

## مدلسازی عددی و تحلیل انرژی دود آگزوز به درون برج هلر بر روی عملکرد توربینهای گازی و بخاری یک نیروگاه چرخه ترکیبی در شرایط وزش باد

محمد مهدی یحیی آبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی و مهندسی عباسپور،

دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی و مهندسی عباسپور، دانشگاه شهید

بهشتی، تهران، ایران

علی جهانگیری\*

### 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، به علت از بین رفتن تقارن توزیع فشار در اطراف برج و همچنین ایجاد پدیده درپوشی در بالای برج، دبی ورودی به برج و راندمان برج خنک کن کاهش می یابد که در نتیجه، عملکرد کلی نیروگاه نیز کاهش می یابد. یکی از روش هایی که برای بهبود راندمان برج پیشنهاد شده است، تزریق دود خروجی از دیگ بخار که دمایی حدود ۱۳۰ درجه سلسیوس دارد، بدرون برج در نیروگاه های چرخه ترکیبی می باشد. در مطالعه حاضر از نتایج تحلیل عددی، در حالت های بدون تزریق دود و با تزریق دود تحت شرایط طراحی برج و وزش باد، جهت تحلیل ترمودینامیکی و انرژی اجزای مختلف نیروگاه استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، نشان دهنده افزایش ۱۷/۲MW توان گرمایی برج خنک کن در شرایط وزش باد با سرعت ۲۰m/s تحت تاثیر تزریق دود، نسبت به حالت بدون تزریق دود می باشد که این میزان باعث افزایش راندمان های قانون اول و دوم نیروگاه به میزان به ترتیب % ۰/۹۴ و % ۰/۸۸ می شود. **واژه های کلیدی:** برج خنک کن هلر؛ تزریق دود آگزوز؛ 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.

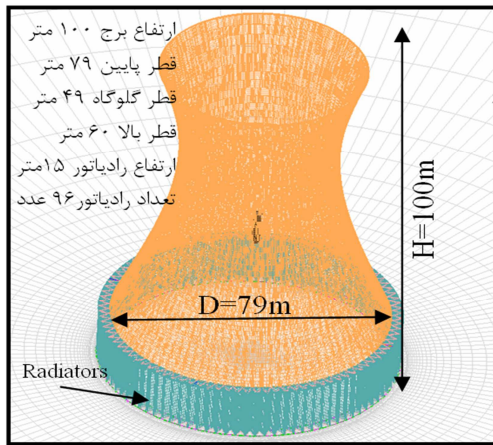
**Keywords:** Heller Type Cooling Tower; Flue Gas Injection; Gas turbine Power; Steam Turbine Power; Combined Cycle.

### ۱- مقدمه

بازیاب نیروگاه چرخه ترکیبی به درون برج می باشد که بر اساس پژوهش ها باعث بهبود شرایط و افزایش دبی هوای ورودی به درون برج نسبت به حالت بدون تزریق دود می شود. لازم به ذکر است که استفاده از این روش دارای معایبی مانند افزایش پس فشار خروجی از توربین های گازی، افت های فشار و دما ناشی از ایجاد کانال مربوط به تزریق دود و سرو صدای ایجاد شده از نازل تزریق دود نیز می باشد که بایستی در کنار بهبود عملکرد برج و تولید توان در توربین بخار مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و نتیجه گیری بر اساس مزایا و معایب پیش گفته 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]؛ شبیه سازی سه بعدی جریان داخل و اطراف یک

استفاده از برج های خنک کننده خشک هلر با توجه به کمبود منابع آبی، رشد چشمگیری یافته است. عملکرد برج های 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 پژوهش های متعدد انجام شده، وزش باد به دلیل برهم زدن تقارن توزیع فشار در اطراف برج و همچنین به دلیل ایجاد پدیده درپوشی در بالای برج، باعث کاهش دبی هوای ورودی به برج و در نتیجه افت عملکرد آن می شود. یکی از روش هایی که اخیراً برای بهبود عملکرد برج در شرایط وزش باد پیشنهاد شده است، استفاده از تزریق دود آگزوز دیگ بخار

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.jahangiri@sbu.ac.ir



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]:

$$Q = h (T_{he} - T_{ai}) \quad (1)$$

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

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

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2)$$

$$(V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \cdot \left( \frac{\sigma}{\rho} \right) - \beta(T - T_a)g + S \quad (3)$$

$$\rho(V \cdot \nabla)T = -\nabla \cdot [GT + G_t] + Q \quad (4)$$

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

$$(V \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(v + v_t / \sigma_k) \nabla k] + P + G - \varepsilon \quad (5)$$

$$(V \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot [(v + v_t / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

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 شکل ۲ نحوه انتخاب آنها مشاهده می‌شود.

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. الدرچ 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 عددی و بررسی تاثیر وزش باد روی عملکرد برج خنک‌کن هلر در دو حالت بدون تزریق دود و با تزریق دود پرداخته و سپس با در نظر گرفتن مزایای این روش که شامل بهبود عملکرد برج و در نتیجه افزایش توان تولیدی چرخه بخار در شرایط وزش باد می‌باشد و همچنین معایب آن شامل کاهش توان تولیدی توربین گاز به دلیل افزایش فشار خروجی توربین گاز در اثر لوله‌کشی و ...، به بررسی ترمودینامیکی و تحلیل انرژی 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 مدل‌سازی می‌شود. 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 آگزوز 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 انرژی 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 استعمال شده از چرخه نیروگاه اقتباس شده است.

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 جدول ۱ 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

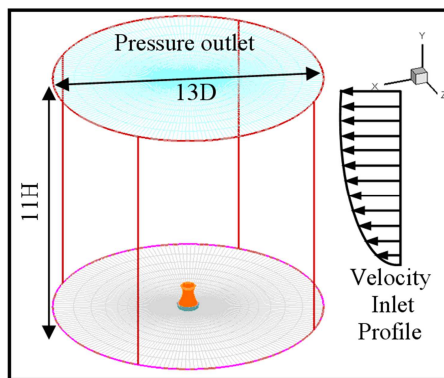
جدول ۲ نتایج بدست آمده از حل عددی را در مقایسه با شرایط طراحی (مقدار اسمی مورد اشاره توسط سازنده در کاتالوگ برج‌خنک‌کن) و مقادیر اندازه‌گیری شده (مقدار واقعی ثبت‌شده در نیروگاه چرخه ترکیبی فارس) برای یک برج خنک‌کن نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از حل عددی با نتایج گزارش شده توسط شرکت سازنده، در شرایط اسمی تطابق خوبی دارد.

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

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

### ۶- نتایج دینامیک سیالات محاسباتی برج هلر

توزیع دود آگزوز به درون برج در شرایط وزش باد می‌تواند منجر به بهبود عملکرد خنک کاری برج شود که در نمودار شکل ۴ تاثیر مثبت توزیع دود در شرایط وزش باد با شرایط بدون توزیع دود مقایسه و مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که این توزیع 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 می‌باشد، 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 توزیع 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



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 به داخل برج وارد شده‌اند) به کار 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.

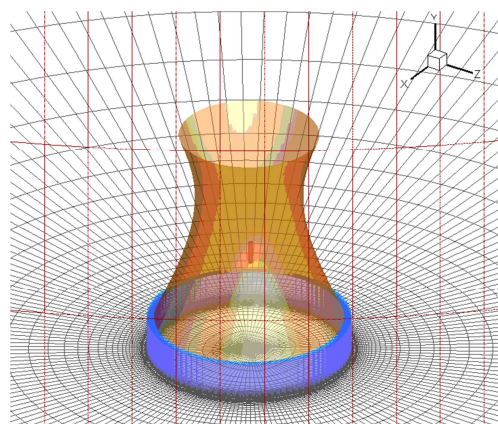
شایان ذکر است که در شرط مرزی رادیاتور که برای مدل کردن مبادله‌کن‌های گرمایی برج بکار می‌رود؛ رادیاتورها به صورت بینهایت نازک در نظر گرفته شده و افت فشار و ضریب انتقال گرمای آنها مطابق روابط زیر، متناسب با دبی هوا در نظر گرفته می‌شود [۴].

$$\Delta P = 2.1 \dot{m}^{1.76} + 0.06 \dot{m}^2 \quad (7)$$

$$h = 1374 \dot{m}^{0.515} \quad (8)$$

### ۴- شبکه‌بندی دامنه حل

جهت بررسی تاثیر وزش باد و توزیع 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 شکل ۳، این شبکه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایی از نحوه شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

همانطور که از شکل ۵ برمی آید 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، درحالی که با تزریق دود داغ، اثر پدیده درپوشی کاهش یافته و دبی هوای عبوری از برج افزایش می یابد.

در حالت مکش طبیعی (بدون وزش باد) به علت تقارن توزیع فشار در اطراف برج و میدان جریان داخل برج، توزیع دما نیز کاملاً متقارن بوده و میزان گرمای دفع شده از تمامی مبادله کن ها یکسان می باشد. 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 مبادله کن های اطراف برج یکسان نخواهد بود؛ به طوری که مبادله کن های جلویی (رو به باد) به علت عبور جریان هوای بیشتر به داخل آنها گرمای بیشتری نسبت به مبادله کن های کناری و عقبی دفع می کنند و در مجموع، گرمای دفع شده از برج نسبت به حالت بدون وزش باد کاهش می یابد 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 به کار میرود را می توان با استفاده از ترکیب قانون اول و دوم ترمودینامیک به صورت موازنه اگزرژی بیان کرد [۹]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_w = & -\frac{d}{dt}(E + P_0V - T_0S) \\ & + \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i(1 - \frac{T_0}{T_i}) + \sum \dot{m}_{in}(h_{in}^t - T_0s_{in}) \\ & - \sum \dot{m}_{out}(h_{out}^t - T_0s_{out}) - T_0\dot{S}_{gen} \end{aligned} \quad (9)$$

هریک از عبارتهای رابطه فوق، بخشی از تحلیل و نوع اگزرژی را تشکیل داده که عبارتند از:

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

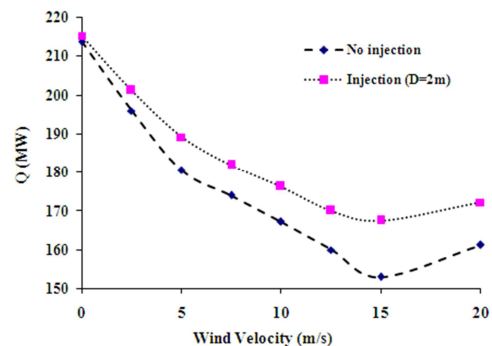
$-\frac{d}{dt}(E + P_0V - T_0S)$ ، بیانگر اگزرژی غیرجریانی ذخیره شده در حجم کنترل است.

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

$\sum \dot{m}_{in}(h_{in}^t - T_0s_{in})$  بیانگر اگزرژی جریان ورودی و  $\sum \dot{m}_{out}(h_{out}^t - T_0s_{out})$  اگزرژی جریان خروجی است.

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

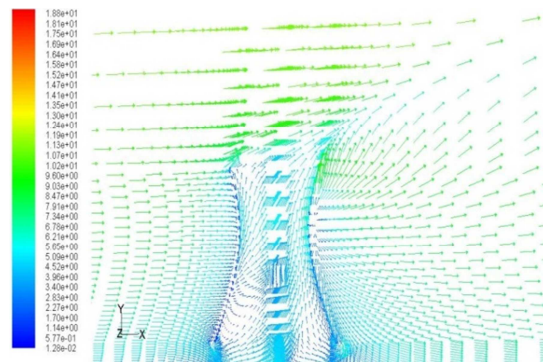
ورودی هوا به درون برج در اثر ایجاد جریان های ثانویه و دور شدن جریان از حالت مکش طبیعی نسبت داد که این دور شدن از حالت مکش طبیعی در شکل ۵ قابل مشاهده است.



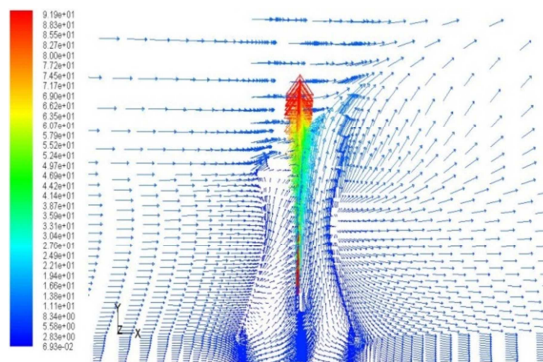
شکل ۴- استفاده از تزریق دود در میزان خنک کاری برج هلر در شرایط وزش باد با سرعت های مختلف

همانطور که قابل پیش بینی است تزریق دود داغ منجر به افزایش مکش هوا به درون برج شده و در نتیجه میزان گرمای دفع شده از برج را بالا می برد.

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



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)



اجزای مختلف چرخه و راندمان‌های قانون اول و دوم نیروگاه در دو حالت بدون تزریق دود و با تزریق دود برای ورزش باد با سرعت‌های مختلف تعیین می‌شود. شکل‌های ۸ تا ۱۰ مقادیر اتلاف انرژی 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 می‌باشد. 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 می‌شود، 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 فشار بالا و در نتیجه افزایش توان تولیدی و راندمان چرخه بخار می‌شود. کاهش توان تولیدی توربین گاز در اثر تزریق دود به درون برج خنک‌کن، برای سرعت‌های بسیار پایین باد، اثر نامطلوبی روی عملکرد کلی نیروگاه دارد، زیرا کاهش توان تولیدی توربین گاز، بیش از افزایش توان توربین بخار می‌باشد، 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، برمی‌آید، با افزایش سرعت ورزش باد به بیش از  $3 \text{ m/s}$ ، تاثیر مثبت تزریق دود روی چرخه بخار بر تاثیر منفی آن روی توربین گاز غالب شده و مجموعاً توان تولیدی را افزایش می‌دهد 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 ورزش 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 انجام می‌شود. بنابراین، با کاهش دبی جرمی، توان تولیدی چرخه بخار کاهش یافته و همچنین میزان تخریب انرژی اجزاء نیز کاهش می‌یابد، زیرا میزان تخریب در هر جزء، به دبی جرمی عبوری از آن جزء نیز بستگی دارد.

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

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

## ۸- شبیه‌سازی ترمودینامیکی چرخه نیروگاه

به منظور بررسی اثر ورزش باد روی عملکرد نیروگاه، ابتدا کلیه اجزای نیروگاه چرخه ترکیبی شامل اجزای واحد توربین گاز و واحد چرخه بخار برایشرايط عملکردی نیروگاه چرخه ترکیبی فارس مدل‌سازی شده 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: پیش‌گرمکن، 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 هله 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.

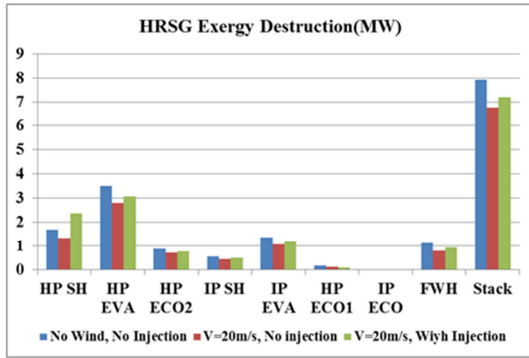
در ادامه برای تمام اجزاء در مسیر چرخه ترکیبی نیروگاه، معادلات انرژی و انرژی به صورت موازنه انرژی و انرژی حل شده است و در ادامه جهت اعتبار سنجی نمونه‌هایی از این نتایج با داده‌های چرخه نیروگاه مقایسه می‌شود.

برای اعتبارسنجی صحت عملکرد کد نوشته شده، شرایط طرح نیروگاه فارس را در برنامه قرار داده 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	
۱۱۶/۲	۹۸/۲	مقادیر واقعی
۱۱۶/۲	۹۵/۶	نتایج مدل‌سازی

همان‌طور که از جدول فوق مشخص است، نتایج مدل‌سازی تا حد زیادی به مقادیر واقعی نزدیک است و اختلاف آنها زیاد نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی به درستی انجام شده و نتایج دست‌آمده برای سایر حالت‌ها نیز معتبر می‌باشند. پس از نوشتن معادلات برای تمام اجزای چرخه و حل آن‌ها، ارتباط بین نقاط مختلف چرخه تعیین شده و مقادیر تخریب انرژی



شکل ۱۰- اتلافات انرژی 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 خنک کن انجام می شود، دبی هوای عبوری از برج نسبت به حالت بدون تزریق دود افزایش یافته و باعث افزایش توان گرمایی آن می شود که اثر آن بر روی چرخه، به صورت افزایش دبی جرمی بخار و در نتیجه افزایش توان تولیدی می باشد.

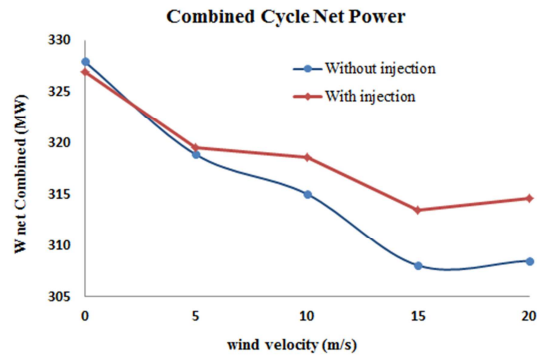
افزایش دبی جرمی، از طرفی باعث افزایش توان تولیدی چرخه بخار و از طرف دیگر افزایش تخریب انرژی می شود، اما مطابق جدول ۴، راندمان قانون اول و دوم برای حالت دارای تزریق دود نسبت به حالت بدون تزریق دود برای سرعت باد یکسان، افزایش می یابد که بیانگر عملکرد بهتر کلی چرخه می باشد.

جدول ۴- راندمان های قانون اول و دوم ترمودینامیک

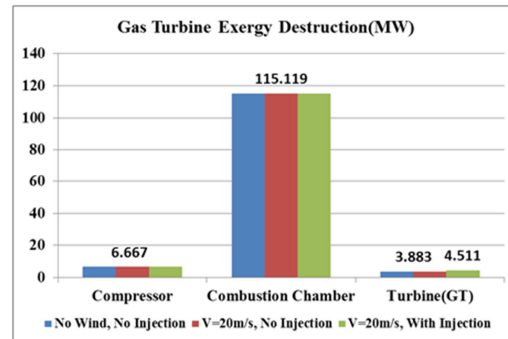
بدون تزریق دود و بدون وزش باد	راندمان قانون اول (%)	چرخه ترکیبی	چرخه بخار	چرخه توربین گاز
		۵۱/۳۶	۳۲/۲۶	۳۳/۵۹
سرعت وزش باد V=20m/s و بدون تزریق دود	راندمان قانون اول (%)	۴۸/۳۲	۲۷/۰۴	۳۳/۵۹
		۴۵/۵۹	۵۴/۸۳	۳۴/۳۴
سرعت وزش باد V=20m/s و با تزریق دود	راندمان قانون اول (%)	۴۹/۲۶	۲۹/۱۷	۳۲/۹۳
		۴۶/۴۷	۵۹/۱۱	۳۳/۷۹

### ۹- جمع بندی و نتیجه گیری

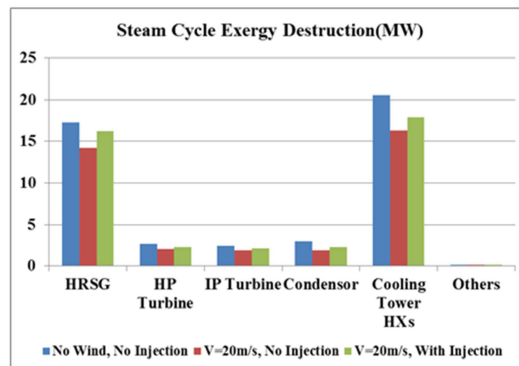
بررسی و قضاوت درباره تاثیر کلی روش تزریق دود بر عملکرد چرخه ترکیبی، باید به صورت برآیند تاثیر منفی روی چرخه توربین گاز و تاثیر مثبت روی چرخه بخار انجام شود. بر اساس نتایج به دست آمده راندمان قانون اول و دوم کلی چرخه ترکیبی در اثر تزریق دود برای سرعت های باد بیش از ۳m/s افزایش می یابد که نشان دهنده کارایی



شکل ۷- توان خالص تولیدی در کل چرخه ترکیبی در شرایط تزریق و عدم تزریق دود آگروز به درون برج هلمر



شکل ۸- اتلافات انرژی 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 انرژی 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

- 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.

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 تزریق شده و نسبت به حالت معمولی که از دودکش نیروگاه خارج می‌شود، در ارتفاع بالاتری تخلیه شده‌است، از مقدار پخش آلایندهایی 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
$\Delta P$	افت فشار

#### علائم یونانی

$\rho$	چگالی
$F_{GI}$	تزریق دود داغ حاصل از احتراق
$noF_{GI}$	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 آگزوز 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