مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاستگذاری انرژی
سال یکم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۲، صفحات ۷۸-۵۷

مدلسازی سیستم بازیافت انرژی جهت تولید توان بهینه از گاز متان رقیق درمعدن زغال‌سنگ طبس ایران

سارا کاظم
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی، دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات تهران
sara.kazem@gmail.com

هومن فرزانه
دانشیار گروه مهندسی انرژی، دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات تهران
info@hfarzaneh.com

در این مقاله با استفاده از یک مدل برنامه ریزی ریاضی به کمک نرم افزار شبیه‌سازی Hysys و بهینه‌سازی Gams به بررسی فنی و اقتصادی یک مدل جهت تولید توان الکتریکی بهینه از احتراق کاتالیستی گاز متان رقیق موجود در بستر معدن زغال سنگ طبس ایران پرداخته شده است. این مدل با بکار بردن ترکیبی با غلظت حجمی ۱ درصد گاز متان در سیستم توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و ترکیب آن با یک موتور گازی اجرا شده است. نتایج اجرای این مدل برای معدن زغال‌سنگ مذکور منجر به تولید ۸۰۸۸ کیلووات توان الکتریکی می‌شود که در حدود ۷۵ درصد از نیاز الکتریسیته این معدن تأمین خواهد شد. از نظر اقتصادی نیز نرخ بازگشت سرمایه ۳۶ درصد بوده که نشان دهنده جذابیت بالای سرمایه‌گذاری در این زمینه است.

واژه‌های کلیدی: *بهینه‌سازی، توربین گازی رقیق‌سوز کاتالیستی، سیستم بازیافت انرژی، گاز متان معدن زغال‌سنگ.*

* **تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۷** **تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/٤/۸**

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

۱. مقدمه

گاز موجود در بستر معادن زغال سنگ یک شکل از ذخایر گاز طبیعی است که از بسترهای زغال سنگ استخراج می‌شود. در دهه های اخیر، این گاز در بسیاری از کشورهای جهان یک منبع مهم انرژی به شمار می آید و عمدتاً از متان به همراه مقادیر مختلفی از اتان، نیتروژن و دی اکسید کربن تشکیل شده است [۳]. گاز متان در ارتباط با فعالیت معدنکاری در بسیاری از سایتهای معادن زغال سنگ تولید می‌شود و تولید آن همراه با چالشهای محیط زیستی مخربی مانند تخلیه به اتمسفر و مشارکت در گرمایش جهانی میباشد [۱۴]. با توجه به نیازمندی بالای معادن زغال سنگ به الکتریسیته، این معادن می‌توانند گاز متان را بازیافت کرده و به کمک سیستمهای بازیافت انرژی، تولید الکتریسیته نمایند که این امر منجر به صرفه جویی اقتصادی قابل توجه و کاهش انتشارات گازهای گلخانه ای می‌شود [۲]. گاز متان موجود در بستر زغال سنگ از طریق دو جریان منتشر می‌شود: (۱) گاز متان موجود در جریان هوای تهویه (VAM[1]) با غلظت ۱ – ۰/۱ درصد متان و (۲) گاز متان موجود در جریان تخلیه شده از درزها و شکافهای معدن قبل و بعد از عملیات معدنکاری (Drainage Gas) با غلظت ۹۵ – ۶۰ درصد متان. جریان گاز تخلیه شده می‌تواند برای تولید الکتریسیته به طور مستقیم استفاده شود [۳]. مسأله مهم و اصلی استفاده از جریان گاز تخلیه شده در ارتباط با استخراج دوره‌ای آن از معدن می‌باشد. همچنین گاز متان موجود در جریان هوای تهویه شده معدن مشکلترین منبع تأمین متان برای استفاده به عنوان منبع انرژی می‌باشد. زیرا حجم هوا زیاد و منابع متان رقیق و دارای غلظت و دبی متغیر میباشد. به دلیل غلظت کم متان در جریان هوای تهویه، تکنولوژی‌های مؤثر و کارآمد برای بکار بردن این گاز و تولید الکتریسیته مورد نیاز خواهد بود. ترکیب کردن جریان‌های هوای تهویه و گاز تخلیه شده و تولید مخلوط با غلظت کافی از متان امکان‌پذیر است. این مخلوط می‌تواند به عنوان سوخت در فرآیند احتراق گاز متان رقیق مانند توربین گازی رقیق‌سوز برای تولید توان الکتریکی مورد نیاز معدن در محل سایت استفاده شود [۱۱].

۲. مطالعات گذشته

تکنولوژی‌های کاهش دادن اثر گاز گلخانه ای و استفاده از گاز متان موجود در بستر معادن زغال‌سنگ توسط Shi Su et al. مورد مطالعه قرار گرفته است. بر طبق آن احتراق کاتالیستی و حرارتی به عنوان دو مکانیسم اجرایی اصلی برای تولید توان از گاز متان رقیق بستر معدن زغال‌سنگ معرفی شده است و

1. Ventilation Air Methane

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

همچنین یک ارزیابی فنی از این تکنولوژی‌ها برای استفاده در معدن زغال سنگ کوئینزلند استرالیا به همراه ارزیابی اقتصادی اولیه از بعضی تکنولوژی‌ها در جهت امکان‌سنجی فنی و اقتصادی ارائه شده است [۱۲].

مطالعه روی تولید توان الکتریکی از گاز متان موجود در بستر معدن زغال‌سنگ به کمک احتراق حرارتی در سیستم توربین گازی رقیق‌سوز رکوپراتوری توسط آقای فرزانه و همکاران انجام گرفته است. این مدل با مشخص کردن خصوصیات ترمودینامیکی بهینه سیتم تولید توان الکتریکی با بکار بردن یک مخلوط با غلظت حجمی ۱/۶ درصد گاز متان در یک سیستم توربین گازی رقیق‌سوز رکوپراتوری و ترکیب آن با یک موتور گازی جهت تولید توان بیشتر از گاز متان موجود در بستر معادن زغال سنگ بکار گرفته شده است [۵].

تحقیقات بیشتر اخیراً روی تولید توان از گاز متان رقیق معدن زغال سنگ با در نظر گرفتن احتراق کاتالیستی متمرکز شده است که از جمله آن می‌توان به تحقیق انجام شده توسط Su و Agnew اشاره کرد. در این تحقیق راکتورهای یکپارچه بستر کاتالیستی که دارای خصوصیات بهتری برای کاربرد تولید توان الکتریکی در مقایسه با راکتورهای بستر ثابت و بستر سیالی هستند، معرفی شده‌اند [۱۳].

در مرجع [۸] نتایج مطالعه روی خصوصیات ترمودینامیکی سیستم توربین گازی رقیق سوز با احتراق کاتالیستی با انجام دادن تحلیل عملکرد حرارتی سیکل توربین گازی ارائه شده و نشان داده شده است که افزایش یافتن نسبت فشار در کمپرسور منجر به افزایش یافتن غلظت گاز متان در جریان هوای ورودی می‌شود، هنگامی که دمای ورودی به توربین تنظیم می‌شود و نیز هرچه نسبت فشار بالاتر باشد، راندمان حرارتی نیز بالاتر است.

ارزیابی احتراق و عملکرد ترمودینامیکی یک سیستم توربین گازی رقیق سوز با احتراق کاتالیستی توسط Yin و Weng نیز انجام شده است. خصوصیات این سیستم با بکار بردن یک مدل راکتور Plug Flow یک بعدی ناهمگی ارزیابی شده است. نتایج اصلی نشان دادند که شبیه‌سازی با مدل Plug Flow یک بعدی ناهمگن رفتار احتراق کاتالیستی را به خوبی نشان می‌دهد و همچنین درجه حرارت ورودی به توربین مهم‌ترین پارامتری است که عملکرد احتراق کاتالیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۹].

به منظور تکمیل کردن مطالعات انجام شده در گذشته، در این مقاله یک مدل سیستم بازیافت انرژی جهت تولید توان الکتریکی بهینه از گاز متان رقیق موجود در بستر معدن زغال سنگ طبس در

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

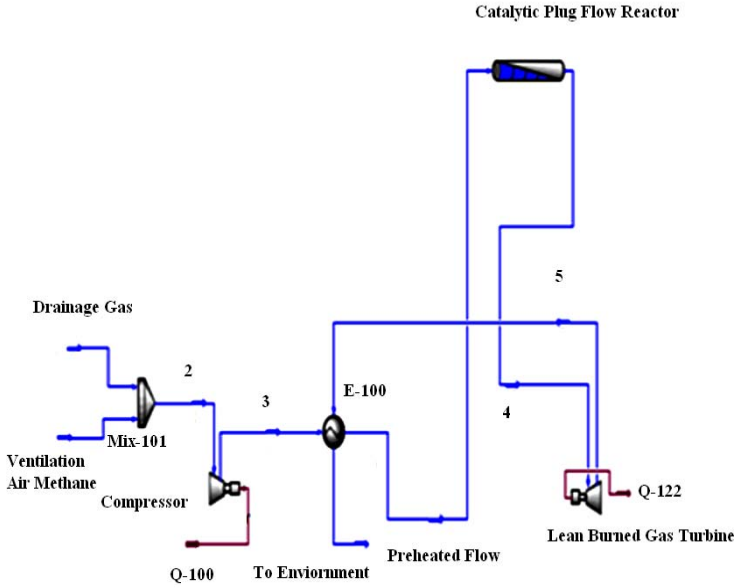
ایران توسعه داده شده است به منظور (۱) پیش بینی خصوصیات ترمودینامیکی بهینه احتراق کاتالیستی یک مخلوط با غلظت حجمی ۱ درصد گاز متان با ترکیب جریان هوای تهویه (VAM) و جریان گاز تخلیه شده (Drainage Gas) با بکار بردن سیستم توربین گازی رقیق سوز با احتراق کاتالیستی بر اساس شرایط واقعی سایت معدن، (۲) ارزیابی کردن اثر جنبه‌های اقتصادی روی رفتار فنی سیستم تولید توان الکتریکی و (۳) مطالعه رقابت بین توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و دیگر سیستم‌های کوچک تولید توان مانند موتور گازی برای تولید توان الکتریکی عملی و امکان‌پذیر در یک شرایط از پیش تعیین شده سایت معدن زغال سنگ.

۳. شبیه سازی ترمودینامیکی سیستم تولید توان الکتریکی

فرآیندی که برای تولید توان الکتریکی از ترکیب جریان هوای تهویه شده معدن (Ventilation Air Methane) حاوی گاز متان با غلظت پایین و جریان گاز تخلیه شده از معدن (Drainage Gas) حاوی گاز متان با غلظت بالا بکار میرود در شکل (۱) نشان داده شده است. برای عملکرد پیوسته و پایدار این سیستم، غلظت گاز متان در مخلوط سوخت و هوا نمیبایست از ۱ درصد حجمی کمتر باشد [۸]. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، دو جریان ورودی تغذیه شامل جریان هوای تهویه و جریان گاز تخلیه وارد یک مخلوط کننده می‌شوند. در این مخلوط کننده، مخلوطی از گاز غلیظ و رقیق به وجود می آید که غلظت گاز متان آن، جهت تولید توان الکتریکی به ۱ درصد حجمی می‌رسد (خط جریان ۲). سپس مخلوط سوخت و هوا در کمپرسور فشرده شده (خط جریان ۳) و بعد از آن در یک مبدل حرارتی (رکوپراتور) از نوع پوسته و لوله توسط گازهای داغ خروجی از توربین پیش گرم میشود (خط جریان Preheated Flow) و از طریق لوله های فولادی ضد زنگ به محفظه احتراق کاتالیستی که یک راکتور کاتالیستی از نوع Plug Flow است، تزریق میشود تا با رسیدن به دمای خود اشتعالی مخلوط سوخت و هوا که در حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد است، احتراق آغاز شود. خصوصیات احتراق رقیق سوز کاتالیستی با بکار بردن یک مدل راکتور کاتالیستی Plug Flow یک بعدی ناهمگن ارزیابی میشود. در این سیستم، پالادیوم که روی اکسید آلومینیوم نگهداری می‌شود، به علت دارا بودن فعالیت بهتر در مقایسه با سایر کاتالیست‌های فلزی به عنوان کاتالیست جهت احتراق کاتالیستی گاز متان رقیق بکار برده می‌شود. یک مشعل کوچک برای محترق ساختن مخلوط سوخت و هوا تنها در ابتدای فرآیند بکار گرفته می‌شود. در نهایت گاز محترق شده وارد توربین گازی می‌شود (خط جریان ۴) و پره‌های توربین را برای تولید توان الکتریکی به حرکت درمی‌آورد. جریان گاز تخلیه شده باقیمانده که

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

دارای گاز متان با غلظت بالاتر در مقایسه با جریان هوای تهویه است، در محفظه احتراق یک موتور گازی برای تولید توان الکتریکی بیشتر سوزانده می‌شود. جدول (۱) خواص ترمودینامیکی - سیالاتی خطوط جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شبیه سازی ترمودینامیکی سیکل توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و بازیافت گاز معدن زغال سنگ طبس

جدول ۱. خواص ترمودینامیکی خطوط جریان سیکل توربین گازی رقیق سوز با احتراق کاتالیستی

شماره خط جریان	VAM	Drainage	۲	۳	Preheated Flow	۴	۵	Env.
دبی جرمی (kg/s)	۵۳/۸	۰/۸۲۳	۵۴/۷۲	۵۴/۷۲	۵۴/۷۲	۵۴/۷۲	۵۴/۷۲	۵۴/۷۲
دما (˚C)	۳۰	۳۰	۳۰	۱۳۸/۱	۴۹۰	۷۳۷/۶	۵۲۱/۵	۱۷۳/۷
فشار (kP)	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۵	۴۰۰	۳۷۰	۳۵۱/۵	۱۱۰	۱۰۵

مأخذ: نتایج تحقیق.

مفهوم مدل

مدل سیستم بازیافت انرژی ذکر شده، جهت توصیف امکان سنجی فنی و اقتصادی سیستم تولید توان الکتریکی به عنوان یک بنگاه اقتصادی از طریق استقرار یک سیستم با حداقل هزینه کلی شامل

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی تحت قیود فنی و اقتصادی توسعه داده شده است. این مدل همچنین برای مشخص کردن میزان تولید توان الکتریکی بهینه از گاز متان رقیق موجود در بستر معدن زغال سنگ طبس با تعیین کردن فرم صریح تابع کلی سیستم بکار گرفته میشود. این امر معمولاً با معین کردن تابع کلی سیستم به عنوان تابعی از تعداد زیادی از پارامترهای پیچیده سیستم بدست می‌آید و بنابراین یک فرم غیرخطی و پیچیده را نشان می‌دهد. از این رو اجرای تئوری یکپارچه سازی سیستم با تفکیک کردن کل سیستم به معادلات ساده‌تر امکان پذیر است [۵]. بنابراین مینیموم کردن تابع هدف تحت مجموعه ای از معادلاتی که همزمان می‌بایست حل شوند، برای نشان دادن رفتار فنی بهینه سیستم تولید توان جهت تولید توان الکتریکی مورد تقاضا در سایت توسعه داده میشود.

تابع هدف مدل

تابع هدف مدل با معادله شماره (۱) نمایش داده می‌شود [۵]:

$$TC = \left[(C_c + C_i) \left(\frac{i(1+i)^n}{(i+1)^n - 1} \right) + f_u C_p \right] P_t \qquad (۱)$$

در رابطه شماره (۱)، C_c، C_i، C_p، i، n، f_u و P_t به ترتیب عبارتند از : هزینه سرمایه گذاری سیستم، هزینه نصب تجهیزات، هزینه عملیاتی سالیانه تجهیزات، نرخ تنزیل، طول عمر سیستم، فاکتور کارآیی سیستم و توان الکتریکی کلی تولید شده توسط سیستم. فاکتور $\frac{i(1+i)^n}{(i+1)^n-1}$ ، فاکتور بازیافت سرمایه [1] نامیده میشود که در حقیقت سرمایه کلی (TC) را با توجه به نرخ تنزیل (i) در مدت (n) دوره که طول عمر سیستم می‌باشد، به پرداخت‌های مساوی توزیع میکند . لازم به ذکر است که هزینه‌های سرمایه گذاری و نصب تجهیزات فقط در سال اول پرداخت می‌شود و هزینه عملیاتی سالیانه تجهیزات شامل هزینه‌های تعمیر و نگهداری سیستم‌ها به صورت سالیانه پرداخت می‌شود.

قیود مدل

سیستم تولید توان الکتریکی شامل مخلوط کننده، کمپرسور، رکوپراتور (پیش گرمکن)، محفظه احتراق کاتالیستی، توربین گازی رقیق‌سوز، ژنراتور و موتور گازی است. معادلات بقای جرم و انرژی

1. Capital Recovery Factor (CRF)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

به عنوان قیود مدل در نظر گرفته می‌شوند که با توجه به محدودیتها و قوانین فنی و ترمودینامیکی حول هر کدام از تجهیزات (حجم کنترلها)، در ذیل ارائه شده است [۵،۸ و۹].

مخلوط کننده

(۲)

$$m_1 h_1^{T,P} + m_2 h_2^{T,P} = m_3 h_3^{T,P}$$

کمپرسور

(۳)

$$m_4 h_4^{T,P} - m_3 h_3^{T,P} = \frac{m_3 \dot{W}_c}{\eta_c}$$

(۴)

$$T_4 = T_3 + T_3 \left(\frac{(r_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_c} \right)$$

(۵)

$$P_4 = P_3 r_c$$

(۶)

$$r_{c_{min}} < r_c < r_{c_{max}}$$

رکوپراتور (پیش گرمکن)

(۷)

$$m_4 h_4^{T,P} - m_5 h_5^{T,P} = m_8^{T,P} - m_7 h_7^{T,P}$$

(۸)

$$T_5 = \frac{\varepsilon cp_g (T_7 - T_4)}{cp_f} + T_4$$

(۹)

$$P_5 = P_4 - \Delta P_{rt}$$

(۱۰)

$$P_8 = P_7 - \Delta P_{rs}$$

(۱۱)

$$cp_f = x cp_1 + (1-x) cp_2$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

(۱۲)

$$cp_g \cong 1.13\ kJ/kg^{o}C$$

محفظه احتراق کاتالیستی

(۱۳)

$$T_6 = T_5 + \Delta T$$

(۱۴)

$$T_5 \geq T_{ignition}$$

(۱۵)

$$T_6 \leq TIT$$

(۱۶)

$$P_5 = (P_3 \times r_c) - \Delta P_{rt}$$

(۱۷)

$$P_6 = P_5 - PDE$$

(۱۸)

$$NCV_3 = xNCV_1 + (1-x)NCV_2$$

(۱۹)

$$x_{min} < x < x_{max}$$

(۲۰)

$$m_5 h_5^{T,P} + m_5 NCV_3 = m_6 h_6^{T,P}$$

توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی

(۲۱)

$$m_6 h_6^{T,P} - m_7 h_7^{T,P} = m_6 \eta_t \dot{W}_t$$

(۲۲)

$$T_7 = T_6 - \eta_t T_6 \left(1 - \left(\frac{1}{r_t}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)$$

(۲۳)

$$P_7 = \frac{P_6}{r_t}$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

(۲۴)

$$r_{t_{min}} < r_t < r_{t_{max}}$$

موتور گازی

$$m_9 h_9^{T,P} + m_{10} h_{10}^{T,P} + m_9 NCV_2 = \eta_{GE}(m_9 + m_{10})\dot{W}_{GE} \quad (۲۵)$$

$$\eta_{GE} = 1 - \frac{1}{r_{GE}^{(\frac{\gamma-1}{\gamma})}} \quad (۲۶)$$

$$r_{GE_{min}} < r_{GE} < r_{GE_{max}} \quad (۲۷)$$

تولید توان الکتریکی مورد نیاز در سایت و راندمان حرارتی سیکل

(۲۸)

$$P_t = m_3(\dot{W}_t - \dot{W}_c) + (m_9 + m_{10})\dot{W}_{GE}$$

(۲۹)

$$P_t \geq Q$$

(۳۰)

$$\eta_{th} = \frac{P_t}{m_3 NCV_3 + m_9 NCV_2}$$

در روابط بالا، $h^{T,P}$، $\dot{W}_c$، r_c، γ، η_c، ε، cp_f، cp_g، ΔT، ΔP_{rt}، ΔP_{rs}، PDE، TIT، NCV، x، $\dot{W}_t$، r_t، η_t، $\dot{W}_{GE}$، r_{GE}، η_{GE}، Q، η_{th}، m، T و P به ترتیب عبارتند از: آنتالپی ویژه جریان‌ها، کار ویژه مصرف شده در کمپرسور، نسبت تراکم کمپرسور، نسبت گرمای ویژه، راندمان کمپرسور، کارآیی رکوپراتور، گرمای ویژه جریان سوخت ورودی به رکوپراتور، گرمای ویژه جریان گاز خروجی از رکوپراتور، افزایش درجه حرارت در محفظه احتراق کاتالیستی، افت فشار در سمت لوله رکوپراتور (مبدل حرارتی)، افت فشار در سمت پوسته رکوپراتور، افت فشار در محفظه احتراق کاتالیستی، دمای ورودی به توربین، ارزش حرارتی خالص جریانها، کسر (جزء) جرمی جریان هوای تهویه شده معدن (VAM) در مخلوط سوخت، کار ویژه خروجی توربین، نسبت انبساط توربین، راندمان توربین، کار ویژه خروجی موتور گازی، نسبت فشار موتور گازی، راندمان موتور گازی، مقدار تقاضای کلی الکتریسیته معدن، راندمان حرارتی سیکل، دبی جرمی خطوط جریان، درجه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

حرارت خطوط جریان و فشار خطوط جریان. در این جدول همچنین شماره گذاری خطوط جریان به قرار زیر است:

(۱): جریان هوای تهویه شده معدن زغال سنگ (Ventilation Air Methane)

(۲): جریان گاز تخلیه شده از معدن زغال سنگ (Drainage Gas)

(۳): جریان خروجی از مخلوط کننده و ورودی به کمپرسور

(۴): جریان خروجی از کمپرسور و ورودی به رکوپراتور (پیش گرمکن) در سمت لوله

(۵): جریان خروجی از رکوپراتور در سمت لوله و ورودی به محفظه احتراق کاتالیستی

(۶): جریان خروجی از محفظه احتراق کاتالیستی و ورودی به توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی

(۷): جریان خروجی از توربین گازی و ورودی به رکوپراتور در سمت پوسته

(۸): جریان خروجی از رکوپراتور در سمت پوسته و ورودی به محیط اطراف

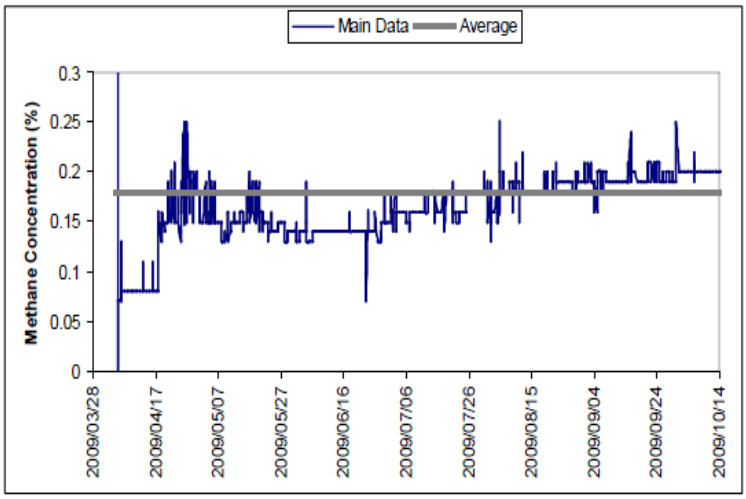
(۹): جریان گاز تخلیه شده باقیمانده و ورودی به موتور گازی به عنوان سوخت

(۱۰): جریان هوای تازه ورودی به موتور گازی به عنوان هوای احتراق

این مدل برای مشخص کردن میزان تولید توان الکتریکی بهینه از گاز متان رقیق موجود در بستر معدن زغال سنگ طبس ایران بکار گرفته شده است. معدن زغال سنگ طبس در استان یزد و در فاصله ۸۰ کیلومتری جنوب شهر طبس واقع شده است و تولید کلی سالیانه آن در سال ۲۰۱۱ در حدود ۱/۲ میلیون تن تخمین زده شده است. همچنین، دبی جریان هوای تهویه خارج شده (با غلظت حجمی ۰/۱۸ درصد گاز متان) و جریان گازهای تخلیه شده از معدن به ترتیب $360000\ Nm^3/h$ و $27.6\times10^6\ m^3/y$ اندازه‌گیری می‌شود [۵]. شکل (۲) تغییرات غلظت گاز متان در جریان هوای تهویه شده معدن زغال‌سنگ طبس را در مدت ۷ ماه نشان می‌دهد.

مطابق این شکل، مقدار ماکزیمم و میانگین غلظت گاز متان به ترتیب در حدود ۰/۲۵ و ۰/۱۸ درصد اندازه گیری می‌شوند. آشکار است که غلظت گاز متان موجود در جریان هوای تهویه معدن به تنهایی برای سوزاندن در محفظه احتراق کاتالیستی توربین گازی رقیق سوز کافی نیست. بنابراین، ترکیب کردن مقدار معینی از جریان گاز تخلیه شده برای افزایش یافتن سطح غلظت گاز متان تا حدود ۱ درصد حجمی مورد نیاز خواهد بود [۴].

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]



شکل ۲. تغییرات غلظت گاز متان در جریان هوای تهویه شده معدن زغال سنگ طبس [۳]

با توجه به اینکه در مطالعات جامعی که توسط Sh.Su و همکاران در زمینه امکان سنجی فنی و اقتصادی تکنولوژیهای مختلف استفاده از جریان هوای تهویه و جریان گاز تخلیه برای یک نمونه معدن زغال سنگ در کشور استرالیا (معدن زغال سنگ کوئینزلند) انجام گرفته است، سناریوی ترکیبی استفاده از توربین و موتور گازی به منظور تولید توان الکتریکی بیشتر در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های موجود از توجیه فنی و اقتصادی بیشتری برخوردار است [۱۲]. لذا مدل توسعه داده شده در این مقاله نیز با هدف تولید توان الکتریکی بیشتر و رفع نیاز الکتریسیته سایت معدن زغال سنگ طبس برای دو سناریوی زیر بکار گرفته شده است. بدین ترتیب که ابتدا تکنولوژی توربین گازی رقیق‌سوز کاتالیستی به تنهایی و سپس ترکیب آن با یک موتور گازی که از جریان گاز تخلیه باقیمانده معدن زغال سنگ به عنوان سوخت اصلی استفاده می‌کند، از نظر فنی و اقتصادی بررسی می‌شود:

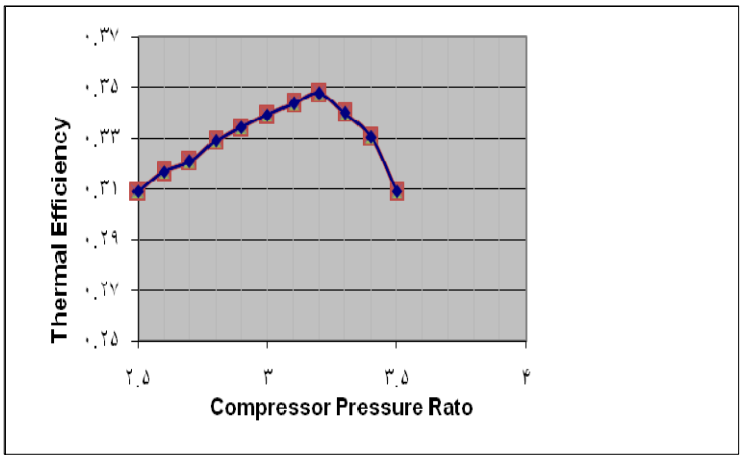
سناریو (۱): بکار بردن یک مخلوط گازی با غلظت حجمی ۱٪ گاز متان به عنوان سوخت در یک سیستم توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی

در این سناریو، یک مدل شبیه‌سازی در محیط شبیه سازی نرم افزار Hysys جهت پیش‌بینی کردن میزان توان الکتریکی تولید شده از ترکیب جریان هوای تهویه شده معدن زغال سنگ طبس حاوی گاز متان با غلظت کم و جریان گاز تخلیه شده از معدن فوق‌الذکر حاوی گاز متان با غلظت بالا در یک سیستم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

بازیافت انرژی توسعه داده شده است. مدل شبیه سازی شده سیستم بازیافت انرژی در معدن زغال سنگ طبس در شکل (۱) نشان داده شده است.

اثر نسبت تراکم (نسبت فشار) کمپرسور روی راندمان حرارتی سیکل توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی نیز در شکل (۳) ارائه شده است. بر اساس نتایج ، نسبت فشار بهینه در حدود ۳/۲۱ تعیین میشود و پس از این نقطه، راندمان حرارتی کاهش خواهد یافت. به دلیل اینکه هرچه نسبت تراکم کمپرسور بالاتر باشد، نسبت انبساط در توربین نیز بالاتر است که این امر منجر به کاهش یافتن درجه حرارت گاز خروجی از توربین و در نتیجه کاهش یافتن دمای جریان خروجی از رکوپراتور در سمت مخلوط گازی و ورودی به محفظه احتراق کاتالیستی میشود (دمای ورودی به توربین به دلیل ملاحظات متالورژیکی پره های توربین محدود است و غلظت گاز متان نیز ثابت است).



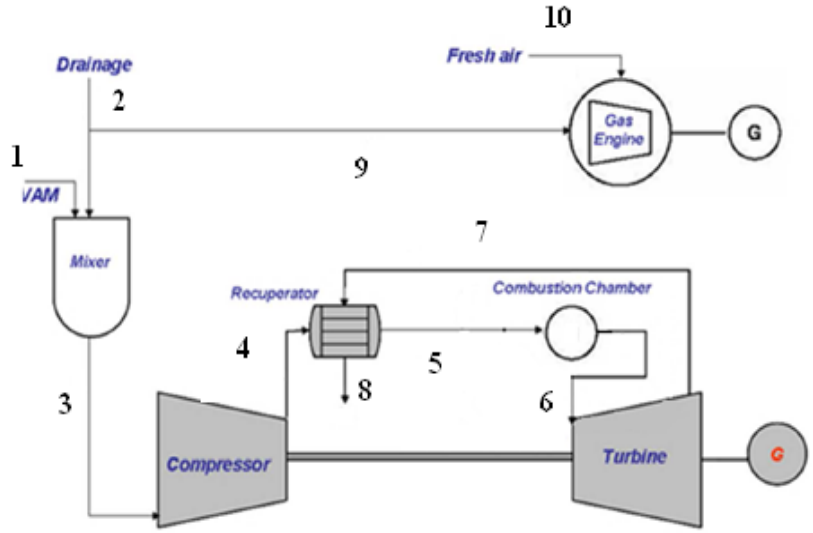
نمودار ۳. اثر نسبت تراکم کمپرسور روی راندمان حرارتی سیستم تولید توان در سناریوی (۱)

سناریو (۲): بکار بردن یک موتور گازی کوپل شده با سیستم تولید توان الکتریکی

مطابق سناریوی (۲)، جریان گاز تخلیه شده باقیمانده از معدن زغال سنگ می‌تواند در یک موتور گازی که با سیستم تولید توان الکتریکی ذکر شده در سناریوی (۱) به منظور تولید توان بیشتر در سایت معدن زغال سنگ طبس ترکیب می‌شود، بکار گرفته شود. مدل شبیه‌سازی شده سیستم بازیافت انرژی ترکیبی بکار رفته در سناریوی (۲) در شکل (۴) نشان داده شده است. هنگامی که اندازه بالقوه موتور گازی تخمین زده می‌شود، احتمال افزایش یافتن غلظت گاز متان می‌بایست در نظر گرفته شود. مطابق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

داده های قابل دسترس از سایت معدن زغال سنگ طبس، احتمال اینکه غلظت گاز متان موجود در جریان گاز تخلیه شده از معدن در طول ۲۷۴ روز از دوره بالاتر از ۵۲٪ باشد، در حدود ۹۹ درصد است. بنابراین فاکتور بهره‌برداری ۷۵٪ برای موتور گازی در نظر گرفته می‌شود [۷]. طبق برآورد صورت گرفته، مجموع توان الکتریکی سالیانه مورد نیاز جهت راه اندازی تجهیزات سایت معدن زغال‌سنگ طبس در حدود ۱۰/۸ مگاوات می‌باشد [۵].



شکل ۴. نمای شماتیک سیستم ترکیبی تولید توان الکتریکی شامل توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و موتور گازی بکار رفته در سناریوی (۲)

تحلیل اقتصادی

هزینه های متصور در زمینه بکارگیری سیستم توربین گازی رقیق سوز با احتراق کاتالیستی و ترکیب آن با یک موتور گازی عبارتند از: هزینه خرید و نصب تجهیزات و هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه، هزینه خرید و نصب تجهیزات با در نظر گرفتن قیمت واحد ۱۵۱۳ دلار بر کیلووات برای توربین گازی و ۱۱۹۱ دلار بر کیلووات برای موتور گازی [۱۲] و با در نظر گرفتن ۳۰ درصد هزینه سرمایه‌گذاری به عنوان قیمت اسقاط توربین و موتور گازی بر اساس توان تولیدی در سال اول محاسبه می‌گردد. هزینه نصب تجهیزات نیز ۱۵ درصد هزینه سرمایه‌گذاری کلی برای موتور گازی و سیستم توربین گازی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

رقیق‌سوز کاتالیستی در نظر گرفته می‌شود [۵]. برای تعیین استهلاک سالیانه سرمایه‌گذاری اولیه از روش استهلاک وجوه استهلاکی استفاده می‌شود. این روش مطابق فرمول زیر بدین ترتیب بنا شده است که مقدار استهلاک در سال اول کمترین مقدار بوده و به تدریج افزایش یافته تا جایی که در سال آخر بیشترین استهلاک را خواهد داشت [۱]. علت استفاده از این روش این است که در سال اول که دستگاه‌ها و تجهیزات خریداری می‌شوند، به دلیل نو بودن آنها استهلاک در سال اول کمترین مقدار را دارد و به تدریج در سال‌های بعد با افزایش کارکرد دستگاه‌ها، میزان استهلاک نیز بیشتر می‌شود.

(۳۱)

$$Cost_{1n} = (1 - sv) \times ((f_{u,GT}.expu_{GT}.P_{GT}) + (f_{u,GE}.expu_{GE}.P_{GE})) \times (\frac{i}{(1+i)^m}) \times (1+i)^{n-1}$$

در رابطه بالا $Cost_{1n}$ استهلاک سرمایه‌گذاری اولیه (دلار)، sv درصد اسقاط توربین و موتور گازی (۳۰٪ در پایان سال بیستم)، $f_{u,GT}$ فاکتور کارآیی سیستم توربین گازی (برابر با ۱) [۷]، $expu_{GT}$ قیمت واحد خرید و نصب سیستم توربین گازی (۱۵۱۳ دلار بر کیلو وات) [۱۲]، P_{GT} توان تولیدی توسط توربین گازی (۵۸۲۸ کیلووات)، $f_{u,GE}$ فاکتور کارآیی سیستم موتور گازی (برابر با ۰/۷۵) [۷]، $expu_{GE}$ قیمت واحد خرید و نصب سیستم موتور گازی (۱۱۹۱ دلار بر کیلووات) [۱۲]، P_{GE} توان تولیدی توسط موتور گازی (۲۲۶۰ دلار بر کیلووات)، m عمر مفید استهلاکی (۲۰ سال)، n شماره سال مربوطه و i نرخ بهره (۱۵ درصد) می‌باشد. از آنجایی‌که حداقل نرخ جذب‌کننده بر اساس اطلاعات بانک مرکزی برابر با ۱۵ درصد میباشد، نرخ بهره برابر با این مقدار در نظر گرفته شده است.

هزینه تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری سالیانه معادل ۹/۵ درصد سرمایه‌گذاری اولیه برای توربین گازی و ۷/۵ درصد سرمایه‌گذاری اولیه برای موتور گازی [۵] و بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

(۳۲)

$$Cost_{2n} = (1 - sv) \times ((0.095.f_{u,GT}.expu_{GT}.P_{GT}) + (0.075.f_{u,GE}.expu_{GE}.P_{GE})) \times (\frac{i}{(1+i)^m}) \times (1+i)^{n-1}$$

سود سالیانه ناشی از عدم خرید برق از شبکه سراسری در اثر بکارگیری سیستم توربین و موتور گازی منطبق بر روش سری هندسی با نرخ افزایش ۳ درصد در سال بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

(۳۳)

$$Prof_{1n} - ((A_1.WP.PN) + (A_2.WP.PP) + (A_3.WP.PL)) \times (1+j)^{n-1}$$

در رابطه بالا، $Prof_{1n}$ سود سالیانه ناشی از عدم خرید برق از شبکه سراسری (دلار)، WP توان الکتریکی تولید شده توسط توربین و موتور گازی (۸۰۸۸ کیلو وات) و j نرخ افزایش ۳٪ در سال (۰/۰۳) می‌باشد. ارزش پارامترهای PN، PP و PL با توجه به محدوده جغرافیایی محل بکارگیری توربین و موتور گازی و بهای برق در آن ناحیه مشخص میشود. PN قیمت خرید برق در ساعات میان بار (۱۲ ساعت در روز، ۰/۰۹۵ دلار بر کیلووات ساعت)، PP قیمت خرید برق در ساعات اوج بار (۴ ساعت در روز، ۰/۱۲ دلار بر کیلووات ساعت) و PL قیمت خرید برق در ساعات کم بار (۸ ساعت در روز، ۰/۰۱۵ دلار بر کیلووات ساعت) می‌باشد [۶]. ضرایب ثابت A_1، A_2 و A_3 نیز به صورت ذیل محاسبه می‌شوند:

$$A_1 = 12\,\frac{hour}{day} \times 365\,\frac{day}{year}\,, A_2 = 4\,\frac{hour}{day} \times 365\,\frac{day}{year}\,, A_3 = 8\,\frac{hour}{day} \times 365\,\frac{day}{year}$$

جهت برآورد اقتصادی طرح، فرضیات ذیل در نظر گرفته شده است: قیمت فروش برق: ۰/۰۹ دلار به ازاء هر کیلووات ساعت، نرخ بهره: ۱۵ درصد، ساعت کارکرد سیستم ۸۷۶۰ ساعت و طول عمر سیستم: ۲۰ سال.

اطلاعات جهت بهینه سازی در نرم افزار Gams[1] بکار گرفته می‌شوند. از این رو ابتدا بر اساس شرایط واقعی سایت معدن زغال سنگ طبس به کمک نرم افزار شبیه سازی Hysys به منظور حصول اطمینان از عملکرد درست و مناسب سیکل توربین گازی رقیق‌سوز کاتالیستی، شبیه‌سازی ترمودینامیکی می‌گردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ترمودینامیکی و اطلاعات میدانی مندرج در جدول (۲) به عنوان ورودی نرم افزار بهینه‌سازی Gams جهت بدست آوردن شرایط بهینه فنی و اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

1. General Algebric Modeling System

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

جدول ۲. پارامترهای میدانی ورودی به مدل

ردیف	پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
۱	ضریب مبدل پیش گرمکن سوخت	eE	۰/۸۵	----
۲	دمای جریان خروجی از مخلوط کننده گازها	T1	۲۹۸	K
۳	فشار خروجی از مخلوط کننده جریان گازها	P1	۱۵۰	kpa
۴	ظرفیت حرارتی ویژه جریان گازی خروجی از کمپرسور	Cpf1	۱/۰۴۹	kj/kg-°c
۵	ظرفیت حرارتی ویژه جریان گازی خروجی از توربین	Cpg_4	۱/۱۳۵	kj/kg-°c
۶	ظرفیت حرارتی ویژه جریان گازی خط Preheated Flow	Cpf_2	۱/۱۳۰	kj/kg-°c
۷	ظرفیت حرارتی ویژه جریان گازی ورودی به توربین	Cpt	۱/۱۷۶	kj/kg-°c
۸	ظرفیت حرارتی ویژه جریان گازی ورودی به کمپرسور	Cpc	۱/۰۲۰	kj/kg-°c
۹	نسبت گرمای ویژه	K	۱/۴	–
۱۰	قیمت پایه سرمایه گذاری جهت خرید و نصب توربین گازی	Cgt	۱۵۱۳	$/kw
۱۱	قیمت پایه سرمایه گذاری جهت خرید و نصب موتور گازی	Cge	۱۱۹۱	$/kw
۱۲	ارزش حرارتی جریان گاز با غلظت گاز متان ۱٪	NCV_{Mix}	۴۳۰/۲	kj/kg
۱۳	ارزش حرارتی جریان گاز با غلظت گاز متان ۴۶٪	NCV_{DG}	۲۵۳۶۰	kj/kg
۱۴	ارزش حرارتی جریان گاز با غلظت متان ۰/۱۸٪	NCV_{Vam}	۴۹/۴۵	kj/kg
۱۵	دبی جریان گاز با غلظت بالای گاز متان (۴۶٪)	M_{DG}	۰/۸۲۳	kg/s
۱۶	دبی جریان گاز با غلظت پایین گاز متان (۰/۱۸٪)	M_{Vam}	۱۷۰	kg/s
۱۷	نسبت تراکم کمپرسور	C_c	۳/۲۱	–
۱۸	نسبت انبساط توربین	C_t	۳/۱۹۵	–
۱۹	راندمان مکانیکی توربین	YT_m	۸۸	٪
۲۰	راندمان مکانیکی کمپرسور	YC_m	۸۶	٪
۲۱	راندمان آیزنتروپیک توربین	YT	۹۵	٪
۲۲	راندمان آیزنتروپیک کمپرسور	YC	۹۵	٪
۲۳	راندمان ژنراتور	$\eta_{Gen.}$	۹۵	٪
۲۴	راندمان گیربکس	$\eta_{Gear.}$	۹۸	٪
۲۵	دمای جریان هوای تهویه شده معدن	T001	۲۹۸	K
۲۶	دمای جریان گاز تخلیه شده از معدن	T002	۳۲۳	K
۲۷	راندمان موتور گازی	YG	۹۵	٪
۲۸	افت فشار در مبدل حرارتی پیش گرمکن سوخت سمت لوله	ΔP_{rt}	۳۰	kpa
۲۹	افت فشار در مبدل حرارتی پیش گرمکن سوخت سمت پوسته	ΔP_{rs}	۵	kpa

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

ردیف	پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
۳۰	قیمت فروش برق	Pe	۰/۰۹	$/kwh
۳۱	فاکتور کارآیی توربین گازی	$f_{u,GT}$	۱	–
۳۲	فاکتور کارآیی موتور گازی	$f_{u,GE}$	۰/۷۵	–
۳۳	ساعت کارکرد سیستم	Hy	۸۷۶۰	hour/year
۳۴	نرخ بهره	ir	۱۵	٪
۳۵	طول عمر سیستم بازیافت	n	۲۰	year

نتایج

نتایج فنی

مطالعه رقابت بین موتور گازی و توربین گازی رقیق سوز با احتراق کاتالیستی به منظور کاهش دادن اثر مخرب گلخانه ای و بهره برداری کردن از گاز متان موجود در معادن زغال‌سنگ جهت تولید توان الکتریکی بهینه به کمک مدل امکان پذیر خواهد بود. نتایج مدل بهینه سازی جریان انرژی نشان می‌دهد که توان الکتریکی در حدود ۸۰۸۸ کیلووات می‌تواند توسط سیستم ترکیبی توربین و موتور گازی تولید شود و سهم توان تولید شده توسط موتور گازی ۲۷/۹۴٪ از توان الکتریکی تولیدی کلی است. پارامترهای عملکردی بهینه تعیین شده برای سناریوهای (۱) و (۲) در جدول (۳) نشان داده شده است که این نتایج برای حداقل توان الکتریکی ۷۵۶۲ کیلووات از نیاز الکتریسیته سایت معدن زغال سنگ طبس در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. مقایسه ۲ سناریو از لحاظ فنی

شرح	سناریو (۱)	سناریو (۲)
توان الکتریکی تولید شده کلی (Mw)	۷/۵۶۲	۸/۰۸۸
توان الکتریکی تولید شده توسط توربین گازی رقیق سوز (Mw)	۷/۵۶۲	۵/۸۲۸
توان الکتریکی تولید شده توسط موتور گازی (Mw)	–	۲/۲۶
درصد حجمی استفاده شده از جریان هوای تهویه معدن زغال سنگ (٪)	۳۱	۲۴
درصد حجمی استفاده شده از جریان گاز تخلیه شده معدن زغال سنگ (٪)	۱۰۰	توربین گازی:۷۱٪ و موتور گازی:۲۹٪
راندمان حرارتی (٪)	۲۸	۳۲/۶

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

نتایج اقتصادی

بر اساس نتایج بدست آمده از مدل که در جدول (۴) ارائه شده است، نرخ بازگشت سرمایه مربوط به سناریوی (۱) معادل ۳۴ درصد و سناریوی (۲) معادل ۳۶ درصد می‌باشد. از این رو، با توجه به اینکه حداقل نرخ جذب کننده بر اساس اطلاعات بانک مرکزی ۱۵ درصد می‌باشد، طرح هر دو سناریو از نظر اقتصادی قابل توجیه است. با توجه به اینکه طرح سناریوی (۲) دارای نرخ بازگشت سرمایه و ارزش کنونی خالص بالاتر و نیز دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر در مقایسه با طرح سناریوی (۱) می‌باشد، اجرای این سناریو از توجیه اقتصادی بیشتری برخوردار خواهد بود.

جدول ۴. نتایج بهینه تحلیل اقتصادی

شرح	واحد	مقدار مربوط به سناریو (۱)	مقدار مربوط به سناریو (۲)
کل سرمایه گذاری اولیه شامل هزینه خرید و نصب تجهیزات	دلار	۹۹۴۶۲۹۹	۱۱۵۰۹۴۲۴
هزینه تعمیرات و نگهداری سالیانه	دلار	۷۶۰۸۴۷	۶۹۲۳۶۶
مالیات	دلار	۳۰۰۶۹۶۵۲	۳۲۴۳۶۷۰۷
کارکرد سیستم	سال	۲۰	۲۰
جمع سود سالانه در سال پایه	دلار	۲۶۹۴۷۰۲۰	۲۸۷۹۵۲۵۵
نرخ بازگشت سرمایه (IRR)	درصد	۳۴	۳۶
ارزش کنونی خالص	دلار	۱۵۵۰۵۷۱۳	۱۷۲۸۵۸۳۰
دوره بازگشت سرمایه	سال	۴/۳	۴

نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان بکارگیری سیستم توربین گازی رقیق سوز و ترکیب آن با موتور گازی به عنوان یک سیستم بازیافت انرژی جهت تولید توان الکتریکی بهینه از احتراق کاتالیستی گاز متان با غلظت کم موجود در بستر معدن زغال سنگ طبس بر اساس حداقل هزینه کلی سیستم مورد تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی قرار گرفته است. از آنجایی که یکی از اهداف اصلی در این پروژه، توجیه فنی و اقتصادی بکارگیری سیستم توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و ترکیب آن با موتور گازی در معدن زغال سنگ است، لذا هدف حداقل کردن هزینه کلی پروژه از طریق شبیه سازی فرآیندی به کمک نرم افزار Hysys و یک نرم‌افزار بهینه‌ساز مانند Gams می‌باشد. از این رو، سیستم توربین و موتور گازی باید به گونه ای طراحی شوند تا هزینه کلی حداقل ناشی از بکارگیری آنها حاصل گردد که این خود مستلزم طراحی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

بهینه توربین و موتور گازی با توجه به محدودیت‌های فنی و اقتصادی در این زمینه است. بدین منظور و برای بدست آوردن محدودیت‌های تابع هدف، کل سیستم از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی تحلیل شده است. با هدف توسعه دادن تکنولوژی‌های مؤثرتر و از نظر هزینه کارآمدتر، توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و ترکیب آن با موتور گازی به عنوان سیستم تولید توان الکتریکی به منظور کاهش اثر مخرب گازهای گلخانه‌ای و استفاده کردن از گاز متان موجود در بستر معدن زغال سنگ طبس در ایران در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که توان الکتریکی تولیدی بهینه با ترکیب توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و موتور گازی هنگامی که سهم توان تولید شده توسط موتور و توربین گازی به ترتیب ۲۷/۹۴٪ و ۷۲/۰۶٪ تخمین زده می‌شود، بدست می آید و مبین آن است که سناریوی ترکیبی سیستم توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی و موتور گازی به عنوان گزینه برتر جهت بازیافت انرژی بیشتر و در نتیجه تولید توان الکتریکی بالاتر از نظر تحلیل فنی و اقتصادی مطرح خواهد بود. نتیجه‌گیری می‌شود که به دلیل اینکه هزینه سرمایه‌گذاری هر واحد توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی در مقایسه با موتور گازی پایینتر است، سهم توان تولید شده توسط توربین گازی رقیق سوز کاتالیستی بالاتر از موتور گازی است.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که غلظت گاز متان موجود در جریان هوای تهویه شده معدن و نیز قابلیت در دسترس بودن موقتی جریان گاز تخلیه شده میتوانند به عنوان فاکتورهای اصلی برای توسعه دادن هر سیستم تولید توان الکتریکی در یک معدن زغال سنگ در نظر گرفته شوند. مطابق نتایج سناریوی (۱)، هنگامی که دمای ورودی به توربین (TIT) و غلظت گاز متان ثابت هستند، ۷/۵۶۲ مگاوات توان الکتریکی با بکار بردن ۳۱ درصد از جریان هوای تهویه معدن (VAM) و ۱۰۰ درصد از جریان گاز تخلیه شده (Drainage) تولید می‌شود، اما زمانی که موتور گازی با سیستم تولید توان در یک مدل ترکیبی استفاده می‌شود، همانطور که در سناریوی (۲) گزارش داده شد، توان الکتریکی تولید شده کلی توسط سیستم به ۸/۰۸۸ مگاوات افزایش یافته و راندمان حرارتی در حدود ۱۶/۴۲ درصد افزایش خواهد یافت. با اجرای این پروژه بازیافت، از طریق بکارگیری سیکل توربین گازی رقیق‌سوز کاتالیستی به‌طور مجزا، توانی در حدود ۷/۵۶۲ مگاوات و با استفاده از سیکل ترکیبی توان الکتریکی درحدود ۸/۰۸۸ مگاوات تولید می‌گردد که به ترتیب ۷۰ درصد و ۷۵ درصد از نیاز الکتریسیته معدن زغال سنگ طبس تأمین خواهد شد. از لحاظ اقتصادی نیز، اجرای طرح سناریوی (۲) به دلیل دارا بودن نرخ بازگشت سرمایه و ارزش کنونی خالص بالاتر و نیز دوره بازگشت سرمایه کوتاهتر در مقایسه با طرح سناریوی (۱)، از توجیه اقتصادی بیشتری برخوردار خواهد بود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

به طور حتم با توسعه معدن زغال‌سنگ، منابع گازی بیشتری به دست خواهد آمد که باعث می‌شود تمام نیازهای الکتریسیته سایت به طور مستقل از شبکه، در محل تولید شود و همچنین امکان فروش مستقیم برق به شبکه و جذب درآمد نیز وجود خواهد داشت. در مجموع، طبق محاسبات صورت گرفته، منافع استفاده از توربین و موتور گازی در تأسیسات سایت معدن زغال‌سنگ به منظور مستقل کردن این تأسیسات از برق شبکه سراسری و جلوگیری ازهزینه‌های هنگفتی که در این زمینه صورت می‌گیرد، آنقدر زیاد است که باید هرچه بیشتر از این منافع استفاده کرد.

منابع

اسکونژاد، محمد (۱۳۹۱)، ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صص ۲۲۰–۱۹۵.

A. K. Markpwski (1998), "Coalbed Methane Resource Potential and Current Prospects in Pennsylvania", *International Journal of Coal Geology*, Vol. 38, PP. 137-159.

C. J. Bibler, J. S. Marshall, and R. C. Pilcher (1998), "Status of Worldwide Coal Mine Methane Emissions and Use", *International Journal of Coal Geology*, Vol. 35, PP. 283-310.

Farzaneh,. H., and Fahimi,. M., (2011), "Simulation of Energy Recovery System for Power Generation From Coal Bed Gas of Tabas Coal Mine of Iran", *World Renewable Energy Congress*, Sweden.

Farzaneh,. H., Fahimi,. M., and Saboohi,. Y. (2011), "Optimal Power Generation from low Concentration Coal bed Methane in Iran", *International Journal of Energy Sources, Part A:Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.

IRASCO (2003), Tabas Coal Mine Project. Design Basic Memorandum,Vol. 1.

J. Yin, Sh. Su, X. Yu, and Y. Weng (2010), "Thermodynamic Characteristics of a Low Concentration Methane Catalytic Combustion Gas turbine", *International Journal of Applied Energy*.

J. Yin, and Y. Weng (2011), "Investigation of Vombustion and Thermodynamic Performance of a Lean Burn Catalytic Combustion Gas Turbine System", *International Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 52, PP. 1711-1720.

K. Gosiewski, A. Pawlaczyk, K. Warmuzinski, and M. Jaschik (2009), "A Study on Thermal Combustion of Lean Methane-air Mixtures: Simplified Reaction Mechanism and Kinetic Equations", *International Journal of Chemical Engineering*, Vol. 154, PP. 9-16.

L.Chun-tong, L. Fa-yang, and Sh. Jin-di (2009), "Thermal Economy Analysis of Utilizing Coalmine Methane Energy", *International Journal of Procedia Earth and Planetary Science* , Vol. 1, PP. 1343-1350.

Sh. Su, A. Beath, H. Guo, and C. Mallet (2011), "An Assessment of Mine Methane Mitigation and Utilisation Technologies", *International Journal of Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, PP. 123-170.

Sh. Su, and J. Agnew (2006), "Catalytic Combustion of Coal Mine Ventilation air Methane", *International Journal of Fuel*, Vol. 85, PP. 1201-1210.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

US EPA (2003), "Assessment of the Worldwide Market Potential for Oxidizing Coal Mine Ventilation Air Methane", *A Publication of the Coal Bed Methane Outreach Program (CMOP) EPA-430-N00-04.*
http://www.tavanir.org.ir.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-02-19]