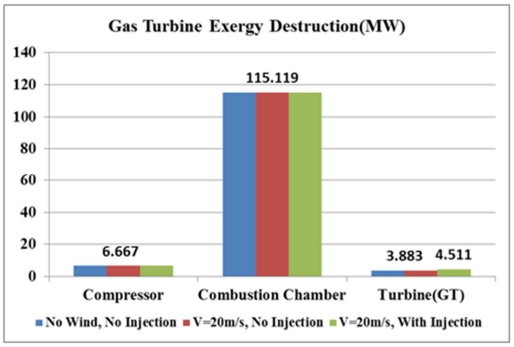
اما این به‌معنی عملکرد بهتر چرخه نیست و راندمان قانون اول و دوم که بیان‌گر عملکرد چرخه هستند، در شرایط وزش باد کاهش‌می‌یابد.

www.SID.ir

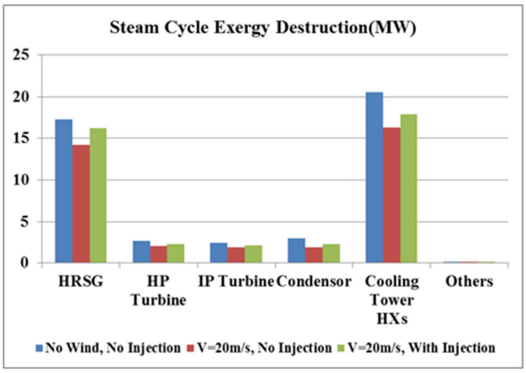
Archive of SID



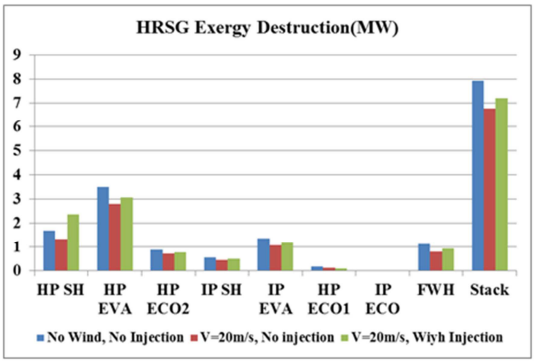
شکل ۷- توان خالص تولیدی در کل چرخه ترکیبی در شرایط تزریق و عدم تزرق دود اگزوز به درون برج هلر



شکل ۸- اتلافات اگزرژی در اجزاء اصلی توربین گاز برای سه حالت بدون تزریق و بدون وزش باد، بدون تزریق و با وزش باد، با تزریق و با وزش باد



شکل ۹- اتلافات اگزرژی در اجزاء اصلی چرخه بخار برای سه حالت بدون تزریق و بدون وزش باد، بدون تزریق و با وزش باد، با تزریق و با وزش باد



شکل ۱۰- اتلافات اگزرژی در اجزاء چرخه ترکیبی برای سه حالت بدون تزریق و بدون وزش باد، بدون تزریق و با وزش باد، با تزریق و با وزش باد

در شرایط وزش باد با سرعت مشابه تحت حالتی که تزریق دود به درون برج خنک‌کن انجام‌می‌شود، دبی هوای عبوری از برج نسبت به حالت بدون تزریق دود افزایش یافته و باعث افزایش توان گرمایی آن می‌شود که اثر آن بر روی چرخه، به‌صورت افزایش دبی جرمی بخار و در نتیجه افزایش توان تولیدی می‌باشد.

افزایش دبی جرمی، از طرفی باعث افزایش توان تولیدی چرخه بخار و از طرف دیگر افزایش تخریب اگزرژی می‌شود، اما مطابق جدول ۴، راندمان قانون اول و دوم برای حالت دارای تزریق دود نسبت به حالت بدون تزریق دود برای سرعت باد یکسان، افزایش می‌یابد که بیان‌گر عملکرد بهتر کلی چرخه می‌باشد.

جدول ۴- راندمان‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک

		چرخه توربین گاز	چرخه بخار	چرخه ترکیبی
بدون تزریق دود وبدون وزش باد	راندمان قانون اول (٪)	۳۳/۵۹	۳۲/۲۶	۵۱/۳۶
	راندمان قانون دوم (٪)	۳۴/۳۴	۶۵/۴۱	۴۸/۴۵
سرعت وزش باد V=20m/s و بدون تزریق دود	راندمان قانون اول (٪)	۳۳/۵۹	۲۷/۰۴	۴۸/۳۲
	راندمان قانون دوم (٪)	۳۴/۳۴	۵۴/۸۳	۴۵/۵۹
سرعت وزش باد V=20m/s و با تزریق دود	راندمان قانون اول (٪)	۳۲/۹۳	۲۹/۱۷	۴۹/۲۶
	راندمان قانون دوم (٪)	۳۳/۷۹	۵۹/۱۱	۴۶/۴۷

۹-جمع بندی و نتیجه‌گیری

بررسی و قضاوت درباره تاثیر کلی روش تزریق دود بر عملکرد چرخه ترکیبی، باید به‌صورت برآیند تاثیر منفی روی چرخه توربین گاز و تاثیر مثبت روی چرخه بخار انجام شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده راندمان قانون اول و دوم کلی چرخه ترکیبی در اثر تزریق دود برای سرعت‌های باد بیش از ۳m/s افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کارآیی

www.SID.ir

Archive of SID

مثبت این روش بر عملکرد کلی چرخه ترکیبی می‌باشد. علاوه بر آن با توجه به اینکه دود خروجی دیگ بخار بازیاب به درون برج خنک‌کن تزریق‌شده و نسبت به حالت معمولی که از دودکش نیروگاه خارج می‌شود، در ارتفاع بالاتری تخلیه‌شده‌است، از مقدار پخش آلاینده‌هایی نظیر NOx، SOx و ... و افزایش تراکم آن در سطوح نزدیک به زمین کاسته خواهد شد که از نظر زیست‌محیطی نیز دارای اثر مثبت می‌باشد.

۱۰- نمادها

h	ضریب کلی انتقال گرما
Inj	تزریق دود
K_L	ضریب بی بعد افت فشار
$\dot{m}$	دبی جرمی هوای عبوری از رادیاتورها
q	آهنگ انتقال گرما از رادیاتورها
T_{ai}	دمای هوای ورودی به مبادله‌کن‌ها
T_{he}	دمای متوسط آب گردشی
T_{wi}	دمای آب ورودی به رادیاتورها
T_{wo}	دمای آب خروجی از رادیاتورها
ΔP	افت فشار

علایم یونانی

ρ	چگالی

زیرنویس

FGI	تزریق دود داغ حاصل از احتراق
$noFGI$	عدم تزریق دود داغ حاصل از احتراق

۱۱-مراجع

[1] Al-Waked R. and Behnia M., The Performance of Natural Draft Dry Cooling Towers under Crosswind: CFD Study, International Journal of Energy Resource, Vol. 28, pp.147-161, 2004.

[2] Ghaffari S., Golneshan A. and Mokhtarpoor R., 3D Numerical Analysis of The Performance of An NDDCT with Windbreak Walls under Various Crosswind Velocities and Directions, *2007 Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering*, Kangar, Perlis, Malaysia, 2007.

[3] Jahangiri A. and Rahmani F., Power production limitations due to the environmental effects on the thermal effectiveness of NDDCT in an operating powerplant, Applied Thermal Engineering, Vol. 141, pp. 444-455, 2018.

[4] Eldredge T. V., Benton D. J. and Hodgson J. W., An Investigation of The Effects of Flue Gas Injection on Natural Draft Cooling Tower Performance, Journal of Engineering For Gas Turbine and Power, Vol. 119, pp. 478-484, 1997.

[5] Cooper J., Grindle E. and Lawson R., Improving Natural Draft Cooling Tower Performance With Heat Injection, *International Joint Power Generation Conference*, Phoenix, AZ, USA, 2002.

[۶] جهانگیری ع. و گلنشان ع. ا. بررسی بهبود عملکرد حرارتی برج هلر بر اثر تزریق دود اگزوز به درون آن، *اولین کنفرانس صنعت نیروگاههای حرارتی*، تهران: دانشگاه تهران، ۱۳۸۸

[7] Jahangiri A. and Golneshan A. A., Feasibility Study of the Thermal Performance Improvement of Natural Draft Dry Cooling Towers due to Flue Gas Injection, World Applied Science Journal, Vol. 12, No. 4, pp. 568-675, 2011.

[8] Jahangiri A. and Golneshan A. A., Performance Improvement of Heller Cooling Towers under Crosswind at Different Angles toward Towers Row Direction, *20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2012*, Shiraz University, Shiraz, Iran, 2012.

[9] Schlichting H. and Kestin J., *Boudary-layer theory*. 7th edn. McGraw-Hill, New York, 2000.

www.SID.ir