بررسی فنی اقتصادی تولید برق از گاز همراه

هامون جعفریان[1*]، کارشناس ارشد، سورنا ستاری[2]، دانشیار، حسن لاجوردی[۳]، دانشجوی دکترا
۱- دانشکده مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
hjafarian@mail.kntu.ac.ir
2- پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
sattari@sharif.ir
۳- اقتصاد و مدیریت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
h_lajevardi@yahoo.com

چکیده: افزایش قیمت حامل‌های انرژی موجب توجه ویژه به منابع غیر متداول انرژی شده است. گاز همراه که در حال حاضر غالباً به عنوان ضایعات تولید نفت سوزانده می‌شود، با ارزش حرارتی بالا و فراوانی قابل توجه در کشور دارای پتانسیل ویژه ای جهت استفاده می‌باشد. یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های استفاده از این منبع تولید الکتریسیته می‌باشد که در این مقاله به بررسی امکان پذیری فنی و توجیه پذیری اقتصادی آن پرداخته می‌شود. سه مولد توربین گاز، موتور احتراق داخلی و توربین بخار برای بررسی توسط نرم افزار ترموفلو مدل‌سازی شده و با تعیین محدودیت‌های سوخت مصرفی، تکنولوژی‌های آماده سازی سوخت معرفی می‌گردد. پس از برآورد هزینه‌ها به تحلیل پارامتریک مسئله پرداخته و تأثیر عواملی چون تغییرات ترکیب گاز همراه، دبی گاز، دمای محیط، نقطه طراحی، قیمت فروش برق و نرخ تنزیل بر اقتصاد طرح بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این منبع انرژی از نظر فنی کاملاً قابل دستیابی می‌باشد و با انتخاب مولد مناسب می‌تواند بسیار اقتصادی و سود آور باشد.

واژه های کلیدی: گاز همراه، تولید برق، مولدهای توان، محدودیت‌های سوخت مصرفی، آماده سازی سوخت

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۰۳/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول : هامون جعفریان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران، دانشکده مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

۱- مقدمه

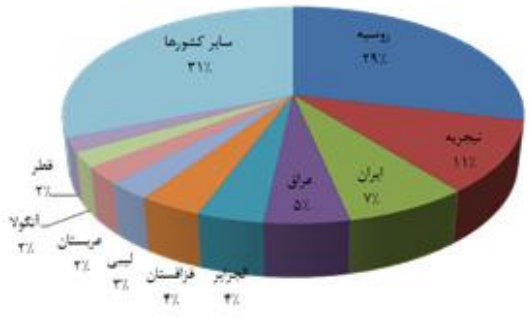
۱-۱- اهمیت موضوع

با افزایش روزافزون نیاز به انرژی و پایان پذیر بودن منابع انرژی فسیلی که در حال حاضر بیشترین سهم در تأمین تقاضای انرژی را دارا می‌باشند قیمت حامل‌های انرژی افزایش یافته و در نتیجه انگیزه برای استفاده از منابع غیر متداول انرژی بیشتر شده است. یکی از این منابع غیر متداول که در دهه اخیر توجه ویژه ای به آن شده است، گازهای همراه[۱] (گاز فلر[۲]) می‌باشد. گاز همراه که بعضاً گاز فلر نیز نامیده می‌شود، گازی است که هنگام استخراج نفت از میادین نفتی حاصل می‌گردد و معمولاً به عنوان ضایعات تولید نفت در محل تولید سوزانده (فلر) می‌شود. گاز همراه دارای ترکیبی با هیدروکربن‌های سنگین‌تر نسبت به گاز طبیعی می‌باشد و انرژی حرارتی (بر واحد حجم) نسبتاً بالایی دارد، از خصوصیات دیگر آن تغییر ترکیب آن در طول زمان و همچنین وجود ناخالصی در ترکیب می‌باشد. جهت آشنایی بیشتر با پتانسیل این منبع در ادامه، حجم و پراکندگی آن بررسی می‌گردد.

طبق گزارش سال ۲۰۱۱ شرکت جنرال الکتریک[۳] تقریباً سالانه ۱۵۰ میلیارد متر مکعب گاز در جهان فلر می‌شود که معادل ۵٪ کل تولید گاز طبیعی می‌باشد. انرژی حاصل از سوزاندن این مقدار گاز در سال، معادل انرژی ۲.۴ میلیون بشکه نفت در روز می‌باشد و همچنین در اثر آن سالانه ۴۰۰ میلیون تن گاز دی اکسید کربن منتشر می‌شود که معادل ۱.۲٪ کل انتشار دی اکسید کربن از منابع اولیه هیدروکربنی (زغال سنگ، نفت و گاز) می‌باشد [۱].

پراکندگی گاز همراه سوزانده شده در سراسر جهان در سال ۲۰۰۹ طبق گزارش بانک جهانی[۴] [۲] در شکل (۱) آورده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود بیش از نیمی از گاز فلر در چهار کشور سوزانده می‌شود و کشور ایران با حدود ۴۰ میلیون متر مکعب در روز گاز همراه در مقام سوم جهان قرار دارد [۳] که پتانسیل بالا و ضرورت بررسی بیشتر این موضوع در کشور را نشان می‌دهد.

به طور کلی راه های جلوگیری از این اتلاف به دو بخش کاهش تولید گاز همراه و بازیافت گاز همراه تقسیم می‌گردد. روش‌های متداول بازیافت گاز همراه تولید محصولات دیگر (LPG، LNG، متانول)، تزریق مجدد گاز به چاه های نفتی، تصفیه و انتقال به شبکه گاز رسانی و تولید الکتریسیته می‌باشند [۴]. اگرچه هر یک از روش‌های ذکر شده با توجه به شرایط مورد بررسی می‌تواند گزینه برتر باشد در بسیاری از تحقیقات انجام شده تولید الکتریسیته از گاز فلر به عنوان یکی از اقتصادی‌ترین روش‌ها معرفی شده است [۱،۵،۶]. در این مقاله به بررسی امکان پذیری فنی و توجیه پذیری اقتصادی تولید برق از گاز فلر پرداخته و تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد طرح بررسی می‌شود.



شکل (1) سهم کشورها از کل گاز همراه سوزانده شده [۱]

۱-۲- مرور ادبیات

اگرچه با توجه به آمار میزان گاز فلر شده در جهان روند کاهش آن در سال‌های اخیر نمایان است [۲] اما گزارشات و مقالات مرتبط با این موضوع محدود می‌باشد. از جمله مقالات موجود در زمینه بازیابی گاز فلر می‌توان به مقاله رحیم پور و جوکار و همکاران [۷] و رحیم پور و جمشید نژاد و همکاران [۸] اشاره نمود. هر دوی این مقالات روندی مشابه دارند و تنها در مطالعه موردی بررسی شده، متمایز می‌باشند. در این مقالات ترکیبی ثابت برای گاز فلر پالایشگاه در نظر گرفته شده است و در بخش تولید الکتریسیته تنها مولد توربین گاز در بررسی شده است. همچنین در مورد محدودیت‌های سوخت مورد استفاده در توربین گاز و روش‌های آماده سازی بحثی نشده است.

بانک جهانی [۹] و گروه مشاور انرژی پی.اف.سی.[۵] [۵] در زمینه بازیابی گاز فلر گزارشاتی منتشر نموده‌اند. در این گزارشات نیز از تغییرات ترکیب گاز صرف نظر شده است همچنین توضیحات ارائه شده از جمله نحوه مدل‌سازی مولدها، تأثیر شرایط محیطی و تکنولوژی‌های آماده سازی سوخت، کلی و تخمینی می‌باشد و منابع لازم برای استفاده ذکر نشده است اما روند و ساختار استفاده شده، کامل و مفید است که در مقاله حاضر از آن استفاده شده است.

جهت آشنایی بیشتر با روند و ساختار بررسی فنی اقتصادی تولید برق از گاز همراه، کارهای انجام شده در زمینه منابع غیر متداول دیگر از جمله زیست توده[۶] و گازهای حاصل از دفن زباله[۷] نیز بررسی شدند [۱۰،۱۱] که از جمله مهم‌ترین آن‌ها پایان نامه نوشته شده توسط هندریک[۸] [۱۲] در مورد استفاده از زیست توده در میکروتوربین، پایان نامه آرنفیلد[۹] [۱۳] در مورد استفاده از زیست

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

توده در موتورهای احتراق داخلی و مقاله ژارامیلو[10] و همکاران [۱۴] در زمینه تولید برق از بیوگاز[11] می‌باشد که در تعیین روند و ساختار مقاله از آن‌ها استفاده شده است.

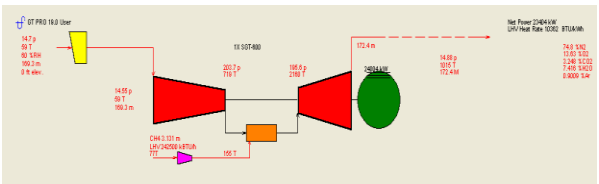
در مقاله حاضر با بررسی هر سه مولد توربین گاز، توربین بخار و موتورهای احتراق داخلی و مدل‌سازی دقیق با استفاده از نرم افزار ترموفلو[12]، بررسی محدودیت‌های سوخت مصرفی مولدها و در نظر گرفتن تغییرات ترکیب سوخت، بررسی دقیق‌تر و جامع‌تری نسبت به کارهای گذشته در این زمینه انجام شده است. همچنین با مطالعه تأثیر پارامترهایی چون دبی، دمای محیط، قیمت فروش برق، نرخ تغییر ترکیب سوخت و نقطه طراحی، تحلیل پارامتری جامع ای در این زمینه انجام می‌شود.

۱-۳- نقشه راه

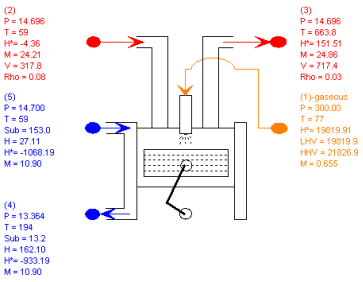
در این مقاله ابتدا به نحوه مدل‌سازی مولدها پرداخته می‌شود، سپس در مورد محدودیت‌های سوخت مصرفی مولدها و تکنولوژی‌های آماده سازی سوخت برای استفاده در مولدها بحث شده و نحوه آنالیز اقتصادی طرح توضیح داده می‌شود، در پایان تحلیل پارامتری طرح و نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲- مدل‌سازی مولدها

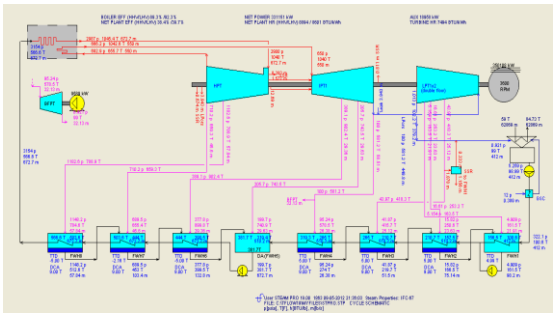
با توجه به در نظر گرفتن تغییرات ترکیب و دبی سوخت مصرفی، همچنین بررسی تغییرات شرایط محیطی، مدل مناسب برای کار می‌بایست قابلیت نمایش عملکرد مولد در شرایط خارج از نقطه طراحی را دارا باشد. بدین منظور از نرم افزار ترموفلو برای مدل‌سازی مولدها استفاده شده است که با در اختیار داشتن بانک اطلاعاتی قدرتمند، امکان مدل‌سازی هر سه مولد توربین گاز، توربین بخار و موتور احتراق داخلی برای شرکت‌های مختلف تولید کننده و در ظرفیت‌های مختلف را فراهم می‌آورد. با استفاده از این نرم افزار علاوه بر تعیین خروجی مولدها در شرایط خارج از نقطه طراحی، تخمینی مناسب از هزینه اولیه تجهیزات بدست می‌آید. در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) شماتیک مدل مولدهای استفاده شده نمایش داده شده است.



شکل (2) مدل توربین گاز در نرم افزار ترموفلو



شکل (3) مدل موتور احتراق داخلی در نرم افزار ترموفلو



شکل (4) مدل توربین بخار در نرم افزار ترموفلو

۳- محدودیت‌های سوخت مصرفی مولدها

محدودیت مولدها در مورد شرایط سوخت مصرفی آن‌ها با توجه به تغییرات دبی و ترکیب گاز همراه یکی از چالش‌های اصلی استفاده از گاز همراه برای تولید برق می‌باشد. میزان این محدودیت‌ها یکی از معیار های مهم جهت تعیین برتری و ضعف مولدها می‌باشد. موارد اصلی محدود کننده، دما و فشار سوخت، میزان سولفور و ذرات جامد و فلزات، رطوبت و تغییرات ترکیب سوخت می‌باشد.

۱-۳ توربین گاز

توربین گاز نسبت به مولدهای دیگر حساسیت بیشتری به سوخت مصرفی دارد. معیار متداول برای بررسی تأثیر تغییرات ترکیب سوخت شاخص وب[13] می‌باشد. هر چه تغییرات این مشخصه بیشتر باشد انعطاف پذیری لازم برای سیستم کنترل و سیستم احتراق جهت دریافت انرژی ورودی طراحی شده، افزایش می‌یابد. این مشخصه در رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۵،۱۶].

$$WI = \frac{HHV}{\sqrt{SG_{gas}}} \qquad (1)$$

که در آن WI شاخص وب (Mj/m^3) ، HHV ارزش حرارتی بالای سوخت (Mj/m^3) و SG_{gas} وزن مخصوص سوخت نسبت به هوا می باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

اصلی‌ترین مشکلاتی که تغییرات ترکیب سوخت در مولدها ایجاد می‌نماید برگشت شعله[14]، خودسوزی[15] سوخت و پایداری استاتیکی و دینامیکی[16] شعله می‌باشد [۱۷]. فعالیت‌های مختلفی برای افزایش بازه مجاز تغییرات وب انجام شده است و در نهایت بیشترین حد مجاز اعلام شده برابر با ۳۰٪ می‌باشد [۱۸،۱۹،۲۰].

حداقل دمای سوخت باید طوری انتخاب گردد تا از ورود مایعات به محفظه احتراق جلوگیری شود. برای این منظور چهار دما تعریف می‌گردد، دمای شبنم هیدروکربنی، دمای شبنم رطوبت، دمای سوپرهیت هیدروکربنی و دمای سوپرهیت رطوبت. این دماها با استفاده از روابط موجود در گزارش شرکت جنرال الکتریک [۱۵] بدست می‌آیند. دمای سوپرهیت هیدروکربنی تابع ترکیب سوخت می‌باشد و برای محاسبه آن از نرم افزار وی.ال.ای. فلش[17] استفاده می‌شود. مقدار بیشینه 100 ppm برای ذرات جامد توصیه شده است برای اطلاعات دقیق‌تر می‌توان از گزارش‌های منتشر شده توسط سازندگان استفاده نمود [۱۵،۲۱]. آزمایشات نشان داده است وجود سولفور تا ۱٪ حجمی سوخت برای توربین‌های گاز قابل قبول می‌باشد و تأثیری بر خوردگی قطعات نخواهد داشت [۱۵].

فشار مورد نیاز سوخت با افزایش توان خروجی سیستم و افزایش حجم محفظه احتراق افزایش می‌یابد، مقدار آن با استفاده از نرم افزار ترموفلو بدست می‌آید.

۳-۲ موتور احتراق داخلی

معیار متداول برای بررسی میزان تغییرات مجاز ترکیب سوخت در موتورهای احتراق داخلی عدد متان می‌باشد. در بین تمامی پدیده های ناخواسته در موتور احتراق داخلی، ضربه (knock) بیشترین آسیب را وارد می‌نماید. این پدیده ممکن است موجب ایجاد نقاط داغ و در نتیجه افزایش ضربه گردد. این پدیده ارتباط مستقیم با نسبت تراکم موتور دارد و برای افزایش فاصله با ضربه، طراحان نسبت تراکم را کاهش می‌دهند که موجب کاهش بازده سیستم می‌گردد. در حین عملیات با استفاده از کنترل کننده‌ها و ایجاد تأخیر در زمان جرقه زنی از ضربه جلوگیری می‌گردد. علاوه بر مشخصات موتور این پدیده بسیار وابسته به سوخت و مقاومت آن می‌باشد که با معیار عدد متان اندازه گیری می‌شود.

به گاز متان به دلیل مقاومت بالا در برابر ضربه عدد متان ۱۰۰ و هیدروژن با مقاومت بسیار پایین عدد متان صفر را نسبت می‌دهند و درصد مولی متان در مخلوط مورد استفاده عدد متان سوخت اولیه را تعیین می‌نماید. به طور کلی سه روش برای تعیین عدد متان سوخت موجود است: آزمایشات عملی [۲۲،۲۳]، استفاده از روابط تجربی استخراج شده [۲۵،۲۳]، استفاده از نرم افزار [۲۶]. سازندگان موتور احتراق داخلی حد پایین برای عدد متان سوخت تعیین می‌نمایند که برای هر موتور با توجه به مشخصات آن متفاوت است.

حد متداول اعلام شده برای حداقل عدد متان، ۷۰ می‌باشد [۲۷،۲۸] و منابعی استفاده از سوخت‌هایی با عدد متان ۵۵ را نیز بدون آسیب به موتور امکان پذیر اعلام می‌نمایند [۲۹]. محدودیت دمایی برای موتورهای انژکتوری ذکر نشده و رطوبت هوای کمتر از 80% توصیه شده است. برای ذرات نیز حد 80 mg/MJ [۳۰]، و برای فلزات قلیایی حد $1\ mg/Nm^3$ پیشنهاد شده است [۱۳]. سوخت‌هایی با سولفور حدود ۱.۵٪ جرمی نیز در موتورهای احتراق داخلی قابل استفاده می‌باشند همچنین با افزایش تعداد دفعات تعویض روغن می‌توان تا سه برابر حد مجاز نیز پیش رفت [۳۱،۳۲]. فشار مورد نیاز سوخت موتور نیز نسبتاً پایین می‌باشد که مقدار کمی با افزایش توان خروجی افزایش می‌یابد [۳۰].

۳-۳ توربین بخار

در این مولد با توجه به اینکه احتراق توسط مشعل صورت می‌پذیرد و توربین با بخار آب در تماس می‌باشد، حساسیت نسبت به سوخت بسیار پایین می‌باشد. در مشعل‌های مدرن با استفاده از سیستم‌های کنترل بروز امکان تغییر نسبت هوا به سوخت با تغییر ترکیب سوخت وجود دارد و در نتیجه احتمال احتراق ناقص یا کاهش شدید بازده در اثر تغییرات ترکیب سوخت، پایین است [۳۳]. تحقیقات دیگر انجام شده در این زمینه نیز موید همین امر می‌باشند و تأثیر غالب تغییرات سوخت را تغییر میزان آلایندگی سیستم معرفی می‌نمایند [۳۴،۳۵]. از دیگر مزایای استفاده از توربین بخار فشار پایین مورد نیاز سوخت می‌باشد [۳۶]. همچنین مقاومت این سیستم نسبت به ذرات جامد، دمای سوخت، سولفور و رطوبت بالا می‌باشد.

۴- روش‌های آماده سازی

در این بخش به اختصار به روش‌های مرسوم برای رساندن شرایط سوخت به وضعیت دلخواه اشاره می‌شود.

۴-۱ کنترل ترکیب و شاخص وب و عدد متان

برای کنترل میزان تغییرات ترکیب سوخت و و نگه داشتن معیارهای مورد نظر در بازه مجاز روش‌های مختلفی موجود است که در ادامه به صورت تیتروار آورده شده است و منابع لازم جهت مطالعه بیشتر ذکر می‌شود.

- ترکیب کردن با جریانی دیگر [۳۳]
  - ✓ تزریق نیتروژن

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

- ✓ تزریق هوا
- ✓ تزریق LPG
- • چگالش هیدروکربن‌های سنگین [۳۷]
- ✓ جذب
- ✓ انبساط برودتی

۴-۲ کنترل دما

منظور از کنترل دما افزایش دمای سوخت مصرفی جهت جلوگیری از چگالش هیدروکربن‌های سنگین می‌باشد که بیشتر در توربین گاز استفاده می‌شود. این کار به راحتی با استفاده از مبدل حرارتی و و وجود منبع حرارتی با دمای بالایی چون گازهای خروجی توربین حاصل می‌گردد [۳۸].

۴-۳ کنترل فشار

برای افزایش فشار جریان از کمپرسور محوری استفاده می‌شود مدل‌سازی این تکنولوژی با کمک نرم افزار ترموفلو انجام می‌گردد. کمپرسورها برای کار در یک دبی و نسبت فشار مشخص طراحی می‌شوند و از نقشه عملکرد کمپرسور برای بررسی نحوه عملکرد در شرایط خارج از نقطه طراحی استفاده می‌گردد. با برآورد توان مورد نیاز کمپرسور می‌توان هزینه اولیه آن را بدست آورد [۳۸] . همچنین از رگلاتور و یا شیرهای فشار شکن کنترلی می‌توان برای کاهش فشار استفاده نمود.

۴-۴ جداسازی سولفور

گازهای همراه اکثر چاه‌ها در ترکیب خود دارای سولفور قابل توجهی می‌باشند، به این گازها به دلیل بوی نامطبوعی که دارند گازهای ترش اطلاق می‌شود. وجود سولفور در ترکیب گاز هم به دلیل سمی بودن و هم قابلیت ایجاد خوردگی در قطعات، مطلوب نمی‌باشد. سولفور در گاز معمولاً به صورت H_2S موجود است. پروسه جداسازی سولفور از گاز را اصطلاحاً شیرین سازی گاز می‌نامند.

امروزه روش‌های مختلفی برای جداسازی سولفور از گاز وجود دارد. متداول‌ترین روش که ۹۵٪ عملیات شیرین سازی در کشور آمریکا با استفاده از آن انجام می‌شود پروسه آمین می‌باشد. در این روش از جاذب مایع سولفور استفاده می‌شود و برای بازیابی جاذب غنی شده از بخار استفاده می‌شود [۳۷،۴۰]. برای برآورد هزینه نیز از کارهای انجام شده در این زمینه استفاده می‌شود [۴۱،۹].

۴-۵ جذب ذرات

وجود ذرات با ابعاد میکرونی در گاز همراه موجب ساییدگی تجهیزات می‌گردد. بنابراین یکی از تکنولوژی‌های مورد نیاز تکنولوژی جذب ذرات می‌باشد. روش‌های متداول برای جذب ذرات استفاده از فیلترها و اسکرابر می‌باشد. اسکرابرها انواع مختلفی دارند. اسکرابر ونتوری بیشترین بازده را در جذب ذرات دارند (۷۰٪ تا ۹۹٪) همچنین هزینه اولیه و نگهداری آن‌ها نسبت به سایر گزینه‌ها بیشتر است، با توجه به حساسیت بالای مولدهای توان از جمله توربین گاز استفاده از این اسکرابر برای جذب حداکثری ذرات منطقی می‌باشد [۱۲،۴۲].

۵- برآورد هزینه

طرح مناسب و قابل اجرا، طرحی است که علاوه بر امکان پذیری فنی دارای توجیه اقتصادی باشد برای تحلیل اقتصادی در این مقاله از دو معیار بازگشت سرمایه و ارزش خالص کنونی استفاده شده است. برای محاسبه این معیار به برآورد هزینه اولیه طرح و همچنین هزینه تمام شده تولید واحد محصول نیازمندیم. برای تخمین این موارد از روش درصد قیمت تجهیزات تحویل داده شده[۱۸] و روش تخمین هزینه واحد[۱۹] استفاده می‌شود. این روش برای تخمین سرمایه گذاری کل یا ثابت به کار می‌رود و نیاز به تعیین قیمت تجهیزات مورد استفاده دارد. سایر هزینه‌ها به صورت درصدی از این هزینه تخمین زده می‌شوند [۴۳]. جداول مربوطه و فرمول‌های استفاده شده در پیوست (۱) ضمیمه شده است.

۶- تحلیل پارامتریک

در این بخش به بررسی فنی اقتصادی طرح استفاده از گاز فلر برای تولید برق می‌پردازیم. برای این امر ابتدا به تعیین شرایط گاز فلر پرداخته و به تکنولوژی‌های آماده سازی مورد نیاز، اشاره می‌شود (امکان‌پذیری فنی). با مشخص شدن هزینه اولیه سیستم و تکنولوژی های آماده سازی، با استفاده از روش های پیوست (۱) هزینه تمام شده واحد محصول محاسبه می شود. همچنین با استفاده از داده های جدول (۱) قیمت سوخت مصرفی، برق تولیدی و نرخ تنزیل به سال پایه تعیین می گردد. حال با تغییر پارامترهای کلیدی ازجمله نقطه طراحی، دبی، دمای محیط، میزان تغییرات ترکیب گاز، قیمت فروش برق و نرخ تنزیل، تاثیر آنها بر اقتصاد طرح بررسی می گردد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

۶-۱- فرضیات

به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات دقیق و واقعی از ترکیب و نحوه تغییرات گاز های همراه در کشور و تنوع آن، جهت بررسی تأثیر میزان تغییرات ترکیب، با استفاده از منبع موجود در این زمینه [۴۴]، سه دسته گاز در نظر گرفته شده است که شرایط و نحوه تغییرات ترکیب دقیق آن‌ها در پیوست (۲) ضمیمه شده است. به طور کلی دسته اول دارای تغییرات شدید ترکیب با افزایش ۱۴٪ ارزش حرارتی بر واحد جرم و دسته دوم تغییرات کمتر با ۷.۳٪ افزایش ارزش حرارتی بر واحد جرم در طول دوره استفاده می‌باشد و دسته سوم ترکیب و روند تغییرات دسته اول را داراست و تنها میزان ناخالصی آن بیشتر است.

همچنین طول عمر مفید سیستم معادل ۲۰ سال، محاسبات اقتصادی بر مبنای واحد دلار امریکا و ارزش ارزی آن در سال ۲۰۰۹ میلادی ($2450 \frac{\text{تومان}}{\text{دلار}}$)، مدت زمان عملکرد سالیانه معادل 8000 ساعت در سال و برند توربین گاز زیمنس و موتور احتراق داخلی کترپیلار در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از تکرار شرایط سوخت و محیط، حالت اولیه در جدول (۱) آورده شده است و هر جا تغییری نسبت به این حالت وجود داشته باشد ذکر می‌گردد.

برای درک بهتر سیستم مورد بررسی نمودار مرجع انرژی در شکل (۵) آورده شده است. این نمودار سطوح مختلف انرژی و اجزای سیستم را نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است با توجه به دسته های گاز تعریف شده و محدودیت‌های مولدها و روش‌های آماده سازی که پیش‌تر توضیح داده شده تنها چهار جزء برای آماده سازی نیاز داریم که نحوه عملکرد و برآورد هزینه آن‌ها در منابع ذکر شده در بخش آماده سازی به طور کامل موجود است. با این توضیحات هم اکنون به تحلیل پارامتریک مسئله می‌پردازیم.

جدول (1) مشخصات طرح مورد بررسی

اول	دسته گاز همراه
سال بیستم	نقطه طراحی
0.۰۵۵ $/kWh	قیمت فروش برق
0.0175	قیمت خرید سوخت
3.25 m^3/s	دبی حجمی سوخت
۱۵°C	دمای محیط
%۸	نرخ تنزیل

شکل (5) نمودار مرجع انرژی سیستم

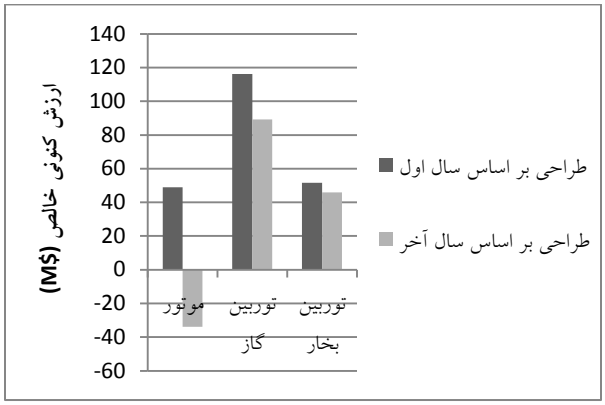
همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است با توجه به دسته های گاز تعریف شده و محدودیت‌های مولدها و روش‌های آماده سازی که پیش‌تر توضیح داده شده تنها چهار جزء برای آماده سازی نیاز داریم که نحوه عملکرد و برآورد هزینه آن‌ها در منابع ذکر شده در بخش آماده سازی به طور کامل موجود است. با این توضیحات هم اکنون به تحلیل پارامتریک مسئله می‌پردازیم.

۶-۲- نقطه طراحی

در شکل‌های (۶) و (۷) تأثیر نقطه طراحی بر اقتصاد طرح بررسی شده نمایش داده شده است. گاز همراه دارای ترکیب متغیر در طول زمان می باشد در دسته اول با گذشت زمان چگالی گاز افزایش می‌یابد و ترکیب گاز سنگین‌تر می‌شود که قابلیت استفاده از مولد در ظرفیت بالاتر را ایجاد می کند. طراحی سیستم بر اساس سال های آخر موجب کار سیستم زیر بار نامی در سال‌های ابتدایی می‌شود و طراحی بر اساس سال‌های ابتدایی ظرفیت استفاده از تمام سوخت در سال های انتهایی را نخواهد داشت. در واقع انتخاب سال طراحی هم بر ظرفیت و در نتیجه هزینه اولیه تأثیر دارد و هم برق تولیدی در سال‌های مختلف.

شکل (6) تأثیر نقطه طراحی بر زمان بازگشت سرمایه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

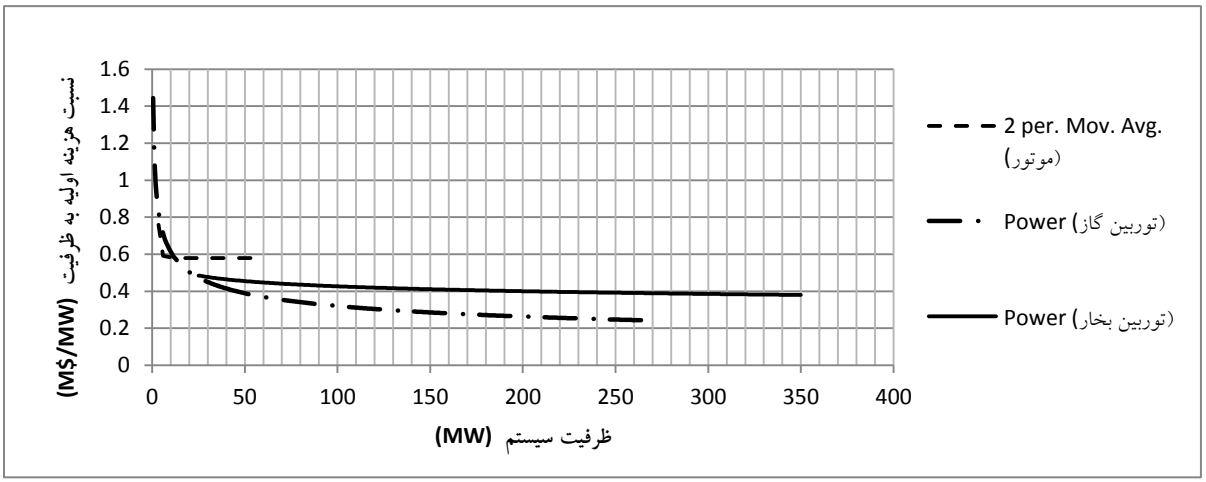


شکل (7) تأثیر نقطه طراحی بر ارزش کنونی طرح

دلیل بازگشت سرمایه سریع‌تر طراحی بر اساس سال اول، هزینه اولیه پایین‌تر سیستم‌ها (به دلیل ظرفیت پایین‌تر) و همچنین افت شدید توان خروجی و بازده در سال‌های ابتدایی در طرح‌هایی است که بر اساس سال آخر طراحی شده‌اند. ارزش کنونی طرح‌ها در شکل (۷) مقایسه شده‌اند توربین بخار به دلیل عملکرد مناسب زیر بار نامی در صورت طراحی بر اساس سال آخر می‌تواند برق بیشتری نسبت به سایر گزینه‌ها تولید نماید و در نتیجه ارزش کنونی طرح نسبت به طراحی بر اساس سال اول، کاهش کمتری دارد. موتورهای احتراق داخلی با توجه به افزایش شدید هزینه اولیه با ظرفیت در طراحی بر اساس سال آخر، ارزش کنونی طرح را علیرغم امکان تولید برق بیشتر، به شدت کاهش می‌دهند. در مورد توربین گاز توان خروجی سیستم طراحی شده در سال بیستم، تا حدود نیمه عمر، کمتر از توان خروجی سیستم طراحی شده بر پایه سال اول می‌باشد، که دلیل آن عملکرد ضعیف سیستم زیر بار نامی می‌باشد. وجود نرخ تنزیل موجب کم ارزش شدن برق تولیدی در سال‌های انتهایی می‌گردد و در نتیجه طراحی سیستم بر اساس سال آخر برای توربین گاز باعث کاهش ارزش خالص کنونی و افزایش سال بازگشت سرمایه می‌گردد.

۶-۳- دبی

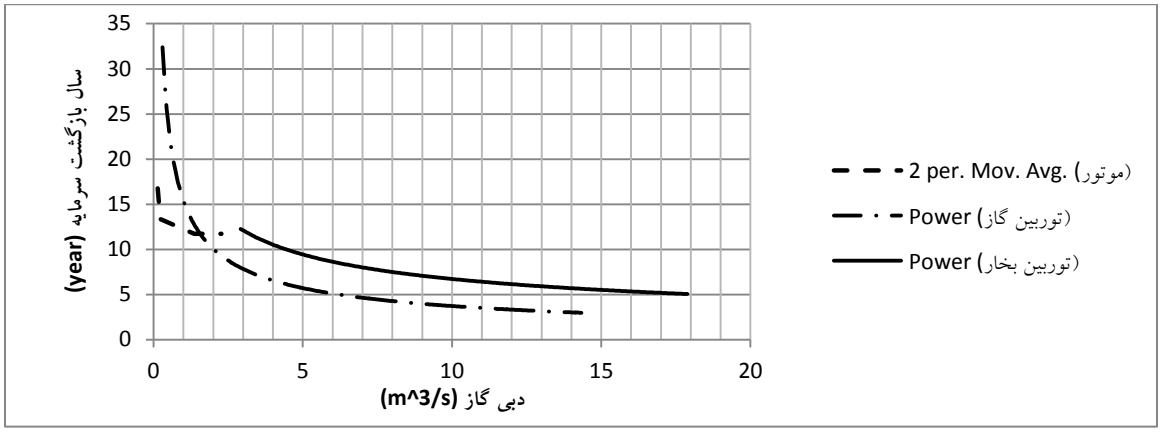
افزایش دبی موجب افزایش توان خروجی سیستم می‌گردد و نحوه تغییر نسبی هزینه اولیه و توان خروجی پارامتر کلیدی و موثر بر اقتصاد طرح می‌باشد که در شکل (۸) نمایش داده شده است. دلیل دیگر روند تغییرات، افزایش بازده سیستم‌ها با افزایش دبی یا ظرفیت می‌باشد. همان‌طور که در نمودار (۹) مشخص است با افزایش دبی بازگشت سرمایه سریع‌تر خواهد بود. در این بخش نقطه طراحی بر اساس سال اول می‌باشد.



شکل (8) تغییرات نسبت هزینه اولیه به ظرفیت با ظرفیت سیستم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]



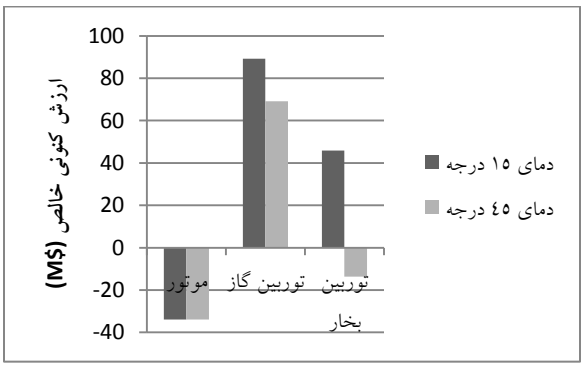
شکل (۹) تأثیر دبی بر زمان بازگشت سرمایه

۶-۴- دمای محیط

از جمله تأثیرات افزایش دمای محیط بر عملکرد مولدهای توان، کاهش بازده و کاهش توان خروجی می‌باشد. در این بخش تأثیر دما بر عملکرد زیر ظرفیت نیز بررسی می‌گردد. موتورهای احتراق داخلی تأثیری از دمای محیط نمی‌پذیرند، سیکل توربین بخار در شرایط بار زیر نامی نیز همانند بار نامی به دلیل افزایش اجباری فشار خروجی توربین دچار افت بازده می‌شود. اما توربین‌های گازی رفتاری متفاوت دارند، کمپرسورها دارای حداکثر دبی حجمی می‌باشند تا زمانی که به دلیل کاهش چگالی هوا و محدودیت دبی حجمی کمپرسور، دبی جرمی لازم برای کار در توان دلخواه تأمین نگردد، با افت توان خروجی مواجه هستیم، اما زمانی که سیستم با فاصله از توان نامی کار می‌کند و دبی جرمی هوای مورد نیاز توسط کمپرسور تأمین می‌گردد، نه تنها افتی در توان خروجی نخواهیم داشت بلکه ممکن است با مصرف سوخت کمتر نسبت به زمانی که دمای محیط پایین است، بتوان به توان خروجی مورد نظر دست یافت که به دلیل کاهش اختلاف دمای هوای ورودی به محفظه احتراق و دمای خروجی لازم می‌باشد.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود در مورد توربین گاز زمانی که طراحی بر اساس سال آخر انجام شده باشد افزایش دمای محیط تأثیر زیادی بر سال بازگشت سرمایه نخواهد داشت ولی ارزش کنونی خالص طرح را به شدت کاهش می‌دهد که به دلیل افت توان خروجی در سال‌های آخر (نزدیک بار نامی) می‌باشد.

شکل (۱۰) تأثیر دما بر زمان بازگشت سرمایه



شکل (۱۱) تأثیر دما بر ارزش کنونی خالص

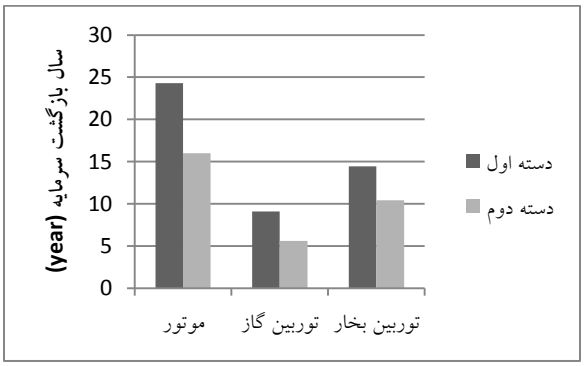
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

۶-۵- دسته گاز همراه

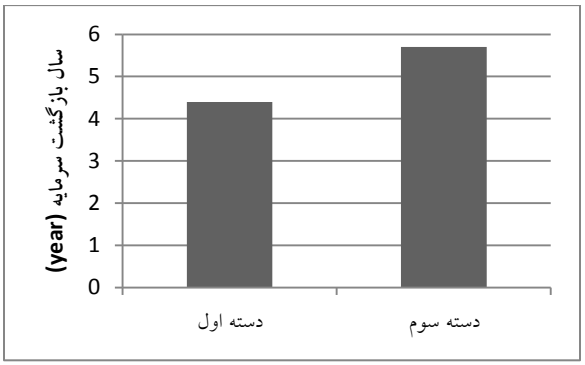
یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار بر طرح، ترکیب گاز همراه و نحوه تغییرات آن می‌باشد که می‌تواند حالت‌های مختلفی داشته باشد، مطابق شکل (۱۲) زمان بازگشت سرمایه برای دسته دوم گاز کمتر می‌باشد که هم به دلیل ظرفیت پایین‌تر سیستم طراحی شده و در نتیجه هزینه اولیه کمتر است و هم به دلیل تولید برق بیشتر در سال‌های ابتدایی به دلیل نزدیک‌تر بودن کارکرد به بار نامی می‌باشد. در مورد ارزش خالص کنونی میزان برق تولیدی در کل دوران کارکرد مد نظر است و در مورد توربین بخار چون افت عملکرد زیر بار نامی بسیار کم است و دسته اول در سال‌های آخر برق بیشتری تولید خواهد نمود (با توجه به دبی جرمی بیشتر) در مجموع دسته گاز اول ارزش کنونی بیشتری خواهد داشت (شکل (۱۳)).

دسته سوم نسبت به دسته اول در میزان سولفور و ذرات متفاوت می‌باشد میزان سولفور در حدی است که برای استفاده در توربین گاز نیاز به آماده سازی دارد اما در مورد بویلر سیکل توربین بخار و موتور احتراق داخلی می‌توان به طور مستقیم از آن استفاده کرد. اما برای استفاده از این دسته در هر سه مولد نیاز به دفع ذرات می‌باشد. در شکل (۱۴) بازگشت سرمایه برای توربین گاز در صورتی که از دو دسته اول و سوم استفاده شود، مقایسه شده است.



شکل (۱۲) تأثیر دسته گاز بر زمان بازگشت سرمایه

شکل (۱۳) تأثیر دسته گاز بر ارزش کنونی خالص



شکل (۱٤) تأثیر دسته گاز بر زمان بازگشت سرمایه

۶-۶- قیمت فروش برق

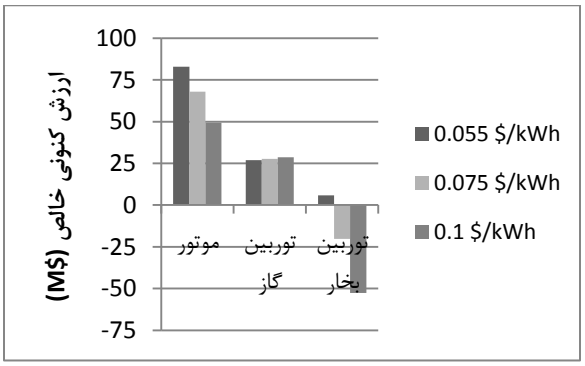
قیمت فروش برق تأثیر مستقیم بر روی سود سالانه سیستم خواهد داشت و مسلماً به اقتصاد طرح کمک خواهد نمود. تأثیر دیگر افزایش قیمت برق تغییر نقطه طراحی بهینه و دسته گاز مناسب می‌باشد.

شکل (۱۵) اختلاف ارزش خالص کنونی مولدها با طراحی در سال اول و آخر را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید در حالت اولیه در مورد موتورهای احتراق داخلی که هزینه اولیه نسبتاً بالایی دارند، طراحی بر اساس سال اول ارزش بیشتری خواهد داشت و دلیل آن کم ارزش بودن برق تولیدی مضاعف در طرح بر پایه سال آخر نسبت به هزینه اولیه آن می‌باشد. اما با افزایش قیمت فروش برق، شرایط تغییر کرده و طرح‌هایی که بر پایه سال آخر طراحی شده‌اند ارزش کنونی بیشتری می‌یابند و اختلاف ارزش کنونی طرح‌ها با نقطه طراحی سال اول و نقطه طراحی سال آخر کاهش می‌یابد. بیشترین تفاوت مربوط به توربین بخار می‌باشد که با توجه به عملکرد مناسب زیر بار نامی برق بیشتری نسبت به سایر گزینه‌ها تأمین می‌نماید و

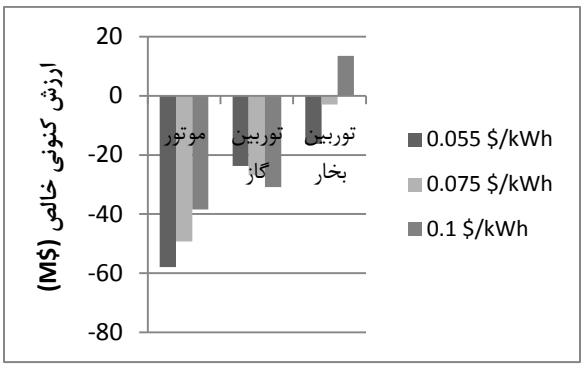
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

همان‌طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است با افزایش قیمت فروش برق طراحی بر پایه سال آخر ارزش خالص بیشتری نسبت به طراحی بر اساس سال اول می‌یابد. در مورد توربین‌های گاز همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد به دلیل افت شدید عملکرد زیر بار نامی و وجود نرخ تنزیل طراحی بر اساس سال اول اقتصادی‌تر خواهد بود و با افزایش قیمت فروش برق اختلاف آن با طراحی بر اساس سال آخر کمی افزایش نیز می‌یابد چون در این مولد طرح‌ها با نقطه طراحی سال اول علا رغم سوخت کمتر برق بیشتری نسبت به طرح‌ها بر پایه سال آخر تولید می‌نمایند.

شکل (۱۶) اختلاف ارزش کنونی طرح‌های بر پایه سال آخر دو دسته گاز اول و دوم را در نرخ‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید افزایش قیمت فروش برق علاوه بر اقتصادی‌تر کردن طرح‌های مختلف وضعیت نسبی آن‌ها را نیز تغییر می‌دهد. در این نمودار نشان داده شده است که با افزایش قیمت فروش برق ارزش کنونی سیستم‌هایی که با گاز دسته اول و بر اساس طراحی سال آخر کار می‌کنند افزایش می‌یابد و در مورد توربین بخار حتی بیشتر از دسته گاز دوم می‌گردد.



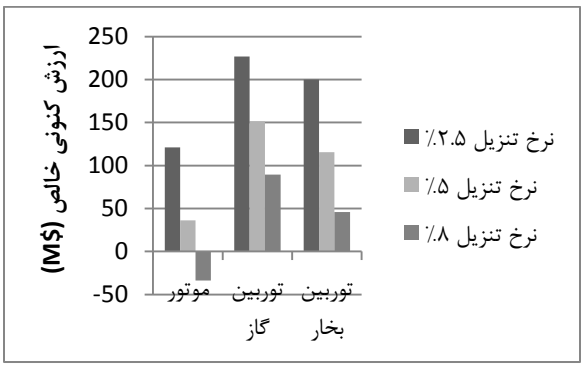
شکل (۱۵) تأثیر قیمت فروش برق بر اختلاف ارزش کنونی طرح بر پایه سال اول با طرح بر پایه سال آخر



شکل (۱۶) تأثیر قیمت فروش برق بر اختلاف ارزش کنونی دسته اول با دوم گاز همراه

۶-۷- نرخ تنزیل

این پارامتر باعث کاهش قدرت خرید پول می‌گردد، بنابراین ارزش کنونی طرح‌ها را کاهش می‌دهد، شکل (۱۷) ارزش کنونی طرح را برای سه نرخ بهره متفاوت نشان می‌دهد. نکته دیگر در این زمینه تأثیر شدید تر نرخ بهره بر طرح‌ها با نقطه طراحی سال آخر می‌باشد. بیشتر درآمد در این طرح‌ها در سال‌های آخر بدست می‌آید و ارزش کنونی آن‌ها در صورت در نظر گرفتن نرخ تنزیل به شدت کاهش می‌یابد و همین امر موجب افزایش تأثیر منفی نرخ تنزیل در این دسته از طرح‌ها می‌باشد. در شکل (۱۸) نشان داده شده است. با افزایش نرخ تنزیل طراحی بر اساس سال اول نسبت به طراحی بر اساس سال آخر اقتصادی‌تر می‌گردد.



شکل (۱۷) تأثیر نرخ تنزیل بر ارزش کنونی خالص

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

شکل (۱۸) تأثیر نرخ تنزیل بر اختلاف ارزش کنونی طرح بر پایه سال اول با طرح بر پایه سال آخر

۷- نتیجه‌گیری

با بررسی‌ها انجام شده می‌توان نتیجه گرفت استفاده از گاز همراه برای تولید برق در اکثر حالت‌ها از نظر فنی امکان پذیر می‌باشد و اگر چه اقتصادی بودن طرح تابع عوامل متعددی از جمله دبی سوخت، ترکیب سوخت، نحوه تغییرات سوخت، میزان ناخالصی‌های سوخت، میزان تغییرات سوخت، مولد مورد استفاده، نقطه طراحی، دمای محیط، هزینه خرید تجهیزات، قیمت فروش برق و نرخ تنزیل می‌باشد، در تعداد قابل توجهی از حالت‌های بررسی شده در بخش تحلیل پارامتریک طرح‌ها اقتصادی بوده و بازگشت سرمایه کمتر از سه سال دارند.

همچنین مشخص شد در دسته گازهای بررسی شده در این مقاله، در دبی‌های پایین موتورهای احتراق داخلی گزینه اقتصادی‌تر می‌باشند و با افزایش دبی توربین‌های گاز به دلیل هزینه اولیه کمتر نسبت به توربین بخار و بازده بالای خود گزینه بهتری هستند. مولد توربین بخار به دلیل عملکرد مناسب زیر بار نامی در طراحی‌هایی که بر اساس ظرفیت بیشتر انجام می‌گردد برای دسته گازهای همراه که دارای تغییر بیشتر هستند، مناسب‌ترین گزینه و موتورهای احتراق داخلی غیر اقتصادی‌ترین می‌باشند.

از دیگر نتایج این مقاله می‌توان به نمایش رفتار نقطه بهینه طراحی در دسته گازهای بررسی شده اشاره نمود که با افزایش قیمت فروش برق و کاهش هزینه اولیه به سمت ظرفیت بالاتر حرکت می‌نماید و با افزایش نرخ تنزیل و میزان تغییرات سوخت به سمت ظرفیت پایین‌تر جابجا می‌گردد. نقطه طراحی بهینه در مولد توربین بخار با توجه به عملکرد مناسب زیر بار نامی نسبت به سایر گزینه‌ها بیشتر به سمت ظرفیت‌های بالاتر تمایل دارد و موتورهای احتراق داخلی به دلیل رشد هزینه اولیه بسیار بالا، بیشتر به سمت ظرفیت‌های پایین‌تر.

در صورت افزایش دمای محیط، عملکرد موتورهای احتراق داخلی دچار خدشه نمی‌گردد. در صورتی که مولد در توان نامی کار کند توربین بخار با کاهش بازده و توان خروجی کمتر مواجه خواهد بود و نسبت به توربین گاز گزینه بهتری می‌باشد. اما در صورت عملکرد زیر بار نامی توربین‌های گازی نسبت به توربین بخار، عملکرد بهتری خواهند داشت.

با بررسی وضعیت منطقه سیری و مقایسه نتایج با کار خانم مشاط [4] در شرایط یکسان استفاده از توربین گاز جهت تولید الکتریسیته، زمان بازگشت سرمایه ۲.۷۸ سال را داراست و تولید متانول زمان بازگشت ۴.۲۳ سال که نشان دهنده اقتصادی‌تر بودن تولید الکتریسیته در این منطقه و قابلیت بالای رقابت تولید الکتریسیته با سایر گزینه های استفاده از گاز همراه می‌باشد.

پیشنهادات

همان‌طور که در مقدمه مقاله ذکر شد مقالات در زمینه استفاده از گاز همراه برای تولید الکتریسیته بسیار معدود می‌باشد و امید است این مقاله آغازی برای ادامه کارهای بیشتر و دقیق‌تر در این زمینه گردد ازجمله مواردی که برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود، بررسی امکان استفاده از مولدها با قابلیت استفاده از سوخت مکمل می‌باشد که می‌تواند مشکل تغییرات شدید سوخت و عملکرد زیر بار نامی مولدها را حل نماید. همچنین جمع آوری اطلاعات دقیق از موقعیت، ترکیب و نحوه تغییرات گازهای همراه کشور می‌تواند بسیار با ارزش و مفید باشد.

ضمایم

ضمیمه (۱) اطلاعات تکمیلی روند برآورد هزینه ارزش کنونی خالص[1]

برای بدست آوردن ارزش کنونی خالص، سود سالانه حاصل از طرح به سال پایه تنزیل داده می شود و با هزینه اولیه (منفی) جمع می گردد و ارزش کنونی طرح بدست می‌آید. اگر ارزش کنونی مثبت باشد سرمایه گذاری بر اساس نرخ تنزیل کنونی سود آور است و اگر منفی باشد طرح سودآور نخواهد بود.

$$NPV = C - D$$

[1] Net Present Value

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

تجهیزات خریداری شده	٪100
نصب تجهیزات خریداری شده	٪۳۰
ابزار دقیق و کنترل (نصب شده)	٪۱۵
لوله کشی (نصب شده)	٪۱۵
برق (نصب شده)	٪۱۵
ساختمان‌ها (شامل خدمات)	٪۴۰
کل هزینه مستقیم واحد صنعتی	٪۲۱۵
مهندسی و نظارت	٪۱۹.۳۵
هزینه های ساختمانی	٪۱۹.۳۵
هزینه های قانونی	٪۱۳.۳
مجموع هزینه های غیرمستقیم	٪۵۲
سرمایه گذاری ثابت	٪۲۶۷
سرمایه در حال گردش	٪۲۹.۷
سرمایه گذاری کل	٪۲۹۷

$$D = \sum_{j=1}^{n} \frac{P_y}{(1+i)^j}$$

NPV ارزش کنونی خالص (M$)

C هزینه سرمایه گذاری کل (M$)

D ارزش کنونی کل سود طرح (M$)

i نرخ تنزیل

P_y سود سالانه (M$/Year)

j سال (Year)

n عمر سیستم (Year)

سالی که در آن هزینه سرمایه گذاری با ارزش کل سود طرح برابر گردد، سال بازگشت سرمایه می‌باشد.

در ادامه جداول مورد استفاده برای روش درصد قیمت تجهیزات تحویل داده شده و همچنین مقادیر استفاده شده در روش تخمین هزینه واحد ذکر شده است.

جدول (۲) مقادیر مورد استفاده در روش درصد قیمت تجهیزات

الف) هزینه های مستقیم تولید

۱. مواد خام (با توجه به قیمت سوخت مصرفی و میزان آن مشخص می‌گردد)

۲. کارگر عملیاتی (۱۰ درصد قیمت تمام شده محصول)

۳. نظارت مستقیم و کارگر ماهر (۱۰ درصد کارگر عملیاتی)

۴. تسهیلات جانبی (۱۵ درصد قیمت تمام شده محصول)

۵. تعمیر و نگهداری (۵ درصد سرمایه گذاری ثابت)

۶. تأمین منابع عملیاتی (۱۰ درصد هزینه تعمیر و نگهداری)

ب. هزینه های ثابت

۷. استهلاک (با استفاده از روش خط مستقیم، نسبت سرمایه گذاری ثابت به عمر واحد)

۸. مالیات‌های محلی (۱ درصد سرمایه گذاری ثابت)

ج. هزینه های بالاسری کارخانه (۱۰ درصد قیمت تمام شده محصول)

ضمیمه (۲) اطلاعات دسته های گاز همراه

تغییرات ترکیب دسته اول و دوم در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) آورده شده است. دسته سوم روندی مشابه دسته اول دارد و جداول (۳) و (۴) سایر تفاوت‌ها را تعیین می‌کند.

جدول۳ مشخصات دسته گاز

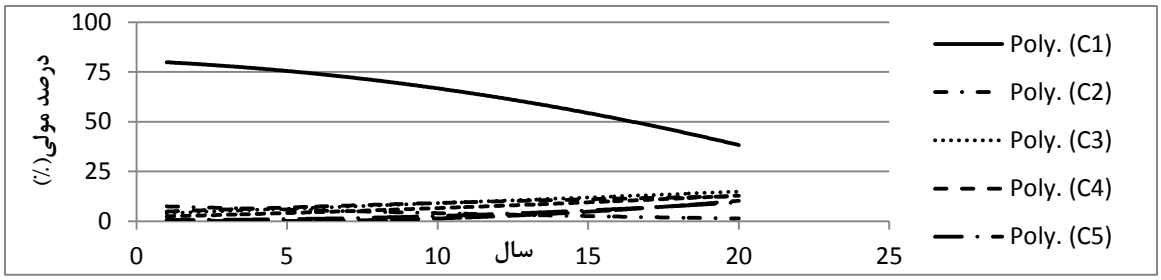
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

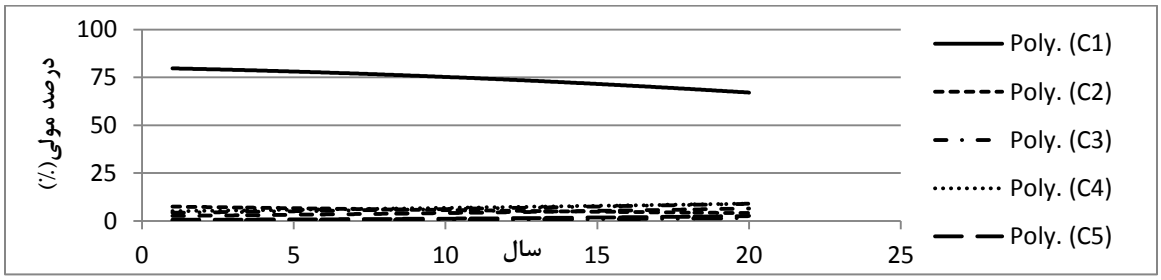
پارامتر	واحد	مقدار
Temperature	(C)	۲۵
Pressure	(bar)	۱.۵
Moisture	(lb./mmscft)	۳
Sulfur	ppm(w)	۱۰۰
Particulate	ppm(w)	۱۰۰

پارامتر	واحد	مقدار
Temperature	(C)	۲۵
Pressure	(bar)	۱.۵
Moisture	(lb./mmscft)	۳
Sulfur	ppm(w)	۱۵۰۰۰
Particulate	ppm(w)	۱۰۰۰۰

جدول٤ مشخصات دسته گاز سوم



شکل ۱۹ تغییرات ترکیب دسته گاز اول و سوم در طول زمان



شکل ۲۰ تغییرات ترکیب دسته گاز دوم در طول زمان

مراجع

[1] Michael F.Farina, “Flare gas reduction recent global trends and policy consideration”, GE Energy Global strategy and planning Report, 2010.

[2] Mauricio Ríos, “Satellite observations show declining levels of gas flaring, greenhouse emissions”, www.worldbank.org, 2009.

[۳] "ترازنامه هیدرو کربوری کشور سال 91"، گروه مدیریت انرژی موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، ۱۳۹۱.

[4] آزاده معروف مشاط، "امکان سنجی فنی اقتصادی استفاده از گازهای فلز برای تبدیل به محصول دیگر در ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی سیستم‌های انرژی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.

[5] “Using Russia’s associated gas”, PFC Energy gas group consulting Report, 2007.

[6] A.Yu. Knizhnikov, N. Poussenkova, “Russian associated gas utilization: problems and prospects”, Institute of World Economy and International Relations of the Russian Academy of Sciences Report, 2009.

[۷] M.R. Rahimpour, Z. Jamshidnejhad, S.M. Jokar, G. Karimi, A. Ghorbani , A.H. Mohammadi, “Comparative study of three different methods for flare gas recovery of Asalooye gas

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

[۲۲] C. Rahmouni, G. Brecq, M. Tazerout, O. Le Corre, "Knock rating of gaseous fuels in single cylinder spark ignition engine", Journal of Fuel, 2003.

[۲۳] Martin Malenshek, Daniel B. Olsen, "Methane number testing of alternative gaseous fuels", Journal of Fuel, 2008.

[۲۴] James P. Chiu, "Paper study of the effect of varying fuel composition on fuel supplied to Detroit Diesel Gas engines", Southern California Gas Company Report, 2005.

[۲۵] Chen Gengliang, Tang Meng, He Yongming, Li Yushan, Chi Yongjie, "Compressed Natural Gas as Vehicle Fuel", National Standard of the People's Republic of China, 2000.

[۲۶] Johan Boij, Paul Zepf, "Methane number as a parameter for gas quality specifications", The European Association of Internal Combustion Engine Manufacturers Report, 2012.

[۲۷] W.A.J. Bleuanus, G. Koornneef, B.J. Geluk, "Technical report on influence of biogas composition on key gas parameters and resulting engine performance and emissions; NGV specifications and type approval reference gases; influence of biomethane on catalyst performance, including H2S poisoning", European Commission Report, 2010.

[۲۸] A.J. Bruijstens, W.P.H. Beuman, M.v.d. Molen, J.d. Rijke, R.P.M. Cloudt, G. Kadijk, O.o.d. Camp, S. Bleuanus, "Biogas composition and engine performance, including database and biogas property model", European Commission Report, 2008.

[۲۹] G. Przybyla, L. Ziolkowski, A. Szlek, "performance of SI engine fuelled with LCV gas", Institute of Thermal Technology Silesian University of Technology Report, 2008.

[۳۰] "Gas engine application and installation guide", Caterpillar Inc, 1997.

[۳۱] "Sulfur content in marine fuels", ECG Academy Report, 2011.

[۳۲] Gerhard Pirker, "Gas engine solutions for low BTU applications", GE Energy Jenbacher Gas Engine Report, 2010.

[۳۳] Stephen Hull, Karen Wood, Leda Gomes, Ben Ho, Steve Kerr, "Guidebook to gas interchangeability and gas quality", BP Exploration Operating Company Report, 2011.

[۳۴] D. Rue, Y. Chudnovsky , "Overview of Commercial Burner Test Program With Early Results", Gas Technology Institute Report, 2007.

[۳۵] Brett C. Singer, "Appliance emissions and air quality impacts of LNG", Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 2007.

[۳۶] "Design and Application Details", Ovenpak Gas Burners Catalogue.

[۳۷] "Processing natural gas", www.Naturalgas.org.

refinery", Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2011.

[۸] M.R. Rahimpour, S.M. Jokar, "Feasibility of flare gas reformation to practical energy in Farashband gas refinery", Journal of Hazardous Materials, 2012.

[۹] Peter Johansen, Finn Hirslund, Birgitte Brinch Madsen, Daniel La Cour, Trine Mellen, "Global gas flaring reduction a public-private partnership, Flared gas utilization strategy opportunities for small-scale uses of gas", World Bank Group Report, 2004.

[۱۰] Jan Brandin, Martin tuner, Ingemar Odenbrand, "Small scale gasification: gas engine CHP for biofuels", Swedish Energy Agency Report, 2011.

[۱۱] "Equipment design and cost estimation for small modular biomass systems, synthesis gas cleanup, and oxygen separation equipment", National Renewable Energy Laboratory Report, 2006.

[۱۲] Paul M. Henderic, "An assessment of biomass powered micro turbines and the potential for application in rural china", Thesis for the degree of Master of Science in Engineering from Princeton University, 2000.

[۱۳] Jesper Ahrenfeldt, "Characterization of biomass producer gas as fuel for stationary gas engines in combined heat and power production", Thesis for the degree of PHD from Technical University of Denmark,2007.

[۱۴] Paulina Jaramillo, H. Scott Mathews, "Landfill-Gas-to-Energy Projects: Analysis of Net Private and Social Benefits", Journal of Environment Science and Technology, 2005

[15] "Specification for fuel gases for combustion in heavy duty gas turbines", GE Power Systems Report, 2002.

[16] Volker Poloczek, Heinrich Hermsmeyer, "Modern gas turbines with high fuel flexibility", Siemens Energy Sector, 2008.

[۱۷] G.A. Rechards, M.M. Macmillian, R.S.Gemmen, W.A. Rogers, S.R. Cully, "Issues for low-emission, fuel flexible power systems", Journal of Progress in Energy and Combustion Science, 2001.

[18] Peter J Stuttaford, "Extended Fuel Flexibility for E and F-class Gas Turbine Combustion Systems", Alstom Power Systems Report, 2012.

[19] Volker Poloczek, Heinrich Hermsmeyer, "Modern gas turbines with high fuel flexibility", Siemens Energy Sector, 2008.

[۲۰] James Laughlin, Teresa Hansen, "Meeting gas quality challenges", Journal of Power Engineering, 2008.

[۲۱] Pratyush Nag, Fred shoemaker, "Fuel flexibility for Siemens gas turbines", 30th Energy buyers Conference, 2010.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]

[۳۸] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, "Introduction to heat transfer", Fifth Edition, John Wiley & Sons, 2007.

[۳۹] H. Cohen, H. I. H. Saravanamuttoo, G.F.C. Rogers, Paul Straznicky, "Gas turbine theory", Fourth Edition, Longman Group Limited, 1996.

[۴۰] Steven Zacari, "Removal of hydrogen sulfide from biogass using cow-manure compost", Thesis for the degree of Master of Science from Cornell University, 2003.

[۴۱] J. de Hullu, J.I.W. Maassen, P.A. van Meel, S. Shazad, J.M.P. Vaessen,

"Comparing different biogas upgrading techniques", Eindhoven University of Technology Report, 2008.

[۴۲] Daniel Charles Mussatti, "The EPA Air Pollution Control Cost Manual", U.S. Environmental Protection Agency Report, 2002.

[43] M.S. Peters , K.D.Timeerhaus, "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", Fourth Edition, McGraw-Hill, 1991.

[۴۴] Jacob Klimstra, "Application of spark ignited dual fuel and gas diesel engines through an examination of variety of case studies", Cogeneration and Trigeneration Sustainability in Action Symposium, 2009.

توجه: در صورت لزوم ضمایم حذف گردد. صرفاً برای مشاهده داوران محترم می‌باشد

زیرنویس‌ها

[1] Associated Gas
[2] Flare Gas
[3] General Electric
[4] World Bank group
[5] PFC Energy Group
[6] Biomass
[7] Landfill
[8] Paul M. Henderick
[9] Jesper Ahrenfeldt
[10] Jaramillo
[11] Biogass
[12] Thermoflow
[13] Wobbe Index
[14] Flash back
[15] Auto ignition
[16] Static and dynamic stability
[17] VLE Flash
[18] Percentage of Delivered Equipment Cost
[19] Unit Cost Estimate

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-16]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.4.7]