دریافت: ۲۶ آبان ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۲۶ اسفند ۱۴۰۳ صفحات ۲۳ الی ۴۵

امکان‌سنجی فنی و اقتصادی احداث یک نیروگاه ۶ مگاواتی از گازهای زائد فرآیند تولید دوده صنعتی

مریم خداوردی
دانش‌آموخته کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران
maryamkhodaverdi806@gmail.com
محمد صادق عابدی‌نژاد (نویسنده مسئول)
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران ایران
m.abedineja@alzahra.ac.ir
میلاد قهرمانی
کارشناس تحقیق و توسعه، شرکت دانش بنیان فناوران شریف، تهران، ایران
m.ghahremani@fanavaran-sharif.ir

چکیده: دوده صنعتی با نام تجاری کربن بلک، دارای ذرات ریزکربن بوده و ساختار مولکولی آن بی‌شکل می‌باشد. این ماده در صنایع همچون پلاستیک، لاستیک و رنگ کاربرد دارد. عمده دوده صنعتی که در دنیا تولید می‌شود، با استفاده از فرآیند کوره‌ای سیاه و به شکل گرانول شده می‌باشد. در طول فرآیند تولید دوده صنعتی، گازهای زائدی تولید می‌شود که از نظر ارزش حرارتی و دما بسیار با ارزش می‌باشند. در جهان از این گاز عمدتا برای تامین حرارت خشک‌کن فرآیند تولید دوده صنعتی یا تولید توان و حرارت استفاده می‌کنند. تاکنون در ایران هیچ یک از چهار شرکت تولید دوده موفق به تولید توان از این گاز نشده‌اند. در این پژوهش پنج سیکل متفاوت شامل سیکل بخار، سیکل بخار به‌همراه تولید حرارت، سیکل گاز، سیکل گاز به‌همراه تولید حرارت و سیکل ترکیبی برای تولید توان و حرارت از گاز خروجی فرآیند تولید دوده صنعتی در کارخانه دوده‌فام با ظرفیت تولید بیش از ۶۰ هزار تن در سال، مورد بررسی قرار گرفته شده است. گاز زائد خروجی فرآیند تولید دوده صنعتی، بعنوان سوخت با ارزش حرارتی قابل توجهی، وارد سیکل‌های تولید توان شده و سوخت اولیه سیکل‌ها را تامین می‌کند. نتایج نشان می‌دهد در سیکل گاز به همراه سیستم دیگ بخار بازیافت حرارت، ۷۹۳۴ kW توان تولید شده که بازدهی کل به ۸۹.۹٪ رسیده است. این سیکل قابلیت تامین برق، بخار و آب گرم مورد نیاز کارخانه و فروش برق مازاد به شبکه را دارد. همچنین سیکل ترکیبی با تولید ۱۲۱۵۷ kW و بازدهی ۴۱.۲۳٪، بیشترین تولید توان را دارد که امکان فروش برق مازاد به شبکه و ایجاد درآمدزایی برای کارخانه را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دوده صنعتی، گاز زائد، بازیافت حرارت، تولید توان، کارخانه دوده‌فام.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

۱. مقدمه

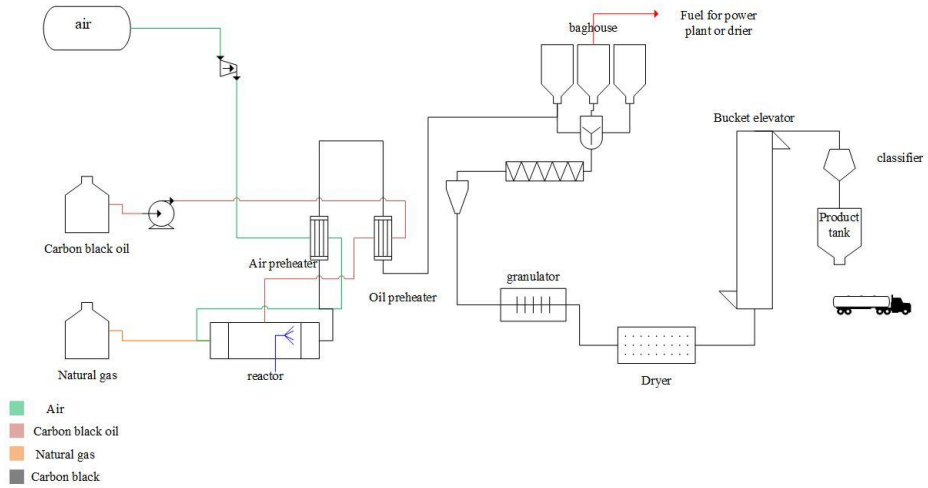
دوده صنعتی[1] نوعی کربن آمورف است که از احتراق ناقص مواد هیدروکربنی مانند گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی تولید می‌شود. این ماده نرم و ریز دارای قطر حدود ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ آنگستروم می‌باشد و شامل ۹۵ تا ۹۷٪ کربن و درصد کمی هیدروژن و اکسیژن می‌باشد. دوده صنعتی در دو دسته سخت و نرم تولید می‌شود. از خواص فیزیکی و شیمیایی این ماده می‌توان به خاصیت رنگ‌دهی، افزایش خاصیت رسانایی و هدایت الکتریکی، افزایش خاصیت استحکام بخشی، مقاوم در برابر فرسایش و خراشیدگی و محافظت در برابر نور و اشعه فرابنفش اشاره کرد که در صنایعی همچون پلاستیک، لاستیک، جوهر، رنگ و پوشش، پلیمر، الکتریک، بسته‌بندی، مصالح ساختمان و کاغذ کاربرد دارد (۱).

به طور کلی دوده صنعتی به شش روش تولید می‌شود؛ فرآیند سیاه حرارتی، فرآیند استیلن سیاه، فرآیند دوده گازی، فرآیند دوده کانالی، فرآیند لامپ سیاه و فرآیند سیاه کوره‌ای. امروزه بیش از ۹۰٪ دوده صنعتی از روش سیاه کوره‌ای تولید می‌شود (۲). «شکل (۱)» تولید دوده صنعتی به روش سیاه کوره‌ای را نشان می‌دهد. در این روش هوای پیش گرم شده به همراه گاز طبیعی در کوره می‌سوزند و سپس مواد اولیه پیش گرم شده که شامل CTO[2], FCC[3], CFO[4] و RPO[5] هستند، به آن اضافه می‌شود. دمای کوره به ۱۲۰۰–۱۹۰۰ °C رسیده و مواد اولیه به دوده صنعتی تجزیه می‌شود. گرمای زیاد این ناحیه پاسخگوی واکنش‌های گرماگیری همچون بودوارد[6] است. دمای جریان احتراق به واسطه مه‌پاش انتهایی کوره تا حدود ۹۰۰–۵۰۰ °C کاهش می‌یابد. این جریان با گذر از پیش‌گرم‌کن‌های هوا و سوخت اولیه مقداری از حرارت خود را از دست می‌دهند و بعد از آن برای بار دوم به واسطه مه‌پاش انتهایی فرآیند دمای جریان خروجی به ۲۶۰–۲۰۰ °C می‌رسد. سپس برای

[1] Carbon Black
[2] Coal Tar Oil
[3] Fluid Catalytic Cracking
[4] Cracked Fuel Oil
[5] Rubber Process Oil
[6] Boudouard

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

جداسازی دوده از گازهای زائد[1] به فیلتر کیسه‌ای[2] برده می‌شود. سیستم این فیلترها از نوع پالس جت[3] و یا جریان معکوس گاز[4] می‌باشد. دوده از گاز زائد جدا شده و به خردکن‌ها می‌رود. دوده پس از گذر از خردکن‌ها، به خشک‌کن دوار غیر مستقیم می‌رود و رطوبت خود را از دست می‌دهد. سپس با گذر از فیلترهای گوناگون آماده بسته‌بندی می‌شود.(۱, ۳)



شکل ۱. فرآیند تولید دوده صنعتی به روش سیاه کوره‌ای (۴)

ترکیب گاز زائد و دوده صنعتی پس گذر از دومین مه‌پاش، افت دمای زیادی داشته و از ۷۸۹.۵ °C به ۲۳۱.۹ °C می‌رسد. همچنین فشار آن از ۱.۳ اتمسفر به ۱.۱ اتمسفر می‌رسد. پس از آن برای جداسازی دوده و گاز به فیلترهای کیسه‌ای می‌روند که البته دما و فشار گاز به میزان ناچیزی افت می‌کند و سپس به عنوان flare خارج می‌گردد. در صورت احداث نیروگاه، بخشی از این گاز به flare رفته و بخشی دیگر به نیروگاه می‌رسد. (۳, ۵) به علت نزدیک بودن نیروگاه و محیط کارخانه افت فشار بسیار اندک می‌باشد.

[1] Tail Gas
[2] Baghouse
[3] Pulse-jet
[4] Reverse-gas

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

این گاز زائد جدا شده در فیلتر کیسه‌ای دارای ترکیباتی است که رها کردن آن موجب آسیب به تجهیزات یا مسمومیت می‌شود. از آنجایی که دارای ترکیبات و ارزش حرارتی مناسب می‌باشد، معمولاً در دنیا از آن برای ایجاد گرمایش در خشک‌کن‌ها یا تولید توان استفاده می‌کنند.(۶)

شرکت‌های تولید دوده صنعتی در جهان، سال‌هاست از گاز زائد برای تولید توان استفاده می‌کنند. به عنوان مثال شرکت فیلیپس که بزرگ‌ترین شرکت تولید دوده در هند، بزرگ‌ترین صادر کننده دوده در آسیا و هشتمین تولید کننده تولید دوده صنعتی در جهان است، در کنار تولید بیش از ۳۶۰ هزار تن دوده در سال، ۶۰ مگاوات برق نیز تولید می‌کند. همچنین گروه ادیتا بیرلا[1]، یکی دیگر از تولید کنندگان دوده در دنیا است که در کشورهای هند، تایلند و چین در مجموع ۷۸۰ هزار تن دوده و ۷۵ مگاوات برق تولید می‌کند.(۷, ۸)

طبق یک گزارش از امکان‌سنجی در شرکت کربن قاره یا CCC که از سری شرکت‌های تولید کننده دوده صنعتی در سراسر جهان است، با روش تجزیه و تحلیل داده‌ها، مشخص شد علاوه بر تولید سالانه ۱۵۰ هزار تن دوده صنعتی، امکان تولید ۱۶ مگاوات برق از طریق نیروگاه همزمان وجود دارد. برآور هزینه این پروژه در سال ۲۰۱۹ معادل ۸۰۲.۸۷ کرور روپیه بوده است.(۹)

روسنر و همکاران (۳) در پژوهشی بر روی یک کارخانه تولید دوده صنعتی در جینینگ چین، نشان دادند که اگر با استفاده از گاز زائد خروجی به تولید همزمان برق و حرارت بپردازند، با تولید حدودا ۷۰۰۰ kW و مصرف بخار تولید شده در مجموعه، کارآرایی فرآیند سیاه کوره‌ای، انرژی و اقتصاد چرخشی را بهبود می‌بخشند. همچنین با جایگزینی هیدروژن بجای گاز طبیعی، ۱۹٪ انتشار کربن دی‌اکسید را کاهش دادند. کوزمان و همکاران نیز به بررسی استفاده از سیکل ترکیبی تولید برق و حرارت (CHP[2]) برای تولید کنندگان دوده صنعتی جهت کاهش هزینه انرژی و حفاظت از محیط زیست پرداختند که با تولید ۵۶۵۹ kW دارای دوره بازگشت ۳.۵ ساله می‌باشد.(۱۰) حقیقت (۱۱) و باباگل‌زاده (۱۲) نشان دادند که استفاده از سیستم تولید همزمان برق و حرارت در صنایع انرژی‌بر مانند تولید گچ و سیمان یک روش مناسب برای افزایش راندمان و کاهش شدت انرژی است و سبب

[1] Aditya Birla Group
[2] Combine Heat and Power

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

بازیافت انرژی‌های تلف شده می‌شود. همچنین برای این صنایع، توربین بخار محرک مناسبی نبوده و دارای دوره بازگشت سرمایه طولانی‌تری می‌باشد.

گوالد و همکاران (۱۳) به بررسی بازیابی حرارت اتلافی از یک نیروگاه گازی محل دفع زباله پرداختند. در این طرح دو سیکل بخار و رانکین برای بازیابی حرارت و تولید توان پیشنهاد داده شد که موجب افزایش راندمان و اقتصاد چرخشی شد. لی و همکاران (۱۴) به بررسی میزان متان موجود در سوخت و مقدار توان تولیدی از آن و پیش‌گرم کردن گاز ورودی با استفاده از گاز زائد پرداختند که نشان می‌دهد با افزایش میزان متان، تولید توان نیز افزایش می‌یابد. احتراق نفت سنگین و گاز طبیعی نیز موجب افزایش تولید توان می‌شود. اینگونه راندمان تا ۳۷٪ افزایش می‌یابد. اوسیلاتو و همکاران (۱۵) نیز در پژوهشی به بررسی کاهش انتشار آلاینده‌های گازی در سیکل رانکین و افزایش راندمان برای گازهایی با ارزش حرارتی پایین پرداختند که نتایج مثبتی را در پی داشت.

مطابق با مطالعات انجام شده، می‌توان جهت افزایش بهره‌وری، از گاز زائد خروجی برای تولید توان استفاده نمود. طبق بررسی‌های انجام شده مشخص گردید تاکنون هیچگونه بررسی فنی اقتصادی در خصوص استفاده از گاز زائد برای افزایش بهره‌وری شرکت‌های تولید دوده صنعتی در ایران انجام نشده است. در حال حاضر چهار شرکت تولید دوده در ایران وجود دارد که هیچ کدام طرح تولید برق از گازهای خروجی بخش فیلتراسیون را بررسی نکرده‌اند. در این پژوهش ارزیابی ایجاد ارزش افزوده از جریان گاز زائد خروجی از مجموعه صنعتی دوده فام مورد بررسی قرار گرفته شده است. نقطه تمایز این تحقیق با دیگر پژوهش‌ها، بررسی فنی پنج سناریو مختلف برای تولید توان از این گاز است که از سیکل‌های بخار، گاز و ترکیبی برای شبیه‌سازی نیروگاه استفاده شده است. این در حالی است که در در مطالعات پیشین یک سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای افزایش بهره‌وری از سیستم تولید همزمان برق و حرارت نیز استفاده شده است.

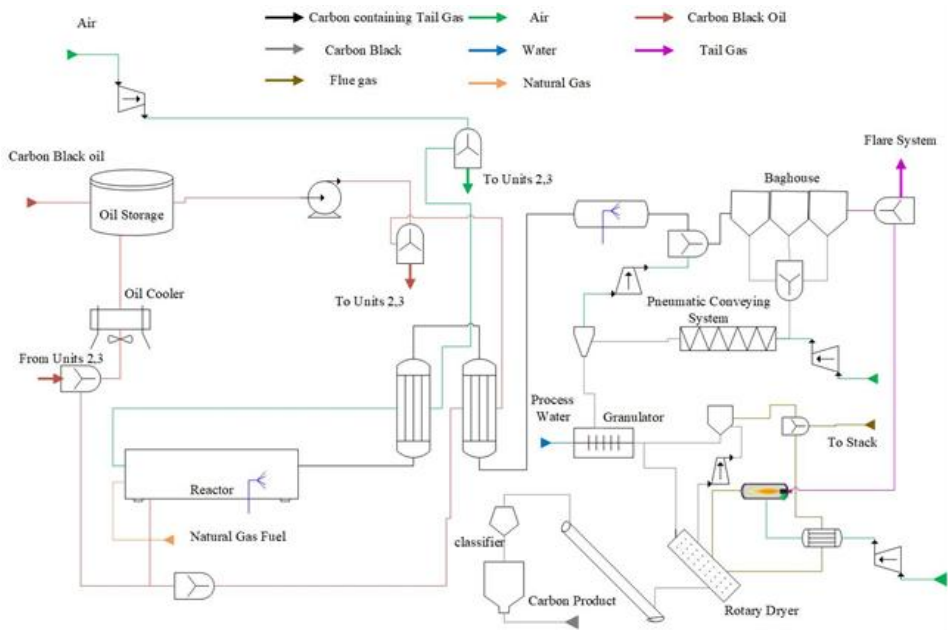
این طرح تاثیر قابل توجه‌ای در کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های زیست محیطی داشته و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌ها در فرآیند تولید دوده صنعتی می‌شود. همچنین با فروش برق مازاد تولیدی، می‌توان برای کارخانه درآمدزایی کرد. با توجه به اهمیت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌های تولیدی از آن، اجرای این طرح برای کارخانه‌های تولید دوده صنعتی، می‌تواند گزینه مناسبی باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

۲. الگوسازی تجربی

شـرکت دوده‌فام، از شـرکت‌های تولید کننده دوده صـنعتی با ظرفیت بیش از ۶۰ هزار تن در سـال می‌باشـد(۱۶). کارخانه شـرکت صـنعتی دوده فام (صـدف) با اسـتفاده از فرآیند کوره‌ای، در دو خط تولید دوده سـخت و یک خط دوده نرم قادر اسـت چهارده گرید دوده مورد نیاز صـنعت لا سـتیک را تولید نماید. در حال حاضـر در فاز های اول و سـوم خود پنج گرید دوده سـخت و در فاز دوم خود توانایی تولید سه گرید دوده نرم را دارد. هر دو خط سخت و یک خط نرم در این کارخانه به صورت کاملا مجزا در تمام تجهیزات و به صورت موازی در کنار یکدیگر طراحی شده‌اند. گازهای خروجی از بخش فیلتراسـیون دو خط یک و دو به یک دود کش مشـترک و خط سـه به یک دود کش دیگر منتهی می شـود. جریان گاز زائد خروجی از این مجموعه بخاطر نوع ترکیبات آن و همچنین از نظر دما و ارزش حرارتی بسیار با ارزش می‌باشـد و همچنین بنا به ارزیابی انجام شـده در مقایسـه با جریان گاز زائد صنایع خارجی ذکر شده می‌تواند سوخت مناسب‌تری برای نیروگاه‌ها باشد. شکل ۲ فرآیند تولید دوده صـنعتی در شـرکت دوده‌فام را نمایش می‌دهد. در این فرآیند ابتدا خوراک هیدروکربنی توسط احتراق ناقص در یک کوره با دما و فشار مشخص، از حالت مایع به حالت گاز تبدیل می‌شود و سپس توسط تغییر دما و پاشش سیال خنک بخش عمده آن به حالت جامد یا دوده تبدیل می‌شود. با پاشـش مجدد سـیال خنک مخلوط دوده و گازهای همراه از یک دیگر جدا شـده و وارد فیلتر می‌شـوند و در آنجا ذرات جامد دوده از گازهای همراه جدا شـده و به بخش بعدی منتقل و طی فرایندهایی جمع‌آوری، گرانوله و خشـک می‌گردد. گازهای همراه که در این مرحله گاز زائد نامیده می‌شوند، به دودکش فرستاده می‌شوند. این گازها علاوه بر داشتن دمای بالا به دلیل دارا بودن ارزش حرارتی مطلوب و گاز های سوختنی، پتانسیل استفاده به عنوان سوخت را در بردارند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]



شکل ۲. فرآیند تولید دوده صنعتی دوده فام (۴, ۵)

۱-۲. ترکیبات گاز زائد

گاز زائد خروجی از فیلتر کیسه‌ای که به آن Tail Gas یا Waste Gas نیز گفته می‌شود، دارای دما و ارزش حرارتی بالایی می‌باشد (دمای $^{\circ}C$ ۲۳۱.۹ و فشار ۱.۱ اتمسفر). می‌توان از آن به عنوان سوخت ورودی نیروگاه استفاده کرده و با سوزاندن آن و استفاده از تجهیزات مناسب، تولید توان کرد. بنابراین بخشی از این گاز به flare رفته و بخشی دیگر به نیروگاه می‌رسد. (۳, ۵) به علت نزدیک بودن نیروگاه و محیط کارخانه افت فشار و دما بسیار اندک می‌باشد. ترکیبات گاز زائد خروجی در شرکت دوده فام در «جدول (۱)» ارائه شده است(۵). ارزش حرارتی این گاز kJ/kg ۲۴۶۴۵.۳۱ است که تقریباً معادل ۶۸.۵٪ از ارزش حرارتی گاز طبیعی است.(۱۷)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

جدول ۱. ترکیبات گاز زائد خروجی شرکت دوده‌فام (۵، ۱۷، ۱۸)

ترکیبات	مقدار	ارزش حرارتی (kJ/kg)	
		HHV	LHV
N_2	٪۲۷.۵۵		
H_2	٪۲۲.۷۴	۱۴۱۸۰۰	۱۲۰۰۰۰
O_2	٪۰.۴۷		
SO_2	٪۰.۰۹		
H_2S	٪۱۰.۸۵	۱۷۶۰۰	۱۵۹۰۰
C_2H_6	٪۱۴.۵۸	۵۱۹۰۰	۴۷۸۰۰
C_2H_2	٪۸.۳۲	۵۴۸۰۰	۴۸۳۰۰
CH_4	٪۱۲.۳۵	۵۵۵۰۰	۵۰۰۰۰
CO	٪۱.۲	۱۰۱۰۰	۱۰۱۰۰
CO_2	٪۱.۲۶		
NO_x	٪۰.۴۱		
Ar	٪۰.۱۸		
ارزش حرارتی	۲۴۶۴۵.۳۱ kJ/kg		

۳. مدل‌سازی تولید توان

برای تولید توان می‌توان از سیکل‌های بخار، گاز یا ترکیبی استفاده کرد. میکروتوربین‌ها به علت ظرفیت پایین، مناسب این کار نیستند. همچنین برای افزایش راندمان می‌توان در کنار تولید برق، حرارت نیز تولید کرد. شبیه‌سازی این سیکل‌ها در نرم‌افزار ترموفلکس (THERMOFLEX 23.0) انجام شده است. (۱۷)

در این پژوهش ۵ طرح برای تولید توان در نظر گرفته شده است.

۱. تولید توان در سیکل بخار: با سوزاندن گاز زائد در یک بویلر مناسب و استفاده از توربین بخار برای تامین برق کارخانه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

۲. تولید توان در سیکل بخار به همراه تولید حرارت: علاوه بر تامین برق کارخانه، تولید حرارت بصورت آب گرم یا بخار با استفاده از سیستم HRSG[1]

۳. تولید توان در سیکل گاز: تولید توان در توربین گاز

۴. تولید توان در سیکل گاز به همراه تولید حرارت

۵. تولید توان در سیکل ترکیبی: تولید توان ماکزیمم با ترکیب دو سیکل گاز و بخار

در تمامی طرح‌ها از گاز زائد با نرخ جریان ۱.۱۴ kg/s ، دمای ۲۳۱ C°و ارزش حرارتی kJ/kg ۲۴۶۴۵.۳۱ به عنوان سوخت استفاده شده است. (۵, ۱۷)

نتایج بدست آمده از طرح‌های ارائه شده پس از شبیه‌سازی در THERMOFELEX 23.0 (۱۷) در ذیل ارائه شده‌اند.

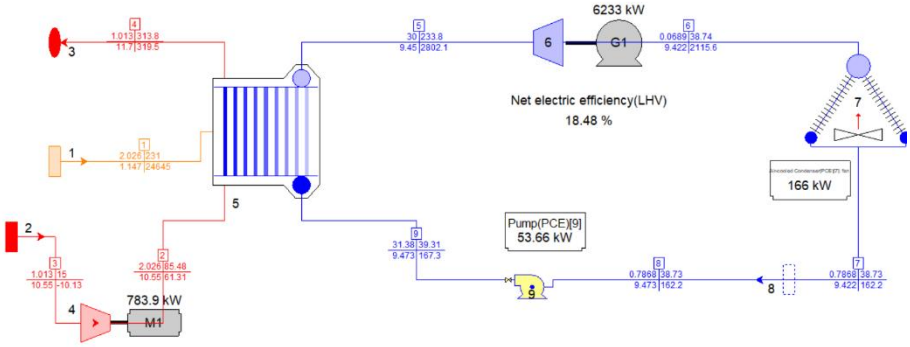
۱-۳. تولید توان در سیکل بخار

«شکل (۳)» تولید توان از گاز زائد در سیکل بخار را نشان می‌دهد. ۱۰.۵۵ kg/s هوا در فشار اتمسفر و دمای ۱۵ C° وارد یک کمپرسور با توان مصرفی ۷۸۳.۹ kW می‌شود که فشار آن را به فشار سوخت و دمای ۸۵ C° می‌رساند. هوا و سوخت وارد یک بویلر می‌شوند تا ۹.۴۵ kg/s آب در دمای ۳۹ C° و فشار ۳۱.۳۸ اتمسفر را به بخارآب ۲۳۳.۸ C° و فشار ۳۰ اتمسفر تبدیل نماید و گازهای حاصل از احتراق در دمای ۳۱۳.۸ C° از بویلر خارج گردند. بخار آب خروجی از بویلر وارد یک توربین بخار می‌گردد که پس از افت آنتالپی آن از ۲۸۰۲ kJ/kg به ۲۱۱۵.۶ kJ/kg در دمای ۳۸.۷۴ C° از آن خارج می‌گردد. حاصل این افت آنتالپی، تولید توان به میزان ۶۲۳۳ kW در یک ژنراتور با ۹۶.۷۵٪ است. مخلوط آب و بخارآب خروجی از توربین بخار وارد یک خنک‌کننده هوا خنک (ACC[2]) با توان مصرفی ۱۶۶ kW می‌شود. ۱۱۸۷.۹ kg/s هوای ورودی به خنک کننده با دمای ۱۵ C° بعد از تماس با مخلوط آب- بخار آب ورودی (X=0.811) به دمای ۳۰.۳ C° می‌رسد و دما و فشار آب خروجی را به ۳۸.۷۳ C° و فشار ۱۰.۷۸۶۸ اتمسفر می‌رساند. آب خروجی از خنک کننده جهت استفاده مجدد در بویلر با گذر از یک پمپ ۵۳.۶۶ kW به فشار ۳۱.۳۸ اتمسفر و دمای ۳۹ C° می‌رسد. بازده

[1] Heat Recovery Steam Generator
[2] Air Cooling Condenser

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

خالص این طرح ٪ ۱۸/۴۸ است. این سیکل قابلیت پاسخگویی به نیاز برق کارخانه را دارد. انتشار آلاینده‌هایی همچون CO_2 و SO_2 در این طرح به ترتیب ۵۰۹۳ kg/h و ۱۳۳۸ kg/h می‌باشد.(۱۷)



شکل ۳. تولید توان در سیکل بخار با استفاده از گاز زائد خروجی شرکت دوده‌فام (۱۷)

۲-۳. تولید توان در سیکل بخار به همراه تولید حرارت

از گاز خروجی بویلر با استفاده از یک سیستم HRSG می‌توان حرارت تولید کرد. این حرارت می‌تواند هوا و آب گرم کارخانه و یا واحدهای اطراف را تامین کند و در زمینه مصرف انرژی صرفه‌جویی کنند و انتشار گازهای آلاینده را کم کند. از طرفی در این طراحی بازدهی سیکل افزایش می‌یابد.

تفاوت این سیکل و سیکل قبل در گاز خروجی از بویلر است. همانطور که در «شکل (۴)» مشخص است، گاز خروجی از بویلر با دمای ۳۱۳۸ °C و فشار ۱.۰۲۹ اتمسفر وارد سیستم HRSG می‌شود. این سیستم با از دست دادن دمای گاز ورودی به سیستم، موجب گرم شدن سیال ورودی می‌شود. آب با دمای ۱۵ °C و فشار ۰.۹۹۳۵ اتمسفر به دمای ۳۰۸۸ °C می‌رسد. همچنین دمای گاز به ۹۲.۸۲ °C رسیده و پس از خروج از سیستم HRSG به flare می‌رود.(۱۷)

در سیستم HRSG، فرض شده است آب ورودی با فشار محیط (۱ اتمسفر) و دمای ۱۵ °C وارد سیکل شده و بخار آب بدست آمده با فشار ۰۸ اتمسفر و دمای ۳۰۸۸ °C از سیستم جهت استفاده در کارخانه خارج شده است (۱۷).

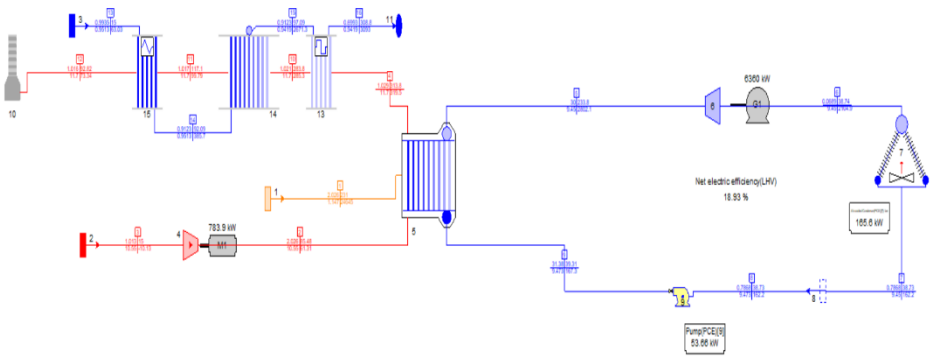
بازدهی این سیکل با تولید برق خالص ۵۲۷۰kW و انتشار آلاینده یکسان با سیکل قبل، ٪۲۹.۳۹ می‌باشد. بازدهی از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

$$\eta = \frac{\sum E_{out}}{\sum E_{in}} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن انرژی ورودی (Ein)، انرژی گاز زائد است که به عنوان سوخت استفاده می‌شود و انرژی خروجی (Eout) مجموع انرژی مفید حرارت و برق می‌باشد. در شکل زیر نمودار فرآیند طراحی شده در این طرح نمایش داده شده است.

مصرف داخلی سیکل بخار و سیکل بخار به همراه سیستم HRSG به دلیل مصرف کمپرسور موجود بعد از جریان ورودی هوا می‌باشد. این کمپرسور برای رساندن فشار هوا به ۲ اتمسفر، ۷۸۳.۹ kW برق مصرف می کند (۱۷).



شکل ۴. تولید توان و حرارت در سیکل بخار به همراه سیستم HRSG با استفاده از گاز زائد خروجی شرکت دوده‌فام (۱۷)

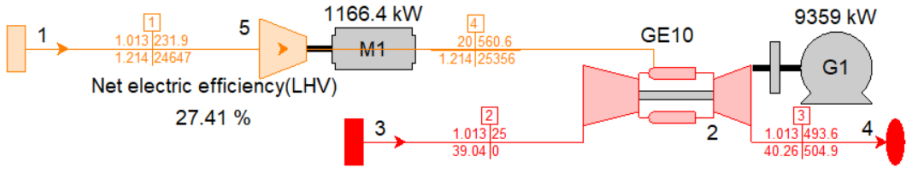
سیستم HRSG از ۳ بخش سوپرهیتر، اکونومایزر و اواپراتور تشکیل شده است. میزان انرژی گرمایی تولیدی در این بخش ۲۹۱۳.۱ kW می‌باشد (۱۷).

۳-۳. تولید توان در سیکل گازی

در این طرح گاز زائد مستقیما به توربین گاز فرستاده می‌شود. جریان گاز با نرخ ۱.۲۱۴ kg/s، دمای ۲۳۱.۹°C و فشار ۱.۰۱۳ اتمسفر وارد کمپرسور می‌شود. دما و فشار گاز افزایش یافته و به ۵۶۰.۶°C و ۲۰ اتمسفر می‌رسند. پس از افزایش دما و فشار، سوخت وارد توربین گاز جهت تولید توان می‌شود. توربین استفاده شده در این پژوهش GE10 با ظرفیت تولید ۱۰مگاوات می‌باشد.با مقایسه شکل ۴ و ۵

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

مشاهده می‌گردد که عملکرد توربین گاز در تولید توان بهتر از توربین بخار است و ۸۰۷۸ kW توان خالص تولید می‌کند.. بازدهی این سیکل ۲۷.۴۱٪ است. کارخانه می‌تواند با فروش برق مازاد این سیکل به شبکه، ایجاد درآمد کند. انتشار آلاینده‌های CO_2 و SO_2 در این طرح به ترتیب ۵۳۷۴ kg/s و ۱۴۱۱ kg/s می‌باشد (۱۷).

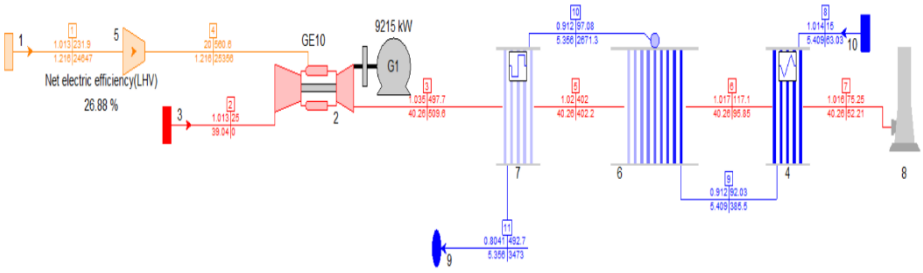


شکل ۵. تولید توان در سیکل گاز با استفاده از گاز زائد خروجی شرکت دوده‌فام (۱۷)

۴-۳. تولید توان در سیکل گازی به همراه تولید حرارت

همانند طرح دوم، از حرارت خارج شده از توربین می‌توان حرارت تولید کرد. جریان گاز زائد، با اطلاعات طرح قبل وارد توربین می‌شود و ۹۲۱۵ kW برق تولید می‌کند. خروجی توربین گاز، گازی با دمای ۴۹۷.۷°C، فشار ۱.۰۳۵ اتمسفر و نرخ جریان ۴۰.۲۶kg/s است که با ورود این جریان به سیستم HRSG، آبی با نرخ جریان ۵.۴۰۹kg/s، دما ۱۵°C و فشار ۱.۰۱۴ اتمسفر را به بخار آب با دمای ۴۹۲.۷°C و فشار ۰.۸۰۴۱ اتمسفر تبدیل می‌کند. در نهایت گاز به دمای ۷۵.۲۵°C رسیده و در flare می‌سوزد. این سیکل با تولید خالص ۷۹۳۴kW توان و ۱۸۵۹۹kW حرارت، بازده خالص کل را به ۸۹.۸٪ می‌رساند. مقدار آلاینده‌های CO_2 و SO_2 تولیده شده به‌ترتیب ۵۳۸۲ kg/s و ۱۴۱۳.۹ kg/s می‌باشد. در «شکل (۶)» فرآیند طراحی شده در این طرح نمایش داده شده است. (۱۷)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]



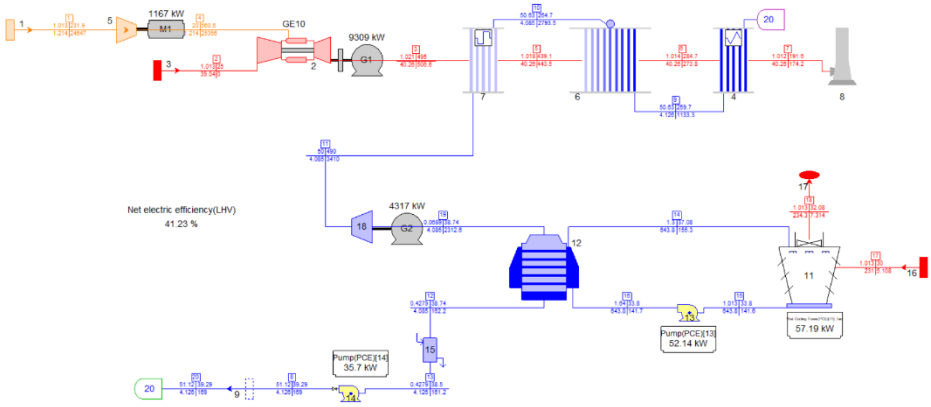
شکل ۶. تولید توان و حرارت در سیکل گاز به همراه سیستم HRSG با استفاده از گاز زائد خروجی شرکت دوده‌فام (۱۷)

۵-۳. تولید توان در سیکل ترکیبی

در طرح آخر تولید توان را با ترکیب کردن دو سیکل گاز و بخار بررسی می‌گردد (شکل«۷»). بخار خروجی از سوپرهیتر به توربین بخار فرستاده شده و مجددا از آن توان تولید می‌شود. بر خلاف سیکل اول، در این طرح از برج هلر استفاده شده است. توربین گاز ۹۳۰۹kW توان می‌کند. گاز خروجی از آن با دمای ۴۹۵°C و فشار ۱.۰۲۱ اتمسفر از توربین گاز خارج شده و به سیستم HRSG می‌رود و با کاهش دما، در دمای ۱۹۱.۶°C از آن خارج می‌شود و بخاری با نرخ جریان ۴.۰۸۵ kg/s، دمای ۴۹۰°C و فشار ۵۰ اتمسفر تولید می‌شود. این بخار به توربین بخار فرستاده شده و منجر به تولید ۴۳۱۷kW توان می‌گردد. جریان خروجی از توربین بخار دارای دما و فشار ۳۸.۷۴°C و ۰.۰۶۸۹ اتمسفر می‌باشد. این جریان پس از گذر از پمپ و افزایش فشار به ۵۱.۱۲ اتمسفر دوباره وارد سیستم HRSG می‌شود. در این طرح، مجموعاً ۱۲۱۵۷ kW توان خالص تولید می‌شود که بازده خالص را به ۴۱.۲۳٪ می‌رساند (۱۷).

سیستم HRSG در این سیکل به‌منظور تولید بخار برای توربین بخار می‌باشد و از آن برعکس دو سیکل دیگر که دارای سیستم HRSG بودند، برای مصارف آب گرم یا بخار مورد نیاز در کارخانه استفاده نمی‌گردد و تماما صرف تولید توان می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]



شکل ۷. تولید توان در سیکل ترکیبی گاز و بخار با استفاده از گاز زائد خروجی شرکت دوده‌فام (۱۷)

۴. نتایج و بحث

گاز زائد خروجی در این فرآیند، بسیار خطرناک بوده و تاثیرات منفی نظیر خورندگی و آسیب رساندن به قطعات و مسمومیت را در پی دارد. اکثر کارخانه‌ها برای جلوگیری از آسیب‌ها، این گاز را در flare می‌سوزانند و آن را در محیط زیست رها می‌کنند یا از گرمای حاصل از سوزاندن آن برای خشک کردن دوده استفاده می‌کنند. در این پژوهش از نصف این گاز خروجی از مجموعه دوده فام برای تولید توان استفاده شده و بقیه آن در flare یا خشک‌کن سوزانده شده است.

برق مورد نیاز کارخانه دوده‌فام حدودا ۶ MW می‌باشد که هر پنج سناریو قادر به تامین برق این کارخانه می‌باشند و مشکل کارخانه را در زمان کمبود برق حل می‌کند و مانع خاموشی کارخانه می‌شود. همچنین برق مازاد را در زمان عدم نیاز، می‌توان با داشتن قرارداد تضمینی با وزارت نیرو وارد شبکه کرد و از فروش آن درآمد مازادی برای کارخانه ایجاد کرد(۱۹). اطلاعات بدست آمده در «جدول (۲)» و «جدول (۳)» آمده است.

جدول ۲. مشخصات سوخت ورودی (۵, ۱۷)

نرخ جریان جرمی ورودی	دما	فشار	ارزش حرارتی (LHV)
۱.۱۴ kg/s	۲۳۱ °C	۱.۰۱۳ bar	۲۴۲۷۸.۳ kJ/kg

جدول ۳. مقایسه سناریوها (۱۷)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

	طرح	توان خالص تولید شده (kW)	حرارت تولید شده (kW)	تولید CO_2 شده (kg/h)	تولید SO_2 شده (kg/h)	بازده کل (٪)	سرمایه اولیه (USD)
۱	سیکل بخار	۵۱۴۵	-	۵۰۹۳	۱۳۳۸	۱۸.۴۸	۱۲۷۱۴۸۹۰
۲	سیکل گاز	۸۰۷۸	-	۵۳۷۴	۱۴۱۱.۹	۲۷.۴۱	۹۷۷۰۸۳۷
۳	سیکل بخار به همراه سیستم HRSG	۵۲۷۰	۲۹۱۳.۱	۵۰۹۳	۱۳۳۸	۲۹.۳۹	۱۳۶۶۸۲۴۰
۴	سیکل گاز به همراه سیستم HRSG	۷۹۳۴	۱۸۶۰۰.۵	۵۳۸۲	۱۴۱۳.۹	۸۹.۹	۲۳۸۴۵۰۰۰
۵	سیکل ترکیبی	۱۲۱۵۷	-	۵۳۷۷	۱۴۱۲.۶	۴۱.۲۳	۲۴۳۸۱۸۱۰

توان خالص تولیدی از طرح سیکل بخار MW ۵/۱۴۵ و بازده خالص طرح ٪ ۴۸/ ۱۸است. این سیکل قابلیت پاســـخگویی به نیاز برق کارخانه را ندارد. انتشـــار آلاینده‌هایی همچون CO_2 و SO_2 در این طرح به ترتیب kg/h ۵۰۹۳ و kg/h ۱۳۳۸ می‌باشـد و نسـبت به سـیکل گاز ۳۰٪ سـرمایه بیشـتر احتیاج دارد. توان خالص تولیدی از طرح سـیکل گاز MW ۸/۰۷۸ و بازده خالص طرح ٪ ۲۷/۴۱ اسـت. این سـیکل قابلیت پاسـخگویی به نیاز برق کارخانه را دارد. انتشـار آلاینده‌هایی همچون CO_2 و SO_2 در این طرح تقریباً ۵/۵ ٪ بیشـتر از طرح بخار می‌باشـد و دارای کمترین میزان سـرمایه‌گذاری نسـبت به دیگر طرح‌ها (۹۷۷۰۸۳۷ USD) است.

در صـورتی که از سیسـتم HRSG برای تولید بخار در کنار سـیکل بخار اسـتفاده شـود، MW ۵/۱۴۵ توان و MW ۲۹۱۳/۱ حرارت تولیـد می‌گردد و بـازده خـالص طرح ٪ ۲۹/۳۹ خواهـد بود و ۷/۵ ٪ سرمایه بیشتری نسبت به سیکل بخار احتیاج دارد. در مقایسه دو طرح دارای سیکل بخار، طرح دارای سیستم HRSG انتخاب معقول‌تری می‌باشد، چراکه علاوه بر برق با تولید حرارت می‌تواند گرمایش یا

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

آب گرم مورد نیاز کارخانه را تامین کند. حتی می‌توان به واحدهای نزدیک کارخانه آن را فروخت و در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد و آلاینده کمتری تولید کرد.

در صورتی که از سیستم HRSG برای تولید بخار در کنار سیکل گاز استفاده شود، ۷/۹۳۴ MW توان و ۱۸۶۰۰/۵ MW حرارت تولید می‌گردد و بازده کل طرح ٪ ۸۹/۹ خواهد بود. میزان آلاینده تولیدی تفاوت چندانی با طرح سیکل گازی ندارد. این در حالی است که ۱۴۴ ٪ سرمایه بیشتری نسبت به سیکل گاز احتیاج دارد. در صورتی که برای تولید توان بیشتر از سیکل بخار و گاز به صورت همزمان استفاده شود، ۱۲/۱۵۷ توان تولید می‌شود و بازده کلی طرح ۴۱/۲۳ ٪ خواهد بود. میزان آلاینده تولیدی تفاوت چندانی با طرح سیکل گازی ندارد. این در حالی است که ۱۴۹/۵ ٪ سرمایه بیشتری نسبت به سیکل گاز احتیاج دارد. طرح آخر با تولید توان بیشینه، بیشترین درآمد و سود را می‌توان انتظار داشت.

برای انتخاب بین نیروگاه بخار و نیروگاه گازی جهت تولید برق از گاز خروجی فیلتراسیون (tail gas) تولیدی در فرآیند تولید دوده صنعتی، باید چندین فاکتور کلیدی مورد بررسی قرار گیرد. هر یک از این نیروگاه‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. انتخاب نهایی به شرایط و خصوصیات گاز زائد خروجی و نیازهای عملیاتی بستگی دارد. این فاکتورها شامل ترکیب و ویژگی‌های گاز زائد، بازدهی و عملکرد، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، پتانسیل بازیابی حرارت و اثرات محیط‌زیستی و نیاز کارخانه می‌باشد.

با توجه به ترکیبات گاز زائد و موارد ذکر شده در بالا، بهترین طرح برای کارخانه دوده‌فام، طرح ۴ و ۵ می‌باشد. با وجود اینکه هزینه‌های اولیه نیروگاه بیشتر است، در این دو طرح بازده کلی بیشتر است که علاوه بر تامین برق کارخانه، قادر به درآمدزایی از طریق فروش برق به شبکه و حرارت به کارخانجات مجاور می‌باشد. در نهایت سیکل نهایی بایستی با درنظر گرفتن نیاز کارخانه و البته میزان توان سرمایه‌گذاری کارخانه انتخاب شود.

وزارت نیرو در خصوص قیمت خرید برق از نیروگاه‌هایی که از گاز فلر یا زائد استفاده می‌کنند و برق تولید می‌نمایند مصوبه‌ای تاکنون ابلاغ ننموده است. با این حال در تاریخ ۱۴۰۲/۰۹/۱۲ مصوبه‌ای به شماره ۱۴۰۲/۲۰۴۵۹۱۶/۱۰۰ از طرف وزارت نیرو ابلاغ شده است که در بخش زیست توده آن، برق تولیدی از کلیه فرایندهای حرارتی نظیر گازی‌سازی و زباله‌سوزی را به بیشترین میزان و هر

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

کیلووات به مقدار پایه ۳۰۰۰ تومان متعهد به خرید شده است. از طرفی مطابق با اعلام مدیر شرکت توانیر در فروردین سال ۱۴۰۳، از ابتدای اردیبهشت تا آخر مهر ماه ۱۴۰۳، نرخ خرید هر کیلووات برق برای نیروگاه‌های کوچک مقیاس در ساعات اوج مصرف معادل ۹۰۸ تومان اعلام شده است.(۴) در حال حاضر طبق نظر هئیت مدیره انجمن ساتکا شرکت‌هایی که بیش از MW ۱ مصرف برق دارند بایستی ۵٪ از برق مورد نیاز خود را به برق سبز اختصاص دهند (۲۰). در فصل زمستان سال ۱۴۰۳ برق سبز به قیمت تابلو ۳۸۰۰ تومان معامله شده است. این عدد در تابستان ۱۴۰۳ در نزدیکی ۵۰۰۰ تومان بوده است (۲۱, ۲۲). در صورتی که برق حاصل از این فرآیند که سبب کاهش آسیب‌های محیط زیستی می‌گردد به عنوان برق سبز لحاظ گردد، اجرای این طرح‌ها با دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تری همراه خواهد بود. اکنون به دلیل قیمت پایین برق خریداری شده از شبکه، قیمت خرید پایین برق تولیدی، قیمت سوخت گاز طبیعی پایین، اجرای طرح‌های بازیافت انرژی با استقبال مناسبی همراه نیست. با توجه به ناترازی برق و گاز در کشور، پیش‌بینی می‌گردد در آینده نه چندان دور، شرکت‌های تولیدی به بازیافت انرژی ترغیب گردند.

در «جدول(۳)»، ستون آخر، مقادیر هزینه اولیه برای احداث هر سیکل در نرم‌افزار ترموفلکس به صورت تقریبی ذکر شده است(۱۷). به گزارش برق نیوز در سال ۱۴۰۲، هزینه احداث نیروگاه‌های مقیاس کوچک به ازای هر مگاوات بین ۲۰ الی ۲۵ میلیارد تومان می‌باشد.(۲۳)

در سیکل ترکیبی، تولید برق توسط خود کارخانه انجام می‌گیرد و عدم نیاز به برق شبکه و خرید آن موجب صرفه‌جویی و عدم پرداخت هزینه برای برق شده و فروش برق اضافه به شبکه موجب درآمدزایی برای کارخانه می‌شود (۱۹). در سیکل گاز به همراه سیستم HRSG علاوه بر تامین برق کارخانه و فروش مازاد آن به شبکه، بخار آب و آب گرم مصرفی کارخانه را تامین کرده و از مصرف گاز مجدد برای تولید آن به روش دیگر جلوگیری می‌کند. در واقع در این بخش صرفه‌جویی در مصرف گاز موجب درآمد زایی می‌شود. در سیکل گاز به همراه سیستم HRSG علاوه بر تامین برق کارخانه و فروش مازاد آن به شبکه، بخار آب و آب گرم مصرفی کارخانه را تامین کرده و از مصرف گاز مجدد برای تولید آن به روش دیگر جلوگیری می‌کند. در واقع در این بخش صرفه‌جویی در مصرف گاز موجب درآمد زایی می‌شود. با توجه به محاسبات انجام شده در نرم‌افزار ترموفلکس(۱۷)، برای تولید بخار این مجموعه، به ۱۲.۴ kg/s گاز طبیعی نیاز است که با وجود سیستم HRSG، این

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

میزان صـرفه‌جویی می‌گردد. نرخ گاز مصـرفی در صـنایع تولید دوده در مهر ماه سـال ۱۴۰۳ معادل ۳۷۹۳۱ ریال می‌باشـد (۲۴). لازم به ذکر اسـت که این امکان سـنجی اولیه و مفهومی بوده و به مرحله اجرا نزدیک نشده است. به همین علت داده‌ها محدود می‌باشند.

همچنین در مقایسه با موارد مشابه می‌توان به کارخانه تولید دوده صنعتی در استان جینینگ چین اشاره کرد که جزئیات آن در «جدول (۴)» آمده اسـت. ظرفیت تولید دوده کارخانه چینی ۱۵۰۰۰۰ تن در سـال می‌باشـد که حدودا ۲.۵ برابر ظرفیت تولید دوده‌فام می‌باشـد. با این حال به علت تفاوت در ترکیبات گاز زائد دارای ارزش حرارتی تفاوتی می‌باشـد؛ ارزش حرارتی گاز زائد دوده‌فام معادل ۲۴۶۴۵.۳۱ kJ/kg و نمونه چینی معادل ۱۹۰۱.۴۸۴ kJ/kg می‌باشـد. مطابق شـبیه‌سـازی‌های داخل پژوهش و مقایسـه دو سـیکل بخار این دو کارخانه، بنظر می‌رسـد کارخانه دوده‌فام با وجود ظرفیت کمتر تولید دوده، گاز ارزشـمندتری داشـته و پتانسـیل تولید برق بیشـتری را دارد. به این شـکل که حداکثر میزان تولید برق خالص در سیکل بخار کارخانه چینی معادل ۷۵۳۲kW و کارخانه دوده‌فام با ظرفیت تولید کمتر از نصف آن ۶۴۳۴kW برق خالص در سیکل بخار تولید کرده است. شواهد نشان می‌دهند کارخانه دوده‌فام به دلیل ارزش حرارتی بیشتر گاز زائد آن، پتانسیل تولید برق بیشتری را دارد.

جدول ۴. ترکیبات و ارزش حرارتی گاز زائد (۳, ۱۶, ۱۷)

دوده فام		شرکت چینی	
ترکیبات	درصد	ترکیبات	درصد
N_2	۲۷.۵۵	N_2	۰.۳۷۴۴
O_2	۰.۴۷	O_2	۰.۰۲۴۹
SO_2	۰.۰۹	H_2O	۰.۴۱۰۳
H_2S	۱۰.۸۵	CO_2	۰.۰۲۸۷
C_2H_6	۱۴.۵۸	CO	۰.۰۷۴
C_2H_2	۸.۳۲	H	۰.۰۸۷۵
CH_4	۱۲.۳۵	CH_4	ناچیز
H_2	۲۲.۷۴	H_2S	ناچیز

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

CO	۱.۲	SO_2	ناچیز
CO_2	۱.۲۶		
NO_x	۰.۴۱		
Ar	۰.۱۸		
ارزش حرارتی	۲۴۶۴۵.۳۱kJ/kg	ارزش حرارتی	۱۹۰۱.۴۸۴ kJ/kg
برق خالص تولیدی در سیکل بخار	۶۴۳۴ kW	برق خالص تولیدی در سیکل بخار	۷۵۳۲kW
ظرفیت کارخانه	۶۰۰۰۰ تن در سال	ظرفیت کارخانه	۱۵۰۰۰۰ تن در سال

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی ایجاد ارزش افزوده از جریان گاز زائد خروجی از مجموعه صنعتی دوده فام با هدف دستیابی به نیاز ۶ مگاواتی برق کارخانه مورد بررسی قرار گرفته شده است. بدین منظور پنج طرح مختلف تولید توان شامل سیکل‌های بخار، گاز و ترکیبی به همراه سیستم HRSG در بسته نرم افزاری ترموفلکس شبیه‌سازی شده است. در همه طرح‌ها ۵۰٪ از گاز زائد خروجی جهت تولید توان و ۵۰٪ باقی مانده جهت خشک کردن دوده در نظر گرفته شده است. ارزش حرارتی گاز kJ/kg ۲۴۶۴۵.۳۱ است معادل با ۶۸.۵٪ از ارزش حرارتی گاز طبیعی لحاظ شده است. نتایج حاصل از پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- این مطالعه نشان داد که استفاده از گاز زائد حاصل از فرآیند تولید دوده می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی پایدار و اقتصادی برای تأمین نیازهای برق کارخانه دوده‌فام باشد. با توجه به تأثیر مستقیم ترکیب و ویژگی‌های گاز زائد بر عملکرد و بازده نیروگاه، کارخانه دوده‌فام با وجود ظرفیت تولید کمتر، پتانسیل بالاتری برای تولید برق نسبت به نمونه مشابه چینی دارد.
- بهترین طرح برای کارخانه دوده‌فام از لحاظ بازده، تولید برق، بخار و زیست محیطی، طرح سیکل ترکیبی و سیکل گازی به همراه سیستم HRSG می‌باشد. با وجود اینکه هزینه‌های

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

اولیه نیروگاه بیشتر است، در این دو طرح بازده کلی بیشتر است که علاوه بر تامین برق کارخانه، قادر به درآمدزایی از طریق فروش برق به شبکه و حرارت به کارخانجات مجاور می‌باشد. در نهایت سیکل نهایی بایستی با درنظر گرفتن نیاز و البته میزان توان سرمایه‌گذاری کارخانه انتخاب شود.

- در صورتی که صرفا تامین نیاز کارخانه به برق و کمترین سرمایه‌گذاری اولیه مد نظر باشد، طرح سیکل گازی بهترین گزینه خواهد بود که علاوه بر تامین برق کارخانه، کمترین سرمایه‌گذاری لازم را احتیاج دارد.

- در صورتی که برای تولید توان بیشتر از سیکل بخار و گاز به صورت همزمان استفاده شود، ۱۲/۱۵۷ MW توان تولید می‌شود و بازده کلی طرح ۴۱/۲۳ ٪ خواهد بود. میزان آلاینده تولیدی تفاوت چندانی با طرح سیکل گازی ندارد. این در حالی است که ۱۴۹/۵ ٪ سرمایه بیشتری نسبت به سیکل گاز احتیاج دارد.

- در صورتی که از سیستم HRSG برای تولید بخار در کنار سیکل گاز استفاده شود، MW ۷/۹۳۴ توان و MW ۱۸۶۰۰/۵ حرارت تولید می‌گردد و بازده کل طرح ۸۹/۹ ٪ خواهد بود. میزان آلاینده تولیدی تفاوت چندانی با طرح سیکل گازی ندارد. این در حالی است که 144 ٪ سرمایه بیشتری نسبت به سیکل گاز احتیاج دارد.

- این تحقیق اظهار دارد که با توجه به ناترازی انرژی در کشور، کاربرد فناوری‌های بازیافت انرژی در صنایع می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای مواجهه با چالش‌های انرژی کشور محسوب شود . با لحاظ کردن تغییرات قیمت برق و مقررات وزارت نیرو، ایجاد زیرساخت برای بهره‌برداری از گاز زائد به عنوان برق سبز می‌تواند به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و بهبود وضعیت اقتصادی کارخانجات کمک کند .

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

۶. فهرست علائم

علائم انگلیسی

E انرژی، kW

LHV ارزش حرارتی پایین، kJ/kg

علائم یونانی

η بازدهی ٪

زیرنویس

in ورودی

out خروجی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

۷. منابع

۱. Farzin S. Analysis and review of carbon black industry in iran and the world in persian. 2022.

۲. Gerhard Kuhner MV. manufacture of carbon black. 2018.

۳. Fabian Rosner TB, Daniel S. Slaughter, Vassilia Zorba, Jennifer Stokes-Draut. Techno-economic and carbon dioxide emission assessment of carbon black production. 2024.

٤. Lee T-H, Huang S-R, Chen C-H. The experimental study on biogas power generation enhanced by using waste heat to preheat inlet gases. Renewable Energy. 2013;50:342–7.

٥. Doodeh Fam Co .information. 2024.

٦. Oday A. Production of carbon black 2022.

۷. Aditya Birla group carbon black information. www.birlacarbon.com2023.

۸. Phillips Carbon Black Limited information. www.pcblltd.com2023.

۹. Crews DC, Bello AK, Saadi G. 2019 World Kidney Day Editorial-burden, access, and disparities in kidney disease. SciELO Brasil; 2019. p. 1-09.

۱۰. Lee J. Selection and specification of combine heat and power system for a carbon black manufacturer. Cogeneration & Distributed generation journal 2007.

۱۱. Haghighat S. Feasibility Study and Economic Analysis of Utilizing Combined Heat and Power Systems in Gypsum Production Line Semnan University; 2014.

۱۲. Babagolzadeh M. Analysis of heat recovery for production of electrical energy in energy-intensive industries in persian. 2017.

۱۳. Daniel Gewald KS, Sotirios Karellas, Hartmut Spliethoff. Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant. 2012.

۱٤. Tsung-Han Lee S-RH, Chiun-Hsun Chen. The experimental study on biogas power generation enhanced by using waste heat to preheat inlet gases. 2013.

۱٥. Antti Uusitalo vU, Aki Gronman, Mika Luoranen, Ahti Jaatinen-Varri. Greenhouse gas reduction potential by produscing electricity from biogas engine waste heat using organic Rankine cycle. 2016.

۱٦. Doodeh Fam Co. information Sadaf-cb.com2024.

۱۷. Gewald D, Siokos K, Karellas S, Spliethoff H. Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012;16(4):1779-89.

۱۸. Uusitalo A, Uusitalo V, Grönman A, Luoranen M, Jaatinen-Värri A. Greenhouse gas reduction potential by producing electricity from biogas engine waste heat using organic Rankine cycle. Journal of Cleaner Production. 2016;127.

۱۹. Electricity purchase tariff from small scale power plants. [Internet]. https://otaghiranonline.ir/news/69597-تعرفه-خرید-برق-از-نیروگاه-های-کوچک-مقیاس-به-۹۰۸-تومان-افزایش. ۲۰۲٤.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]

.۲۰ Requirement to supply 1 to 5% of electricity for industries from renewable energy [Internet]. https://36972888.khabarban.com. 2023.
.۲۱ https//:iee.ir/PowerMarket/TradeBoard. 2025.
.۲۲ green-panel-electricity-price. 2025.
.۲۳ The construction cost of each megawatt of small scale power plant [Internet]. 2023.
.۲٤ The new feed price of petrochemical and industrial fuel companies was announced [Internet]. https://www.imna.ir/news/805838-های-شرکت-خوراک-جدید-قیمت/ پتروشیمی-و-سوخت-صنایع-اعلام-شد. ۲۰۲٤.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-05-31]