



## کاهش مصرف انرژی در ایستگاه‌های تقویت فشار با کاهش دمای گاز خروجی

علی خواجه مبارکه، امین ذوالفقاری  
تهران، شرکت مشاوران بهسازی نوسازی انرژی (مبنا)  
Email: khajeh@mabnaco.net

واژه‌های کلیدی: خنک‌کاری گاز - ایستگاه تقویت فشار گاز - اقلیم آب و هوایی  
کاهش افت فشار گاز - گاز طبیعی - صرفه‌جویی انرژی

### چکیده

در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز از واحدهای توربوکمپرسور بمنظور افزایش فشار استفاده می‌شود. بمنظور خنک‌کاری گاز در عمده ایستگاه‌های تقویت فشار گاز، از کولرهای هوایی استفاده می‌شود که دلیل اصلی آن در جلوگیری از وارد آمدن آسیب به پوشش خط لوله است. خنک‌کاری گاز خروجی از کمپرسور، سبب کاهش سرعت متوسط گاز طی خط و کاهش افت فشار مسیر می‌گردد که بالطبع کاهش مصرف سوخت را در توربوکمپرسورهای ایستگاه بعدی در پی دارد. عبور گاز از مبدل‌های هوایی سبب افت فشار گاز و خنک‌کاری آن سبب افزایش مصرف برق می‌گردد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که دمای گاز شدیداً متأثر از دمای خاک پیرامون خود است. این امر سبب می‌شود که دمای گاز دریافتی در ایستگاه در طی سال نوسان کمی داشته باشد. با این وجود خنک‌کاری گاز خروجی سبب کاهش متوسط دمای گاز می‌شود که کاهش سرعت و کاهش افت فشار را در پی دارد. در این مقاله تاثیر میزان کاهش افت فشار خط در شرایط متفاوت خنک‌کاری

گاز، با در نظر گرفتن افت فشار ایجاد شده در مبدل و افزایش برق مصرفی الکتروفن‌ها، بر اساس شبیه‌سازی بدست آمده است. در بررسی این موضوع و با در نظر گرفتن شرایط متفاوت آب و هوایی، شبیه‌سازی در مناطق آب و هوایی سرد، گرمسیر و معتدل و برای شرایط عملیاتی مختلف انجام شده است. با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقلیمی نتایج محاسبات نشان می‌دهد که خنک‌کاری گاز در مناطق سردتر و با دبی گاز عبوری بالا از صرفه اقتصادی مناسبی برخوردار است.

### ۱- مقدمه

در خط لوله گاز یکی از پارامترهای موثر بر اقتصاد فرآیند انتقال، توان مورد نیاز کمپرسورها می‌باشد. توان کمپرسورها در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز، توسط توربین‌های گازی تامین می‌شود که به وسیله مقداری از گاز عبوری از خط لوله تغذیه می‌شوند. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که بطور متوسط ۰/۴٪ از گاز عبوری ایستگاه بمصرف داخلی ایستگاه می‌رسد که عمده آن را سوخت مصرفی توربین‌ها شامل می‌-

## هفتمین همایش ملی انرژی

ایستگاه‌های تقلیل فشار موجود در خط بوده که امکان اندازه-گیری دما در آن فراهم بوده است.

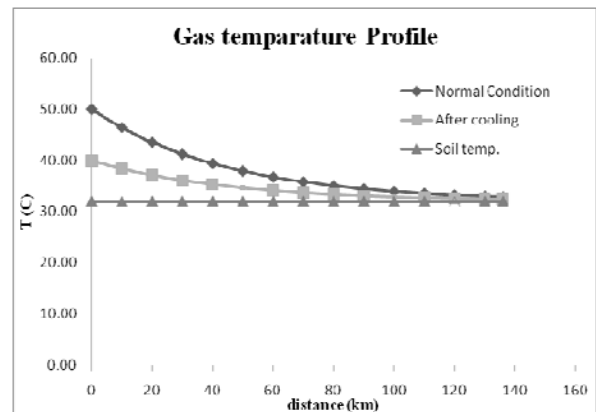
کاهش بیشتر دمای گاز خروجی با کاهش سرعت متوسط، سبب کاهش افت فشار خط، افزایش ظرفیت خط و کاهش میزان مصرف انرژی در ایستگاه مقصد می‌گردد [4]. همچنین افزایش خنک‌کاری مستلزم افزایش مصرف برق در ایستگاه است. به منظور بررسی بیشتر، سه مسیر انتقال گاز در سه منطقه آب و هوایی مختلف به عنوان نمونه انتخاب شد. مسیر خطوط انتقال بین ایستگاه تقویت فشار زنجان-هشتگرد در منطقه ۸ عملیاتی در اقلیم سردسیر، خط انتقال قم-اراک در منطقه ۳ به عنوان اقلیم معتدل و ایستگاه‌های فراشبند-نورآباد در منطقه ۵ عملیات گاز در اقلیم گرمسیر به عنوان ایستگاه‌های نمونه جهت بررسی انتخاب شده است

## ۲- شبیه‌سازی

جهت تعیین دمای بهینه خنک‌کاری میزان کاهش افت فشار خط و کاهش مصرف سوخت توربین‌های گازی و سپس میزان افزایش برق مصرفی الکتروفن‌ها جهت خنک‌کاری بایستی محاسبه شود. جهت این کار مدل‌های هوایی با استفاده از نرم‌افزار Aspen-HTFS شبیه‌سازی شده و بر اساس اندازه‌گیری توان برق مصرفی الکتروفن در شرایط ایستگاه تایید شده‌اند. نمونه شبیه‌سازی مدل‌های هوایی ایستگاه زنجان (نیکپی) در شکل ۱ آورده شده است. سپس با تغییر شرایط میزان توان برق مصرفی و افت فشار ایجاد شده در مدل در هر شرایط عملیاتی و آب و هوایی تعیین شده است. جهت شبیه‌سازی خط لوله و فرآیند انتقال، محیط شبیه‌ساز Hysys انتخاب شده و از معادله حالت SRK استفاده شده است. با استفاده از شبیه‌سازی قطعه‌ای<sup>۱</sup> خط انتقال توسط نرم‌افزار Hysys تاثیر افزایش خنک‌کاری در کاهش افت فشار خط محاسبه شده است. در این شبیه‌سازی تغییرات ارتفاعی و مشخصات خط لوله بر اساس اطلاعات گرفته شده از مناطق عملیاتی به نرم‌افزار وارد شده است. سپس با در اختیار داشتن

شود. کاهش کار کمپرسورها سبب کاهش گاز مصرفی در توربین‌ها خواهد شد.

با توجه به دمای بالای گاز خروجی از کمپرسور، ورود آن به خط سبب آسیب رسیدن به پوشش لوله می‌شود. بنابراین در اکثر ایستگاه‌های تقویت فشار از کولرهای هوایی جهت خنک‌نمودن گاز خروجی استفاده می‌شود. جهت جلوگیری از ایراد آسیب به پوشش معمولاً دمای گاز خروجی بر روی  $50^{\circ}\text{C}$  تنظیم می‌گردد [1]. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که دمای گاز تابع شدیدی از دمای خاک پیرامون است [1]. در نتیجه خنک‌نمودن گاز تنها سبب کاهش متوسط دمای گاز در مسیر شده و تاثیری در دمای گاز دریافتی ایستگاه بعدی نخواهد داشت [2] [3]. لیکن کاهش دمای گاز خروجی با کاهش متوسط دمای گاز در طی مسیر سبب کاهش سرعت متوسط و کاهش افت فشار خط می‌گردد. نمونه محاسبات بر اساس نتایج شبیه‌سازی Hysys برای خط بین ایستگاه‌های فراشبند و نورآباد در نمودار ۱ نشان داده شده است. به علت میل نمودن دمای گاز به دمای خاک پیرامون، دمای گاز دریافتی در ایستگاه پایین‌دست تغییر نمی‌نماید، لیکن متوسط دمای گاز در مسیر کاهش می‌یابد که منجر به کاهش افت فشار خط می‌گردد.



نمودار ۱- کاهش متوسط دمای گاز در مسیر خط فراشبند نورآباد

بر اثر خنک‌کاری

جهت اطمینان بخشی نتایج شبیه‌سازی، دمای خط در چندین نقطه بین راهی اندازه‌گیری شده است. این نقاط عمدتاً شامل

<sup>۱</sup> Segmental

## هفتمین همایش ملی انرژی

جدول ۱- شرایط طراحی ایستگاه در اقلیم سردسیر

۶۰	دبی گاز عبوری (MMSCMD)
۱۰۵۰	فشار خروجی از ایستگاه بالادست (psi)
۷۰۳	فشار ورودی به ایستگاه پایین‌دست (psi)
۵۲	دمای خروجی از ایستگاه بالادست (°C)
۲۴	دمای ورودی به ایستگاه پایین‌دست (°C)

با توجه به آنچه که قبلاً هم اشاره شد، کاهش افت فشار حاصل از مقادیر متفاوت خنک‌کاری، شبیه‌سازی شده و نتایج آن مطابق با جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۲- کاهش افت فشار خط بر اثر خنک‌کاری

در ایستگاه سردسیر در دبی گاز MMSCMD ۶۰

میزان خنک‌کاری گاز				پارامتر
۲۵ °C	۱۹ °C	۱۵ °C	۱۰ °C	
۱۰/۶۱	۷/۴	۵/۲۹	۲/۶۴	کاهش افت فشار (psi)

با افزایش خنک‌کاری گاز در ایستگاه بالادست، فشار مکش ایستگاه پایین‌دست افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش فشار مکش در این ایستگاه، در بالاترین میزان خنک‌کاری یعنی ۲۵ °C و به مقدار ۱۰/۶ psi دیده می‌شود.

#### • ایستگاه تقویت فشار در اقلیم معتدل

اندازه‌گیری‌های اقلیم معتدل در ایستگاه‌های تقویت فشار قم (نیزار) و اراک واقع در منطقه ۳ عملیات انتقال گاز ایران انجام گرفت. تاسیسات تقویت فشار قم بر روی خطوط اصلی انتقال گاز ۱، ۲ و ۳ (IGAT I,II,III) واقع شده است. ایستگاه تقویت فشار اراک نیز اولین ایستگاهی است که بر روی خطوط "۳۰" و "۳۶" غرب کشور قرار دارد. بررسی شرایط طراحی در اقلیم معتدل و شرایط شبیه‌سازی مطابق با جدول شماره ۳ می‌باشد.

با توجه به اطلاعات جدول شماره ۳، شبیه‌سازی در ایستگاه مذکور و با وارد کردن پارامترهای فوق صورت پذیرفت و نتایج حاصل از کاهش میزان افت فشار به ازای خنک‌کاری در طول خط لوله، مطابق با جدول شماره ۴ آورده شده است.

اطلاعات و شرایط آب و هوایی منطقه، نوع و جنس خاک در طول مسیر و در نهایت مشخصات گاز تاثیر عوامل مختلف بر روی دما و فشار گاز در هر قطعه از خط لوله مورد ارزیابی واقع شده و تاثیر خنک‌کاری گاز در شرایط مختلف آب و هوایی و عملیاتی بر کاهش افت فشار خط بدست آمد. در شبیه‌سازی میزان برداشت و تزریق گاز به خط انتقال در مسیر بین دو ایستگاه بر اساس اطلاعات دریافتی از دیسپاچر لحاظ شده است. همچنین نتیجه افت فشار مبدل نیز در شبیه‌سازی استفاده شده است. با تعیین میزان کاهش افت فشار میزان کاهش در سوخت مصرفی توربین‌های گاز با اندازه‌گیری راندمان حرارتی توربین‌ها در زمان اندازه‌گیری بدست آمده است.

اطلاعات قطعه‌ای خط لوله برای خط قم- اراک و نتایج اندازه‌گیری تغییرات آب و هوایی در ایستگاه هشتگرد در اشکال ۲ و ۳ و نمونه شبیه‌سازی خط انتقال در شکل ۴ نشان داده شده است. نتیجه شبیه‌سازی مشخص کننده میزان کاهش در گاز مصرفی و افزایش در برق مصرفی سیستم خنک‌کاری می‌باشد. مجموع این نتایج مشخص‌کننده میزان سوددهی فرآیند خنک‌کاری بوده و با تغییر شرایط و تکرار محاسبات می‌توان به مقدار بهینه خنک‌کاری دست یافت. با توجه به تغییرات در شرایط هر ایستگاه، محاسبات برای هر ایستگاه در شرایط مختلف آب و هوایی طی سال و برای شرایط عملیاتی مختلف صورت گرفته است.

#### • ایستگاه تقویت فشار در اقلیم سردسیر

در منطقه ۸ عملیات انتقال گاز ایستگاه‌های نیکپی (به عنوان ایستگاه مبدا) و ایستگاه هشتگرد (به عنوان ایستگاه مقصد) جهت اندازه‌گیری در نظر گرفته شدند. این دو ایستگاه بر روی خط ۴۸ اینچ دوم آذربایجان که به خط صادرات نیز معروف است واقع شده‌اند. شرایط طراحی ایستگاه تقویت فشار، برای بررسی شرایط خنک‌کاری در اقلیم سردسیر، برای مسیر انتقال گاز بین دو ایستگاه تقویت فشار مطابق با جدول شماره ۱ آورده شده است.

### هفتمین همایش ملی انرژی

جدول ۶- نتایج حاصل کاهش افت فشار بر اثر خنک کاری

در ایستگاه اقلیم گرمسیر با دبی گاز ۷۰ MMSCMD

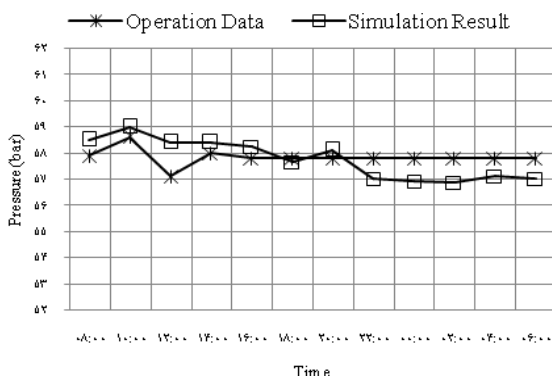
میزان خنک کاری گاز				پارامتر
۲۵ °C	۲۰ °C	۱۵ °C	۱۰ °C	
۹/۸	۷/۲	۴/۸	۲/۵	کاهش افت فشار (psi)

بیشترین میزان افزایش فشار مکش در این ایستگاه، در بالاترین دبی عبوری و حداکثر خنک کاری یعنی ۲۵ °C و به مقدار ۹/۸ psi دیده می شود.

دلیل اصلی تغییرات در کاهش افت فشار خط، در دبی عبوری از ایستگاه است. دبی عبوری مشخص کننده سرعت گاز می باشد. از آنجا که خنک کاری گاز سبب کاهش سرعت شده و افت فشار اصطکاکی نیز تابع شدیدی از سرعت گاز عبور است، تاثیر خنک کاری با افزایش دبی بسیار محسوس تر است [5].

### ۳- اعتبار نتایج

مقایسه داده‌ها و اطلاعات دریافتی از ایستگاه‌های تقویت فشار و نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام گرفته حاکی از آن است که میزان خطای شبیه سازی نسبت به مقادیر واقعی انحراف بسیار کمی داشته و در محدوده قابل قبولی قرار دارد. همانطور که در نمودار شماره ۲ مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی فشار مکش ایستگاه اقلیم سردسیر با اطلاعات عملیاتی همان ایستگاه در طول ۲۴ ساعت مقایسه شده است.



نمودار ۲- مقایسه نتایج فشار مکش ایستگاه اقلیم سردسیر در دو حالت شبیه سازی و عملیاتی

جدول ۳- شرایط طراحی ایستگاه در اقلیم معتدل

۳۲	دبی گاز عبوری (MMSCMD)
۱۰۵۰	فشار خروجی از ایستگاه بالادست (psi)
۷۵۰	فشار ورودی به ایستگاه پایین دست (psi)
۶۲	دمای خروجی از ایستگاه بالادست (°C)
۲۰	دمای ورودی به ایستگاه پایین دست (°C)

جدول ۴- کاهش افت فشار خط بر اثر خنک کاری

در ایستگاه اقلیم معتدل با دبی گاز ۳۲ MMSCMD

میزان خنک کاری گاز				پارامتر
۲۵ °C	۲۰ °C	۱۵ °C	۱۰ °C	
۳/۱	۲/۳۲	۱/۵۵	۰/۷۸	کاهش افت فشار (psi)

با توجه به جدول ۴- بیشترین میزان افزایش فشار مکش در این ایستگاه، در بالاترین میزان خنک کاری یعنی ۲۵ °C و به مقدار ۳/۱ psi دیده می شود.

### • ایستگاه تقویت فشار در اقلیم گرمسیر

ایستگاه‌های تقویت فشار مورد بررسی به عنوان اقلیم گرمسیر، تاسیسات تقویت فشار فرآشبنده و نورآباد می باشند. این تاسیسات در منطقه ۵ عملیات انتقال گاز واقع شده اند. منطقه ۵ عملیات انتقال گاز کشور با دارا بودن حدود ۳۵۰۰ کیلومتر خط لوله در اقطار ۴ الی ۵۶ اینچ و ظرفیت انتقال گاز روزانه بیش از ۲۸۰ MMSCMD یکی از مناطق استراتژیک و مهم در حوزه عملیات انتقال گاز کشور محسوب می شود. شرایط عملیاتی ایستگاه فرآشبنده مطابق با جدول شماره ۵ می باشد.

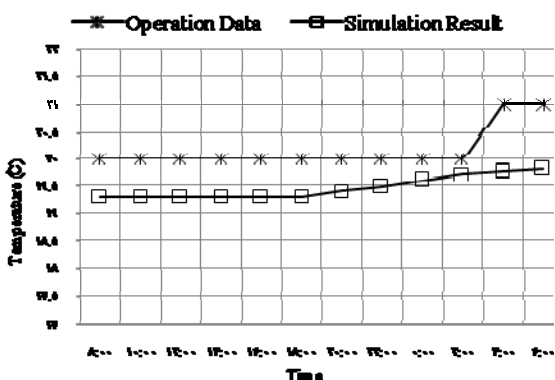
جدول ۵- شرایط طراحی ایستگاه در اقلیم گرمسیر

۷۰	دبی گاز عبوری (MMSCMD)
۱۰۲۰	فشار خروجی از ایستگاه بالادست (psi)
۷۰۰	فشار ورودی به ایستگاه پایین دست (psi)
۵۸	دمای خروجی از ایستگاه بالادست (°C)
۳۲	دمای ورودی به ایستگاه پایین دست (°C)

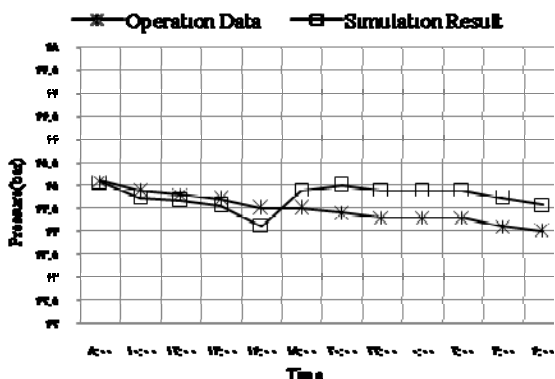
جدول شماره ۶ نشان می دهد که در اقلیم گرمسیر تا چه اندازه می توان با خنک کاری گاز از روند افت فشار کاست.

### هفتمین همایش ملی انرژی

مقایسه روند تغییرات دمای مکش ایستگاه معتدل در حالت شبیه‌سازی نسبت به حالت واقعی نیز در نمودار شماره ۳ آورده شده است. میانگین درصد خطای دمای شبیه‌سازی نسبت به حالت عملیاتی برابر ۳/۴٪ برآورد شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی فشار و دمای مکش در ایستگاه اقلیم گرمسیر با مقادیر واقعی به ترتیب در نمودارهای شماره ۶ و ۷ آورده شده است.



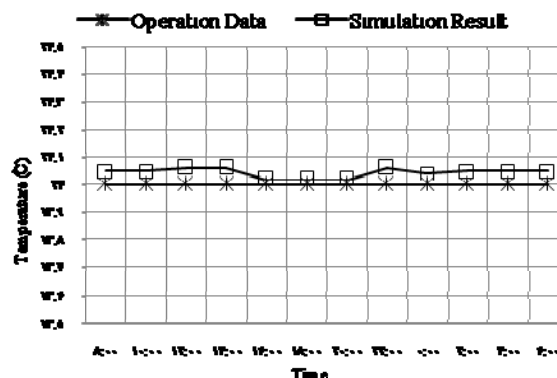
نمودار ۵- مقایسه نتایج دمای مکش ایستگاه معتدل در دو حالت شبیه‌سازی و عملیاتی



نمودار ۶- مقایسه نتایج فشار مکش ایستگاه اقلیم گرمسیر در دو حالت شبیه‌سازی و عملیاتی

با توجه به نمودار شماره ۶، در ایستگاه پایین دست اقلیم گرمسیر، اختلاف فشار مکشی با میانگین درصد خطای حدود ۰/۸۱٪ در شبیه‌سازی نسبت به حالت واقعی وجود دارد. بررسی تغییرات دمای مکش ایستگاه اقلیم گرمسیر در حالت شبیه‌سازی نسبت به حالت واقعی، میانگین درصد خطایی

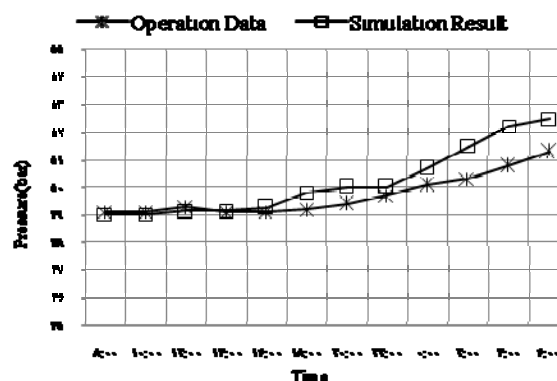
با توجه به نمودار ۲، فشار مکش در ایستگاه پایین دست اقلیم سردسیر اختلاف بسیار کمی با مقادیر واقعی دارد؛ بطوریکه میانگین درصد خطای فشار مکش در شبیه‌سازی نسبت به حالت واقعی ۱/۰۲٪ می‌باشد.



نمودار ۳- مقایسه نتایج دمای مکش ایستگاه اقلیم سردسیر در دو حالت شبیه‌سازی و عملیاتی

بررسی تغییرات دمای مکش ایستگاه اقلیم سردسیر در حالت شبیه‌سازی نسبت به حالت واقعی نیز در نمودار شماره ۳ آورده شده است. میانگین درصد خطای دمای شبیه‌سازی برابر ۱/۱۷۸٪ بدست آمده است.

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در اقلیم معتدل نیز در نمودارهای شماره ۴ و ۵ نمایش داده شده است. در نمودار شماره ۴ مشاهده می‌شود که فشار مکش در ایستگاه پایین دست اقلیم معتدل، اختلاف کمی با مقادیر واقعی دارد؛ بطوریکه میانگین درصد خطای فشار مکش در شبیه‌سازی نسبت به حالت واقعی ۱/۱٪ می‌باشد.



نمودار ۴- مقایسه نتایج فشار مکش ایستگاه اقلیم معتدل در دو حالت شبیه‌سازی و عملیاتی

## هفتمین همایش ملی انرژی

۹. با وجودیکه راندمان توربین گازی تا حدی متاثر از شرایط آب و هوایی می‌باشد، در محاسبات میزان گاز صرفه‌جویی شده در ایستگاه پایین‌دست بترتیب برای اقلیم‌های سردسیر، معتدل و گرمسیر، راندمان حرارتی متوسط توربین معادل ۲۴/۶٪، ۲۵/۲٪ و ۲۶/۳٪ در نظر گرفته شده است. نرخ حامل-های انرژی براساس قبوض صادره برای ایستگاه معادل ۶۹۰ Rial/m<sup>3</sup> برای گاز طبیعی و ۶۴۲ Rial/kWh برای برق مصرفی در نظر گرفته شده است. همچنین در محاسبات انجام شده جهت بدست آوردن میزان گاز سوخت صرفه‌جویی شده در سال با توجه به ترکیب گاز، ارزش حرارتی گاز سوخت معادل ۳۳۲۲۶ kJ/m<sup>3</sup> در نظر گرفته شده است. جداول شماره ۱۰ الی ۱۲ به ترتیب نتایج برآورد اقتصادی در ایستگاه اقلیم-های سردسیر، معتدل و گرمسیر را نشان می‌دهد. در ستون اول میزان هزینه لازم جهت برق مصرفی الکترونی‌ها آورده شده و در ادامه مقدار سود خالص ناشی از خنک‌کاری بصورت تفاوت هزینه برق مصرفی و سود ناشی از صرفه-جویی در گاز مصرفی محاسبه شده است.

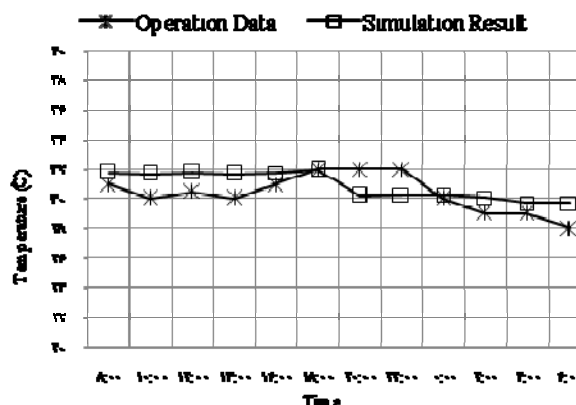
جدول ۷- نتایج آنالیز گازهای احتراقی خروجی از دودکش توربین ایستگاه پایین‌دست اقلیم سردسیر

پارامتر اندازه‌گیری شده	واحد	مقدار
دمای گاز خروجی	°C	۴۲۰/۸
O <sub>2</sub>	%	۱۷/۳
CO	ppm	۹۹۸
CO <sub>2</sub>	%	۲/۱
راندمان حرارتی	%	۲۴/۶

جدول ۸- نتایج آنالیز گازهای احتراقی خروجی از دودکش توربین ایستگاه پایین‌دست اقلیم معتدل

پارامتر اندازه‌گیری شده	واحد	مقدار
دمای گاز خروجی	°C	۴۳۰
O <sub>2</sub>	%	۱۵/۹
CO	ppm	۹۱
CO <sub>2</sub>	%	۳
راندمان حرارتی	%	۲۵/۲

معادل ۳/۶٪ را نشان می‌دهد. روند این تغییرات در نمودار شماره ۷ قابل مشاهده است. همانطور که از نمودارها بدست می‌آید میزان خطای شبیه‌سازی در حد قابل قبول بوده و همین مقدار موجود نیز بیشتر ناشی از خطای ثبت اطلاعات و یا خطای اندازه‌گیری می‌باشد.



نمودار ۷- مقایسه نتایج دمای مکش ایستگاه اقلیم گرمسیر در دو حالت شبیه‌سازی و عملیاتی

## ۴- محاسبات

با توجه به اطلاعات موجود ایستگاه‌ها در اقلیم‌های مختلف، محاسبات بر اساس تغییرات دبی گاز انجام شده است. در حالت کلی روند محاسبات اقتصادی به این صورت است که در دامنه‌های مختلف خنک‌کاری گاز توسط سیستم خنک-کننده، میزان افت فشار ایجاد شده توسط کولرها در نرم‌افزار Aspen محاسبه می‌گردد. سپس با توجه به اندازه‌گیری صورت گرفته و شبیه‌سازی سیستم خنک‌کننده ایستگاه‌ها، توان برق مصرفی به عنوان هزینه تحمیل شده مورد محاسبه قرار می‌گیرد. از آنجایی که افزایش میزان خنک‌کاری، کاهش افت فشار گاز در طول مسیر خط لوله را در پی خواهد داشت، میزان کاهش افت فشار خط با شبیه‌سازی خط انتقال محاسبه شده و با توجه به راندمان کاری توربین‌های گازی، میزان صرفه‌جویی در گاز مصرفی توربین‌ها بدست می‌آید. راندمان توربین‌های گازی در ایستگاه‌های مختلف در جداول ۷ الی ۹ آورده شده است. با توجه به نتایج جداول شماره ۷ تا

## هفتمین همایش ملی انرژی

جدول ۹- نتایج آنالیز گازهای احتراقی خروجی از دودکش توربین ایستگاه پایین دست اقلیم گرمسیر

پارامتر اندازه گیری شده	واحد	مقدار
دمای گاز خروجی	°C	۳۵۶
O <sub>2</sub>	%	۱۶/۱
CO	ppm	۶۰/۲
CO <sub>2</sub>	%	۲/۶۵
راندمان حرارتی	%	۲۶/۳

افزایش میزان برق مصرفی در ایستگاه بالادست می شود. محل تلاقی دو خط سود حاصل از صرفه جویی و هزینه برق مصرفی محلی است که سود و هزینه یکدیگر را پوشش داده و از آن به بعد سوددهی فرآیند آغاز می گردد. دبی گاز، پارامتر دیگری است که در میزان توان برق مصرفی و مصرف گاز سوخت ایستگاه تاثیر عمده ای دارد.

برای بررسی بهتر با تغییر در دبی گاز در هر سه ایستگاه محاسبات مجددا صورت گرفته است. نتایج این بررسی ها برای ایستگاه اقلیم سردسیر مطابق با نمودار شماره ۷ آورده شده است. با توجه به نمودار ۷، در اقلیم سردسیر خنک کاری در تمامی بازه های انجام شده تا قبل از دبی حدود ۵۲ MMSCMD دارای مقادیر منفی برای میزان صرفه جویی اقتصادی می باشد. این بدان معنی است که خنک کاری گاز در بازه ۱۰°C الی ۲۵°C به علت بالاتر بودن مقدار هزینه برق مصرفی نسبت به گاز سوخت صرفه جویی شده، دارای توجیه اقتصادی نمی باشد. با افزایش دبی تا مقادیر ۵۴ MMSCMD و ۶۰ MMSCMD (یعنی دبی طراحی ایستگاه) به ازای افزایش خنک کاری در بازه های ۱۰°C الی ۲۵°C مشاهده می شود که مقادیر صرفه جویی اقتصادی از مقادیر منفی به سمت مقادیر مثبت حرکت می کند. صرفه جویی اقتصادی در بیشترین حالت به مقدار ۱۹۹۷ Million Rial/year به ازای دبی ۶۰ MMSCMD و ۲۵°C خنک کاری می رسد.

همان طور که پیش تر نیز به آن اشاره شد، نمودار محاسبات اقتصادی بر اساس روند افزایش دبی گاز نشان داده شد تا علاوه بر تاثیر افزایش خنک کاری تاثیر افزایش دبی گاز نیز دیده شود. نمودار شماره ۹ تاثیر افزایش دبی در دبی گاز متفاوت ایستگاه اقلیم معتدل را نشان می دهد. با توجه به نمودار ۹ خنک کاری در تمامی بازه های انجام شده تا قبل از دبی حدود ۳۲ MMSCMD دارای مقادیر منفی برای میزان صرفه جویی اقتصادی می باشد. این بدان معنی است که خنک کاری گاز در بازه خنک کاری ۱۰°C الی ۲۵°C به علت بالاتر بودن مقدار هزینه برق مصرفی نسبت به گاز سوخت صرفه جویی شده، دارای توجیه اقتصادی نمی باشد. با افزایش دبی تا

جدول شماره ۱۰ نشان می دهد که با افزایش روند خنک کاری گاز، هر چند هزینه برق مصرفی فن در ایستگاه افزایش می یابد اما روند افزایش صرفه جویی در مصرف گاز از رشد بیشتری برخوردار است. اما با توجه به جدول، با حرکت به سمت فصول معتدل و گرم، هزینه برق مصرفی جهت رسیدن به میزان خنک کاری مورد نظر افزایش یافته تا جاییکه از محدوده عملیاتی سیستم خنک کننده ایستگاه خارج می گردد. جدول شماره ۱۱ محاسبات اقتصادی در ایستگاه اقلیم معتدل را نشان می دهد. با توجه به جدول شماره ۱۱، مشاهده می شود که به ازای هر میزان خنک کاری در فصول مختلف هزینه برق مصرفی همواره از ارزش صرفه جویی گاز بیشتر خواهد بود. جدول شماره ۱۲ نیز به بررسی روند اقتصادی محاسبات در ایستگاه تقویت فشار اقلیم گرمسیر می پردازد. با توجه به جدول شماره ۱۲ در فصل سرد، در هر میزان خنک کاری، هزینه برق مصرفی از ارزش صرفه جویی گاز کمتر است. همچنین با بررسی فصل معتدل در جدول مذکور مشاهده می شود که به ازای خنک کاری به میزان ۱۰°C و ۲۵°C هزینه برق مصرفی از ارزش صرفه جویی گاز بیشتر است. این در حالی است که در خنک کاری به میزان ۱۵°C و ۱۰°C ارزش صرفه جویی گاز از هزینه برق بالاتر است. در فصل گرم نیز هزینه های برق مصرفی رشد چشمگیری را از خود نشان می دهند؛ تا جایی که به علت محدودیت خنک کاری گاز توسط سیستم خنک کننده ایستگاه، خنک کاری به میزان ۲۰°C و ۲۵°C امکان پذیر نمی باشد. با توجه به آنچه که در جداول ۱۰ تا ۱۲ به آنها اشاره شد، افزایش میزان خنک کاری باعث افزایش میزان صرفه جویی در گاز سوخت مصرفی در ایستگاه پایین دست و

### هفتمین همایش ملی انرژی

میزان خنک‌کاری، بشکل یک تابع نمایی خود را نشان می‌دهد. از طرفی افزایش صرفه‌جویی در توان کمپرسور به صورت کاملاً خطی افزایش می‌یابد. بررسی محاسبات اقتصادی در ایستگاه گرمسیر نیز روندی مشابه ایستگاه‌های مورد بحث در دو اقلیم دیگر دارد. با توجه به نمودار ۱۰، در اقلیم گرمسیر خنک‌کاری در تمامی بازه‌های انجام شده در دبی MMSCMD ۵۰ دارای مقادیر منفی برای میزان صرفه‌جویی اقتصادی بوده و دارای توجیه اقتصادی نمی‌باشد.

مقادیر MMSCMD ۳۵ به ازای افزایش خنک‌کاری در بازه‌های ۱۵ °C الی ۲۵ °C مشاهده می‌شود که مقادیر صرفه‌جویی اقتصادی از مقادیر منفی به سمت مقادیر مثبت حرکت می‌کند. صرفه‌جویی اقتصادی در بیشترین مقدار خود به Million Rial/year ۵۴۴ به ازای دبی MMSCMD ۳۵ و ۲۵ °C خنک‌کاری می‌رسد. جهت افزایش خنک‌کاری در حالی که بازه‌های دمایی جهت خنک‌کاری تقریباً یکسان بوده و به میزان ۵ °C نسبت به حالت قبل افزایش می‌یابد، افزایش برق مصرفی به صورت تصاعدی زیاد شده و نمودار مصرف برق با افزایش

جدول ۱۰- بررسی اقتصادی خنک‌کاری گاز خروجی در ایستگاه‌های اقلیم سردسیر در فصول مختلف سال بر اساس دبی MMSCMD ۶۰

فصل گرم		فصل معتدل		فصل سرد		میزان خنک‌کاری
ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	
-۴۱۵۸	۵۴۳۵	-۵۶	۱۳۳۴	+۴۷۰	۸۰۸	۱۰ °C
*	*	+۷۶/۵	۲۴۷۸	+۱۲۰۰	۱۳۵۵	۱۵ °C
*	*	-۱۳۷۸	۳۹۳۳	+۱۶۵۶	۱۹۱۴	۲۰ °C
*	*	*	*	+۱۹۹۷	۳۰۷۹	۲۵ °C

\*: امکان خنک‌کاری به علت محدودیت سیستم خنک‌کننده و یا عوامل محیطی در این شرایط وجود ندارد

جدول ۱۱- بررسی اقتصادی خنک‌کاری گاز خروجی در ایستگاه‌های اقلیم معتدل در فصول مختلف سال بر اساس دبی MMSCMD ۳۰

فصل گرم		فصل معتدل		فصل سرد		میزان خنک‌کاری
ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	
-۴۹۵	۶۶۶	-۲۴۳	۴۱۴	-۱۵۱/۵	۳۲۳	۱۰ °C
-۷۷۲	۱۱۱۶	-۳۰۷	۶۵۱	-۱۵۳	۴۹۷	۱۵ °C
*	*	-۴۰۷	۹۲۸	-۱۶۹	۶۹۰	۲۰ °C
*	*	*	*	-۲۱۳	۹۱۰	۲۵ °C

جدول ۱۲- بررسی اقتصادی خنک‌کاری گاز خروجی در ایستگاه‌های اقلیم گرمسیر در فصول مختلف سال بر اساس دبی MMSCMD ۷۰

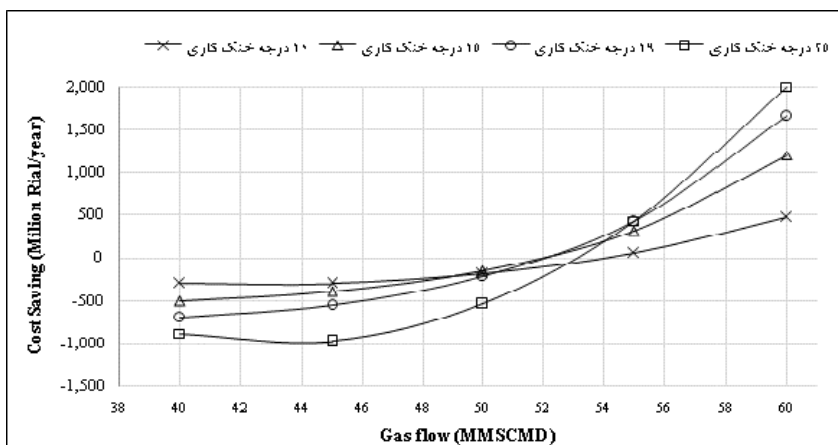
فصل گرم		فصل معتدل		فصل سرد		میزان خنک‌کاری
ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	ارزش سالیانه صرفه‌جویی کل (میلیون ریال)	هزینه سالیانه برق مصرفی (میلیون ریال)	
-۹۳۰	۲۴۲۵	-۵۶۷	۱۵۱۰	+۱۵/۵	۹۲۸	۱۰ °C
-۵۸۱	۴۵۰۴	-۱۷	۲۴۷۷	+۱۰۲۶	۱۴۳۴	۱۵ °C
*	*	+۲۷۳	۳۸۲۵	+۲۰۸۹	۲۰۰۹	۲۰ °C
*	*	-۵۷۸	۶۰۵۶	+۲۶۸۲	۳۰۳۸	۲۵ °C



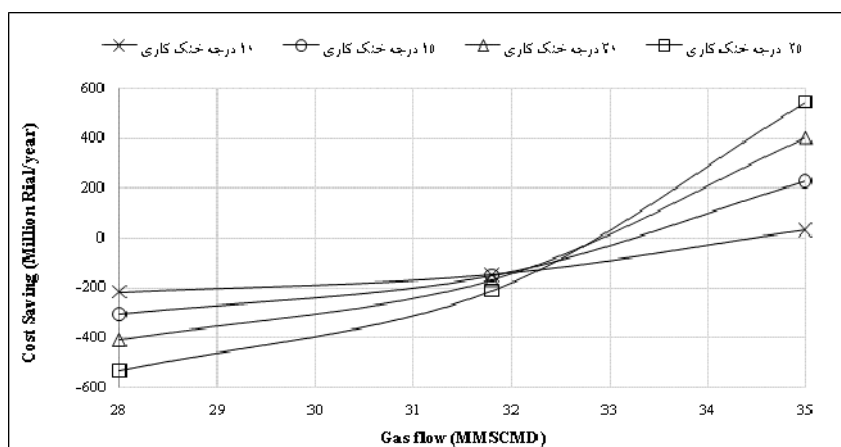
### هفتمین همایش ملی انرژی

به بالاترین میزان خود در بازه‌های  $15^{\circ}\text{C}$  الی  $25^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. صرفه‌جویی اقتصادی در بیشترین حالت به مقدار Million  $2682 \text{ Rial/year}$  به ازای دبی  $70 \text{ MMSCMD}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  خنک‌کاری می‌رسد.

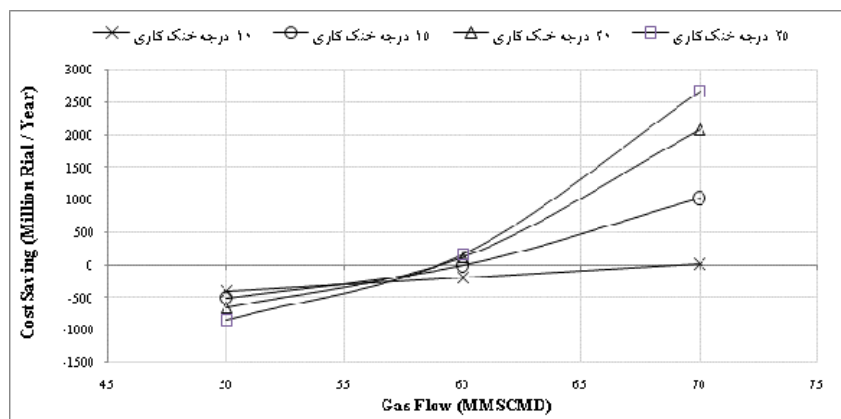
با افزایش دبی تا مقدار  $60 \text{ MMSCMD}$ ، به ازای افزایش خنک‌کاری در بازه‌های  $15^{\circ}\text{C}$  الی  $25^{\circ}\text{C}$  مشاهده می‌شود که مقادیر صرفه‌جویی اقتصادی از مقادیر منفی به سمت مقادیر مثبت حرکت می‌کند. همانگونه که در نمودار نیز مشخص است، مقادیر صرفه‌جویی اقتصادی در دبی  $70 \text{ MMSCMD}$



نمودار ۸- نمودار مقایسه برآورد اقتصادی عملیات خنک‌کاری گاز در دبی‌های مختلف ایستگاه اقلیم سردسی



نمودار ۹- نمودار مقایسه برآورد اقتصادی عملیات خنک‌کاری گاز در دبی‌های مختلف ایستگاه اقلیم معتدل



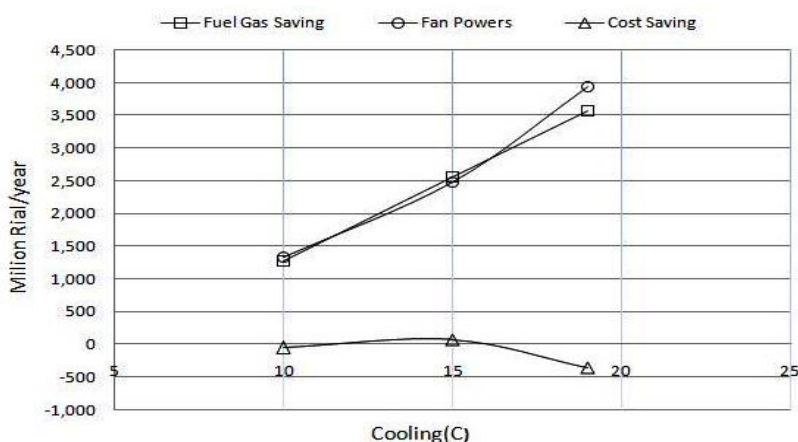
نمودار ۱۰- نمودار مقایسه برآورد اقتصادی عملیات خنک‌کاری گاز در دبی‌های مختلف ایستگاه اقلیم گرم‌سیر

## هفتمین همایش ملی انرژی

## ۵- نتیجه‌گیری

با بررسی و مقایسه جداول و نمودارهای ارزیابی اقتصادی ارائه شده در هر اقلیم می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی، فرآیند خنک‌کاری در فصول سرد سال در اقلیم متفاوت از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار است. علت این امر نیز کاهش چشمگیر توان برق مصرفی سیستم خنک‌کننده به ازای میزان خنک‌کاری مد نظر می‌باشد، زیرا با کاهش دمای هوا میزان حجم هوایی که می‌بایست توسط الکتروفن‌ها جهت خنک‌کاری گاز جابجا شود، کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج بدست آمده می‌توان به تاثیر افزایش دبی گاز عبوری از ایستگاه بر میزان صرفه‌جویی انرژی اشاره کرد. محاسبات نشان می‌دهند که در دبی‌های بالای گاز عبوری از ایستگاه، عملیات خنک‌کاری گاز تاثیر بیشتری را در افزایش ارزش صرفه‌جویی سالانه انرژی از خود نشان می‌دهند. علت این امر را می‌توان رابطه مستقیم دبی با سرعت گاز در خط لوله دانست. از آنجاکه افت فشار اصطکاکی گاز تابع سرعت گاز است، افزایش دبی سبب افزایش افت فشار اصطکاکی شده و در دبی‌های بالا خنک‌کاری گاز با کاهش سرعت تاثیر بیشتری بر کاهش افت فشار اصطکاکی خواهد گذاشت [5]. نکته دیگری که در این میان حائز اهمیت است این است که افزایش میزان خنک‌کاری لزوماً منجر به افزایش میزان صرفه‌جویی انرژی نمی‌شود؛ چرا که با افزایش میزان خنک‌کاری به علت افزایش نمایی هزینه برق مصرفی، سود حاصل از عملیات خنک‌کاری کاهش یافته و به سمت مقادیر منفی سوق

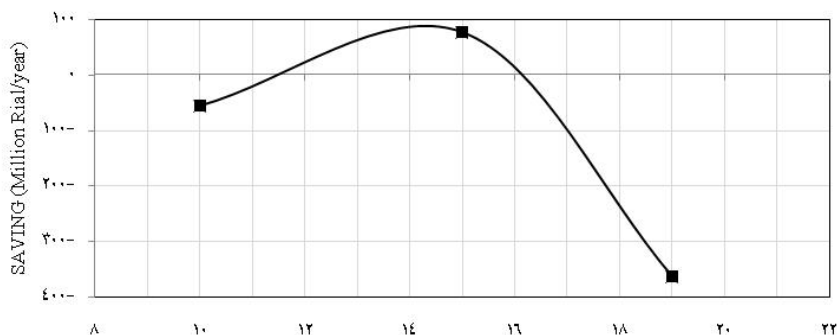
پیدا می‌کند که گویای این نکته است که مقدار خنک‌کاری یک میزان بهینه داشته و نمی‌توان بصورت کلی افزایش خنک‌کاری را معادل صرفه اقتصادی بیشتر دانست. نمونه محاسبات انجام‌شده در مورد اقلیم سردسیر در نمودار ۱۱ آورده شده است. در این نمودار روند تغییر در افزایش هزینه ناشی از برق مصرفی کولرها و کاهش هزینه گاز مصرفی در توربین‌های گاز ناشی از کاهش افت فشار خط با افزایش میزان خنک‌کاری نشان داده شده و خالص هزینه صرفه‌جویی بصورت تفاوت این دو مقدار نمایش داده شده است. نتیجه این نمودار در نمودار شماره ۱۲ بطور کامل نمایش داده شده است. همانطور که از این نمودار برمی‌آید افزایش خنک‌کاری از  $10^{\circ}\text{C}$  به  $15^{\circ}\text{C}$  سبب افزایش صرفه‌جویی مالی می‌شود، لیکن ادامه خنک‌کاری چنین روندی را بدنبال نخواهد داشت. بررسی نمودار مشخص می‌نماید که در شرایط محاسباتی موجود دمای بهینه گاز خروجی با  $14/3^{\circ}\text{C}$  خنک‌کاری محقق خواهد شد. لازم بذکر است که در محاسبات اقتصادی جهت بدست آوردن دمای بهینه خنک‌کاری، با توجه به شرایط عملیاتی ایستگاه، حدود مناسب بازه خنک‌کاری جهت جلوگیری از احتمال تشکیل هیدرات، بر اساس نتایج شبیه‌سازی در نظر گرفته شده و لذا در بعضی شرایط عملیاتی با وجود صرفه اقتصادی، عملیات خنک‌کاری به مقدار درج شده در جداول محدود شده است.



نمودار ۱۱- روند تغییرات افزایش هزینه برق، صرفه‌جویی در هزینه گاز مصرفی و خالص صرفه‌جویی

با افزایش خنک‌کاری در ایستگاه اقلیم سردسیر با دبی گاز عبوری MMSCMD ۶۰

هفتمین همایش ملی انرژی



میزان خنک کاری (C)

نمودار ۱۲- تعیین میزان خنک کاری بهینه براساس محاسبات اقتصادی

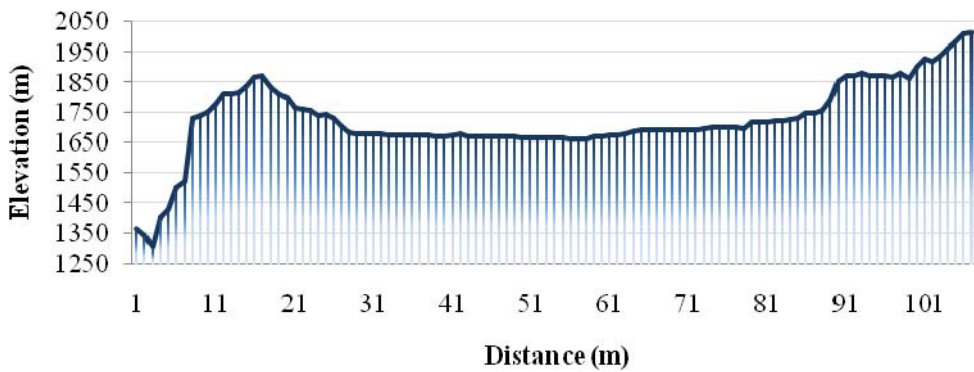
با دبی گاز عبوری ۶۰ MMSCMD در ایستگاه اقلیم سردسیر (نیک‌پی)

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

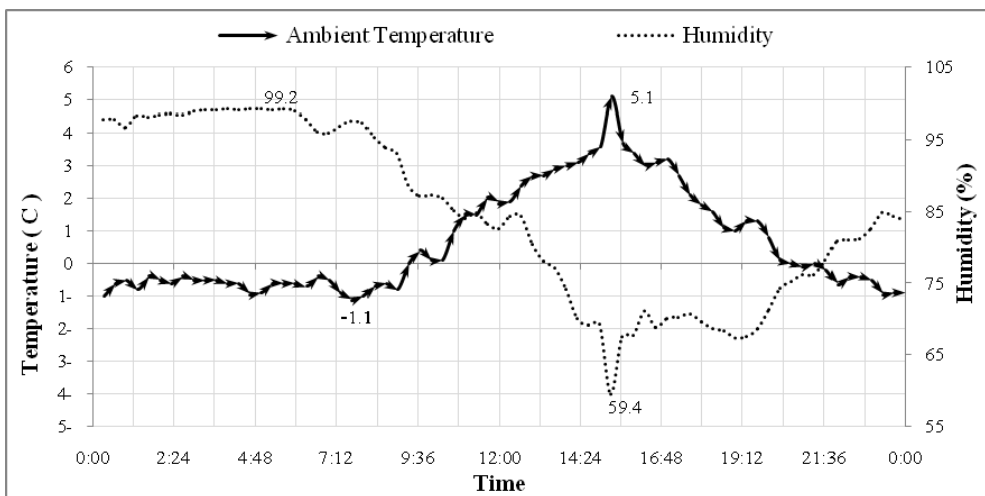
1	Company: NIGC						
2	Location:						
3	Service of Unit: Nikpey ST						
4	Item No.:						
5	Date:						
6	Size & Type	15.5078 / 51.3431 m	Type	Forced	Number of Bays	9	
7	Surf/Unit-Finned Tube	84052.5 m <sup>2</sup>	Bare tube area / bundle	215.5 m <sup>2</sup>	Area ratio	21.67	
8	Heat exchanged	4309.5 kW	MTD, Eff	9.59 °C			
9	Transfer Rate-Finned	5.3 Bare, Service	115.8 Clean	118.7 W/(m <sup>2</sup> K)			
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE						
11	Fluid Circulated	Natural Gas			In/Out		
12	Total Fluid Entering	kg/s	348	Density, Liq	kg/m <sup>3</sup>	/	
13			In/Out	Density, Vap	kg/m <sup>3</sup>	52.35/53.42	
14	Temperature	°C	47/42	Specific Heat, Liq	kJ/(kg K)	/	
15	Liquid	kg/s	0/0	Specific Heat, Vap	kJ/(kg K)	2.476/2.475	
16	Vapor	kg/s	348/348	Therm. Cond. Liq	W/(m K)	/	
17	Noncondensable	kg/s	0/0	Therm. Cond. Vap	W/(m K)	0.044/0.043	
18	Steam	kg/s	/	Freeze Point	°C	/	
19	Water	/	/	Bubble / Dew point	°C	/	
20	Molecular wt, Vap	/	/	Latent heat	kJ/kg	/	
21	Molecular wt, NC	/	/	Inlet pressure (abs)	psi	1023	
22	Viscosity, Liq	mPa s	/	Pres Drop, Allow/Calc	15 / 2.494		
23	Viscosity, Vap	0.014/0.014		Fouling resistance	m <sup>2</sup> K/W	0.00021	
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE						
25	Air Quantity, Total	104.5696 kg/s	Altitude	1110 m			
26	Air Quantity/Fan	m <sup>3</sup> /s	Temperature In	5 °C			
27	Static Pressure	0 Pa	Temperature Out	45.93 °C			
28	Face Velocity	0.13 m/s	Mass velocity	0.14 kg/s/m <sup>2</sup>	Design Ambient	-20 °C	
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION						
30	Design pressure	79.37934 bar	Test Pressure	Code	Design temperature	103 °C	
31	TUBE BUNDLE		Header		Tube		
32	Size	m	15.5078	Type	Plug	Material	
33	Number/bay	2	Material	Specifications			
34	Tube Rows	4	Passes	1	OD	25.4 Min Thk. 1.65 mm	
35	Arrangement	Plug Mat.		No./Bun	180 Lng	15 m	
36	Bundles	2 par	Gasket Mat.	Pitch	60 / 51.96 30	Degrees	
37	Bays	9 par	Corr. Allow.	mm	FIN		
38	Bundle frame	Inlet Nozzle ( 2 ) 5.2776 in		Type	G-finned		
39	MISCELLANEOUS	Outlet Nozzle( 2 ) 5.2776 in		Material	Aluminum 1060		
40	Struct. Mount.	Special Nozzles		OD	57.15 Tks	0.28 mm	
41	Surf.Preap	Rating		No.	398 #/m	Design Temp °C	
42	Louvers	TI	PI	Code			
43	Vibration Switches	Chem Cleaning		Stamp	Specs		
44	MECHANICAL EQUIPMENT						
45	Fan, Mfr., Model	Driver, Type V-belt		Speed Reducer, Type			
46	No./Bay	3 RPM	Mfr.	Mfr.&Model			
47	Dia.	3.7082 m	Blade(s)	No./Bay			
48	Pitch	Angle	RPM	Rating	hp		
49	Blade(s)	Hub	Enclosure	Ratio			
50	hp/Fan	Min. Amb	V/Phase/Hz	/ /	Support		
51	Control Action on Air Failure-					Louvers	
52	Degree Control of Outlet Process Temperature						
53	Recirculation				Steam Coil	Yes	
54	Plot Area	m <sup>2</sup>	Drawing No.	Wt. Bundle	11094.8	Wt. Unit 199705.4 kg	
55	Notes:						
56	Standard Simulation						
57							
58							

شکل ۱- صفحه مشخصات شبیه‌سازی کولر هوایی ایستگاه نیک‌پی با استفاده از نرم‌افزار Aspen-HTFS

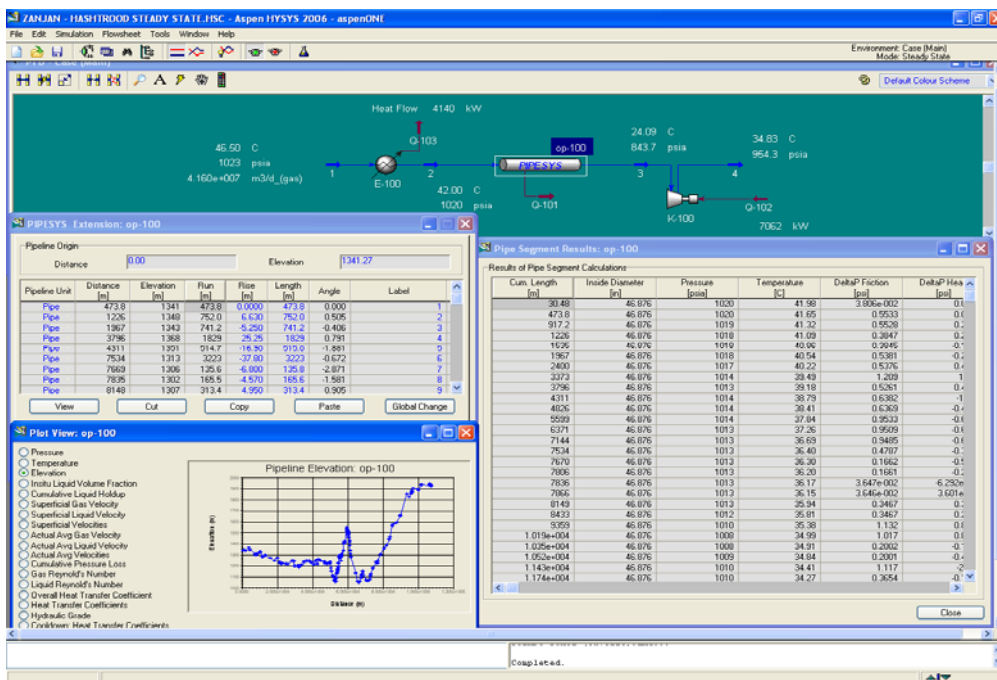
هفتمین همایش ملی انرژی



شکل ۲- نمودار پروفایل تغییرات ارتفاع خط لوله ۳۰" و ۳۶" غرب- مسیر ایستگاه تقویت فشار قم تا اراک



شکل ۳- نتایج اندازه‌گیری و ثبت تغییرات دمای هوای ایستگاه هشتروز در طول شبانه‌روز در تاریخ ۸۷/۱۱/۲۰



شکل ۴- نمایی از شبیه‌سازی قطعه‌ای خط لوله ۴۸ اینچ آذربایجان مسیر بین ایستگاه نیک‌پی تا هشتروز

## هفتمین همایش ملی انرژی

### مراجع

- [1]. Moser, A.P., "Buried Pipe Design", 2nd edition, McGraw-Hill, Utah, 2001.
- [2]. Osiadacz, A., "Simulation of transient gas flows in Networks", Int. J. Numer. Methods Fluids, 4, 13-23, 1984.
- [3] Tao W. Q., Ti, H. C., Transient Analysis of gas Pipeline Network, chemical Engineering Journal, vol. 69, PP.47-52, 1998.
- [4] Menon, E.Shashi. "Gas Pipeline Hydraulics", Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- [5] McAllister, E.W., "Pipeline Rules of thumb Handbook", 5th edition, Gulf professional publishing, Oxford, 2000.