

طراحی و ساخت سامانه هم‌زمان قدرت و حرارت در مقیاس میکرو با استفاده از موتور درون‌سوز گازسوز

سیدهاشم صمدی^۱، برات قبادیان^{۲*}، غلامحسن نجفی^۳، سعید فعال^۴

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

h.samadi1987@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

ghobadib@modares.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

g.najafi@modares.ac.ir

^۴ کارشناس ارشد، دانشکده بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

faal_67@yahoo.com

دریافت مقاله: ۹۲/۶/۲۷ اصلاح مقاله: ۹۲/۷/۲۸

پذیرش مقاله: ۹۲/۷/۳۰

چکیده: در این تحقیق به طراحی و ساخت یک سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت با حداکثر تولید ۵ کیلووات الکتریسته و حرارت با محرک اولیه موتور درون‌سوز که با گاز طبیعی کار می‌کند، پرداخته شده است. این سیستم قادر خواهد بود نیازهای برق و گرمایی مورد نیاز را تأمین کند. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه بازده سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت نسبت به سیستم تولید الکتریسته معمول از ۲۵ درصد به ۷۵ درصد رسیده است. استفاده از این سیستم در مقایسه با سیستم‌های معمول تولید قدرت مزایای صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به همراه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: تولید هم‌زمان، MCHP، موتور گازسوز، انرژی.

سلول سوختی است. هم‌اکنون از موتورهای درون‌سوز برای تولید هم‌زمان قدرت و حرارت در ابعاد میکرو به‌خصوص در حالت‌های دور از شبکه برق‌رسانی به‌دلیل هزینه‌های هنگفت و مشکلات بسیار زیاد انتقال نیرو و خطوط انتقال برق استفاده می‌شود. با استفاده از موتورژنراتور می‌توان برق تولید کرد و با استفاده از حرارت گازهای خروجی از آگزوز و همچنین حرارت مایع خنک‌کننده، گرما و سرما تولید کرد [۷].

با وجود اینکه سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت کاربرد فراوانی دارد، نتایج تحقیقات محققان منتشرشده در این زمینه، بسیار اندک است. در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

بیشتر نتایج تحقیقات به‌عنوان اطلاعات درونی بخش صنایع و شرکت‌های تولیدی و پژوهشی پنهان مانده است. شروع استفاده از تولید هم‌زمان از یک منبع قدرت در مطالعات طبیسی‌زاده دیده می‌شود. او از یک تراکتور دوچرخ برای خشک‌کردن محصول شلتوک استفاده کرد. از گرمای آزادشده از سیستم خنک‌کننده، گرمای پوسته آگزوز و بدنه موتور برای خشک کردن محصول و از توان تراکتور دوچرخ برای راه‌اندازی دمنده خشک‌کن استفاده شد [۸].

بیشتر مطالعات دیگر در زمینه بررسی اقتصادی و پتانسیل آن در مناطق مختلف کشور بوده است. امکان‌سنجی تولید هم‌زمان قدرت و حرارت در بخش‌های آموزشی، خانگی، تجاری و عمومی را وزارت نیرو براساس قیمت یارانه‌ای حامل‌های انرژی، بحث و بررسی کرده است [۹]. زارعی نیز به ارزیابی استفاده از سیستم‌های CHP برای واحدهای مسکونی بزرگ پرداخته است [۱۰]. براتیان هم به مطالعات فنی و اقتصادی تولید هم‌زمان قدرت و حرارت با استفاده از بیوفیول در یک موتور درون‌سوز پرداخته است. وی دریافت که با افزایش میزان بیواتانول موجود در ترکیب، دما و فشار سیلندر و میزان آگزوزی دود افزایش و میزان مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد [۱۱]. همچنین قبادیان و همکاران به بررسی مدل اقتصادی سیستم CHP با استفاده از سوخت بیواتانول در یک موتور درون‌سوز در ایران پرداختند. آن‌ها دریافتند که استفاده از E5 و E10 (مخلوط بیواتانول ۵ و ۱۰ درصد با بنزین) از دید تولیدکننده در روش قیمت‌گذاری مستقیم برق، اقتصادی و در دیگر حالات، غیراقتصادی هستند؛ اما می‌توان با پرداخت یارانه برق به بیواتانول به مصرف‌کننده، استفاده از سامانه را اقتصادی کرد [۱۲]. عامری و همکاران به مقایسه فنی سیستم CHP با مخلوط مختلف سوخت بیواتانول اضافه‌شده به بنزین، در یک موتور درون‌سوز پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند در میان همه مخلوط‌ها، E20 (بیواتانول ۲۰ درصد)

۱. مقدمه

افزایش روزافزون مصرف انرژی در تمام شئون زندگی و محدودیت منابع انرژی از یک سو و مصرف بی‌رویه آن توسط جوامع مختلف از سوی دیگر، علاوه بر آلودگی محیط‌زیست و هدر دادن سرمایه‌های ملی، زندگی آینده بشر را با مخاطره مواجه ساخته است. تجربه ایران و جهان در دوره‌های گذشته نشان می‌دهد که رشد اقتصادی و توسعه صنعتی به‌عنوان پیش شرط‌های اقتدار سیاسی، استقلال ملی و شکوفایی فرهنگی، به عوامل مختلف از جمله انرژی و بهره‌وری مطلوب و بهینه از منابع آن نیازمند است. اگرچه ایران از غنی‌ترین منابع انرژی بهره‌مند است، تلف کردن و استفاده نادرست از آن خسارات جبران‌ناپذیری را در بودجه سالانه کشور وارد می‌کند؛ از این رو، استفاده منطقی از انرژی و برنامه‌ریزی در این زمینه، از اولویت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه شدت انرژی در ایران بیش از ۵/۴ برابر میانگین جهانی است [۱]، راهکارهایی را برای کاهش در مصرف انرژی و صرفه‌جویی در بخش‌های مختلف در کشور باید ارائه داد.

استفاده از روش‌های جدید تولید انرژی که معایب روش‌های معمول را نداشته باشد، امری متداول در سراسر جهان است. یکی از این فناوری‌های جدید، استفاده از تولید هم‌زمان قدرت و حرارت است. تولید ترکیبی قدرت و حرارت، روشی برای صرفه‌جویی در انرژی است که در آن قدرت و حرارت به‌طور هم‌زمان تولید می‌شوند. حرارت حاصل از تولید هم‌زمان می‌تواند به‌منظور گرمایش ناحیه‌ای یا در صنایع فرایندی استفاده شود. این سیستم‌ها در زمینه‌های مختلف صنعتی و کشاورزی (گلخانه‌ها، دامداری‌ها و ...)، تجاری و مسکونی استفاده می‌شود [۲-۵].

یک سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت، ۵ جزء اصلی دارد [۶]:
 ۱. محرک اولیه؛ ۲. ژنراتور؛ ۳. سیستم بازیافت گرما؛ ۴. تجهیزات فعال گرما (برای سیستم خنک‌کاری و تهویه هوا)؛ ۵. مدیریت و کنترل سیستم.
 امروزه توجه زیادی به استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان قدرت و حرارت در ابعاد کوچک (MCHP) به‌خصوص در حالت‌های دور از شبکه (به‌دلیل هزینه بالا و مشکلات بسیار زیاد انتقال نیرو و خطوط انتقال برق) شده است. سیستم‌های تولید هم‌زمان قدرت و حرارت که زیر ۲۰ kW توان تولید می‌کنند، به‌عنوان میکرو طبقه‌بندی می‌شوند [۵].
 محرک اولیه دارای توربین بخار، موتورهای درون‌سوز رفت‌وبرگشتی، توربین‌های احتراقی، میکروتوربین‌ها، موتور استرلینگ و

جدول (۱): مشخصات فنی موتور ژنراتور استفاده شده

موتور	
نوع سوخت	گاز مایع (LPG)، گاز طبیعی (NG)
نوع موتور	تک سیلندر، چهار زمانه، هوا خنک
قطر × کورس	۶۸×۵۴
حجم جابه‌جایی (cc)	۱۹۶
سیستم جرقه	کوئل ترانزیستوری (T.C.I)
ژنراتور	
فرکانس (Hz)	۵۰
توان مجاز (kW)	۲
حداکثر توان (kW)	۲/۲
جریان (A) / ولتاژ DC (V)	۱۲۷/۸۸
نوع ژنراتور	جریان تک‌فاز AC سینکرون

در این تحقیق، هدف استفاده از گرمای تلف‌شده گازهای خروجی از آگزوز، گرم کردن آب با استفاده از یک مبدل حرارتی است. محدوده دمای خروجی از آگزوز این موتور بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس است. این دما بعد از خروجی صداخفه‌کن موتور در دسترس است. برای آنکه دمای بیشتر و در نتیجه انرژی گرمایی بیشتری به دست آید، تغییراتی در موتور اعمال و مجموعه صداخفه‌کن موتور برداشته شد. محدوده دمای خروجی از آگزوز بعد از اعمال تغییرات ۴۲۰ تا ۶۸۰ درجه سلسیوس به دست آمد.

۲.۲. لوله و اتصالات

در این مطالعه، برای هدایت انرژی تلف‌شده از آگزوز موتور به سمت مبدل حرارتی و استفاده از انرژی آن برای تبادل گرمایی با سیال مد نظر، یعنی آب، از لوله‌ها و اتصالات، شیرهای کنترل و شیرهای کنارگذر با پیکربندی مخصوص استفاده شد.

شکل (۱) طرح کلی از نحوه اتصال شیرهای کنارگذر در سیستم MCHP در حال آزمایش را نشان می‌دهد. در زمان راه‌اندازی سیستم، شیرهای شماره ۱ و ۲ به‌طور کامل بسته و شیر شماره ۳ باز است و گازهای خروجی مستقیم وارد هوا می‌شوند. این انتخاب باعث می‌شود که در زمان راه‌اندازی، موتور بدون هیچ مشکلی روشن و از برگشت گاز و خفه‌کردن آن جلوگیری شود. بعد از زمانی که عملکرد موتور به حالت پایدار رسید (حدود ۵ تا ۷ دقیقه)، شیر شماره ۳ به‌طور کامل بسته و شیرهای شماره ۱ و ۲ باز می‌شوند. گازهای خروجی از موتور بعد از عبور از مبدل حرارتی و تبادل گرمایی با آب وارد هوا می‌شوند.

بیشترین بازافت گرما را دارد. همچنین آن‌ها دریافتند با افزایش بیواتانول به سوخت، بازده CHP افزایش می‌یابد [۱۳].

مطالعاتی نیز در خصوص سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت در مقیاس میکرو انجام شده است. قلی‌زاده به بررسی ترمودینامیکی، اقتصادی و محیط‌زیستی چرخه هم‌زمان قدرت و حرارت در مقیاس میکرو بر پایه میکروتوربین گازی پرداخته است [۱۴]. تیموری به امکان‌سنجی فنی اقتصادی استفاده از MCHP در ایران پرداخته است. وی به مطالعه امکان استفاده اقتصادی MCHP با استفاده از محرک موتور استرلینگ در مناطق مختلف آب‌وهوایی (تهران، یزد، بندرعباس، رشت و اردبیل) پرداخته است [۱۵]. مرادی نیز به مدل‌سازی و کنترل منابع تولید هم‌زمان برق و حرارت خانگی با استفاده از محرک اولیه توربین گازی پرداخته است [۱۶].

با توجه به مطالعات و بررسی تحقیقات، می‌توان گفت که بیشتر تحقیقات انجام‌شده در ایران در زمینه پتانسیل‌سنجی اقتصادی و بررسی محیط‌زیستی در سیستم‌های تولید هم‌زمان قدرت و حرارت، به صورت کلی و عمومی بوده است و در کمتر مطالعاتی به بررسی یک نوع سیستم خاص پرداخته شده است. همچنین با توجه به ناکافی بودن منابع و تجاری بودن این سیستم، امکان دسترسی کامل به اطلاعات شرکت‌های تولیدکننده CHP وجود ندارد؛ لذا در این مقاله به طراحی و ساخت یک سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت با استفاده از یک موتور درون‌سوز گازسوز با توان نامی (اندیکاتوری) ۵/۹ kW پرداخته شده است که از انرژی تلف‌شده گازهای خروجی از آگزوز آن برای گرم کردن آب استفاده می‌شد.

۲. طراحی و ساخت

۲.۱. محرک اولیه

هسته اصلی یک سیستم تولید هم‌زمان، محرک اولیه آن است. در این تحقیق، برای طراحی و ساخت یک سیستم هم‌زمان تولید برق و حرارت در مقیاس میکرو، از یک موتور درون‌سوز تک‌سیلندر با توان نامی ۵/۹ kW به‌عنوان محرک اولیه سیستم استفاده شده است که با سوخت گاز طبیعی کار می‌کند. مهم‌ترین دلیل انتخاب آن، قابلیت در دسترس بودن، کم بودن هزینه ساخت اولیه و تعمیر و نگهداری آن و نیز قابلیت اطمینان آن در برابر سایر محرک‌های اولیه بوده است. سایر محاسبات مربوط به طراحی دستگاه براساس این موتور انجام گرفته است. جدول (۱) ویژگی‌های این موتور ژنراتور را نشان می‌دهد.

۴.۲. بازیافت حرارت

برای محاسبه گرمای حاصل از گازهای خروجی از آگزوز و استفاده از آن برای گرم کردن آب، از مبدل حرارتی نوع گاز به مایع استفاده شده است. هدف از این بخش، طراحی و ساخت مبدل حرارتی برای حداکثر بازیافت گرمای دریافتی از خروجی آگزوز موتور است. از آنجاکه مبدل‌های پوسته و لوله از نظر ساخت و تعمیر، بهترین نوع مبدل حرارتی هستند و برای دماهای بیش از حد نیز توصیه شده‌اند [۱۸]، در این تحقیق از مبدل پوسته‌لوله استفاده شد.

طراحی مبدل براساس انتقال گرمای سیال سردشونده، گازهای خروجی از آگزوز به سیال خنک‌کننده، یعنی آب، انجام شده است. به منظور محاسبه میزان افزایش درجه حرارت آب با استفاده از موازنه توان گرمایی گازهای خروجی آگزوز و گرمای جذب شده به وسیله آب از رابطه (۲) استفاده شد:

$$\dot{m}_{ex} c_{p,ex} (T_2 - T_1) = \dot{m}_w c_{p,w} (t_2 - t_1) \quad (2)$$

در بیشتر طراحی‌های مبدل‌های حرارتی، از رابطه موازنه حرارتی به منظور محاسبه سطح انتقال حرارت، یعنی رابطه (۳)، استفاده می‌شود [۱۸]:

$$q = SU\Delta T \quad (3)$$

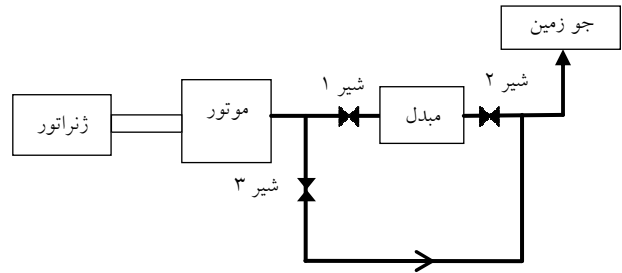
از آنجاکه اختلاف پتانسیل درجه حرارت بین دو انتهای مبدل به گونه پیچیده‌ای تغییر می‌کند، برای حل این مشکل با استفاده از مفهوم اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی (LMTD)، رابطه (۳) به صورت رابطه (۴) تبدیل می‌شود [۱۸]:

$$q = SU\Delta T_{lm} \quad (4)$$

که در آن، ΔT_{lm} اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی است که از رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۸]:

$$\Delta T_{lm} = LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (5)$$

کمیت مجهول دیگر در معادله (۴)، ضریب انتقال حرارت کل است. برای به دست آوردن نرخ انتقال گرما به سیال داخل مایع، محاسبه ضریب انتقال حرارت لازم است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت، به ندرت از ضرایب انتقال حرارت به صورت جداگانه استفاده می‌شود و به جای آن، ضریب انتقال حرارت کلی را به کار می‌برند. ضریب انتقال حرارت کل از رابطه (۶) محاسبه شد [۱۹]:



شکل (۱): طرح کلی شیرهای کنارگذر در سیستم MCHP در حال آزمایش

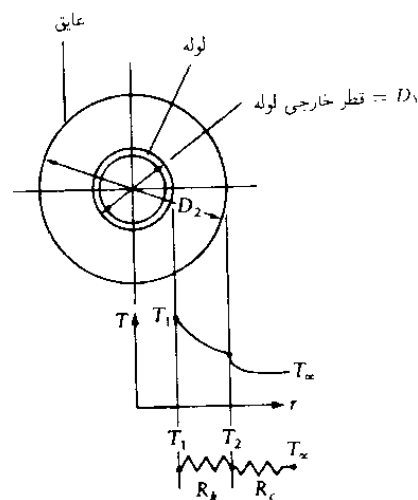
۳.۲. عایق کاری

عایق کاری یکی از بزرگ‌ترین دغدغه‌های این پروژه در ارتباط با سیستم بازیافت گرما بوده است. در این تحقیق، برای عایق کاری لوله اتصال آگزوز موتور به مبدل، از پشم سنگ با ضریب هدایت گرمایی $0.031 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ و چگالی $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ استفاده شد.

مهم‌ترین ویژگی درخور توجه در استفاده از عایق، ضخامت آن است. در برخی از اشکال هندسی استوانه‌ای، زیاد شدن ضخامت عایق منجر به افزایش اتلاف گرما می‌شود. در این قسمت، ضخامت بهینه عایق محاسبه شد.

مقدار اتلاف گرما به واحد طول یک لوله استوانه‌ای (شکل ۲) با پوششی عایق از رابطه (۱) به دست آمد [۱۷]:

$$q = \frac{2\pi(T_1 - T_\infty)}{L \left[\frac{\ln(R_2/R_1)}{K} + \frac{1}{h_c R_2} \right]} \quad (1)$$



شکل (۲): لوله عایق دار

و به طور گسترده در پمپ‌های آب به کار می‌روند [۲۰]، در این تحقیق، استفاده از یک پمپ گریز از مرکز با دبی ثابت برای به‌گردش‌درآوردن آب در داخل لوله‌های مبدل حرارتی استفاده شد. در این قسمت، هدف از انتخاب پمپ براساس توان مورد نیاز پمپ‌کردن آب است.

توان پمپ انتقال طبق رابطه برنولی و از رابطه (۱۲) به‌دست آمد [۲۱]:

$$P_p = \frac{\gamma Q H_p}{1000} \quad (12)$$

حداکثر ارتفاع تولیدی پمپ (m) H_p از رابطه (۱۳) محاسبه شد:

$$H_p = \Delta Z + H_L \quad (13)$$

افت اتصالات از جمله مقدار افت فشار زانویی ۹۰ درجه، افت شیر و افت خروجی با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$h_L = \frac{kv^2}{2g} \quad (14)$$

افت لوله نیز از رابطه (۱۵) به‌دست آمد:

$$h_L = \frac{fL v^2}{2gd_p} \quad (15)$$

مقدار ضریب اصطکاک که به نوع جریان بستگی دارد، برحسب عدد رینولدز از روابط (۱۶ یا ۱۷) به‌دست آمد:

اگر $Re < 2100$:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

اگر $Re > 2100$:

$$f = \frac{0.0791}{(Re)^{1/4}} \quad (17)$$

در نتیجه محاسبه افت فشار کل در مسیر H_L از رابطه (۱۸) به‌دست آمد.

$$HL = \text{افت لوله} + (\text{تعداد خروجی} \times \text{افت خروجی}) + (\text{تعداد شیر} \times \text{افت شیر}) + (\text{تعداد زانویی} \times \text{افت زانویی}) \quad (18)$$

۳. نتایج

محرک اولیه، بازیافت حرارت، شیرها و اتصالات و مخزن ذخیره آب گرم، قسمت‌های اصلی این سیستم را تشکیل می‌دهند. مشخصات اجزای به‌کاررفته در هریک از بخش‌ها با توجه به نتایج طراحی و محاسبات در جدول (۲) به‌طور خلاصه آورده شده است. همچنین شکل (۳) نمای کلی دستگاه ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

$$\frac{1}{U_r} = \frac{ds_r}{h_o ds_o} + \frac{ds_r}{h_{so} ds_o} + ds_r R_w + \frac{ds_r}{h_{si} ds_i} + \frac{ds_r}{h_i ds_i} \quad (6)$$

در بیشتر محاسبات مبدل، سطح خارجی لوله‌ها به‌عنوان سطح معیار قرار می‌گیرد؛ لذا ضریب انتقال حرارت U_o از رابطه (۷) به‌دست می‌آید:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_{io}} + \frac{1}{h_{sio}} + ds_o R_w + \frac{1}{h_{so}} + \frac{1}{h_o} \quad (7)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفت اجباری در داخل لوله‌ها با قطر کمتر از ۸۰ mm روابط زیر بر حسب عدد رینولدز با توجه به نوع جریان ارائه شده است [۱۹]:

$$Re = \frac{(D_e)(\dot{w})}{\mu(a_s)} \quad (8)$$

۱. برای جریان آرام $Re < 2100$

$$Nu = 1.86[(Re)(Pr)\left(\frac{D_e}{L}\right)]^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (9)$$

۲. برای جریان گذرا $2100 < Re < 10000$

$$Nu = 0.116[(Re)^{2/3} - 125](Pr)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \left[1 + \left(\frac{D_e}{L}\right)^{2/3}\right] \quad (10)$$

۳. برای جریان مغشوش $Re > 10000$

$$Nu = \alpha(Re)^{0.8} (Pr)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (11)$$

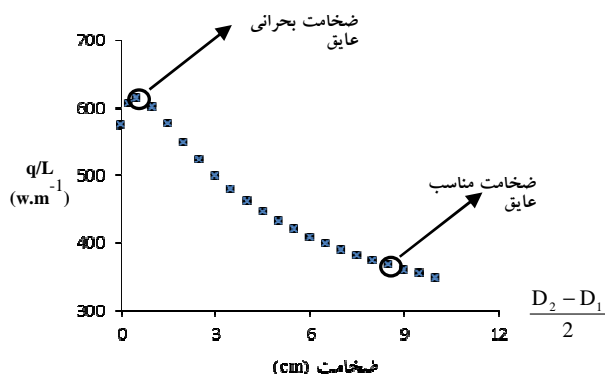
α برای گازها ۰/۰۲۱، برای سیالات معمولی ۰/۰۲۳ و برای سیالات لزج ۰/۰۲۷۰ است.

ضریب انتقال حرارت کل از مجموع دو ضریب انتقال حرارت همرفتی آب و گازهای خروجی از آگروز تشکیل شده است. در ابتدا نوع جریان تولیدشده مشخص شده و سپس با استفاده از هریک از روابط (۸ تا ۱۱) به محاسبه ضریب انتقال حرارت پرداخته شده است. هریک از محاسبات در عملکرد مختلف موتور (بار ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و بار کامل) انجام شد. بهترین طول مبدل زمانی است که در هریک از بارهای موتور، عملکرد و بازدهی چشمگیری داشته باشد.

۵.۲. پمپ مبدل حرارتی

برای به‌گردش‌درآوردن آب در داخل لوله‌های مبدل حرارتی، از یک پمپ استفاده شد. با توجه به آنکه پمپ‌های گریز از مرکز در برابر فشار حساس نیستند (جابه‌جایی غیرمثبت) و برای دبی طراحی شده‌اند

در مقایسه با لوله بدون عایق، منجر به افزایش انتقال گرما می‌شود. اگر این ضخامت تا ۱/۵cm افزایش یابد، اتلاف گرمایی همانند زمانی است که عایق به کار نرفته باشد. با افزایش ضخامت به میزان بیشتر از ۱/۵cm، به تدریج گرمای انتقال یافته کاهش می‌یابد. ضخامت عایق‌های بالای ۸/۵cm، میزان هدررفت گرما را به‌طور محسوسی کاهش نمی‌دهند و استفاده از ضخامت بیشتر به دلیل کمبود فضا و افزایش هزینه به‌صرفه نیست. در نهایت، ضخامت ۸/۵cm به‌عنوان بهترین ضخامت عایق انتخاب شد. لوله عایق‌کاری در این تحقیق در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴): افت گرمایی لوله بر حسب ضخامت عایق

جدول (۳): خلاصه‌ای از محاسبات انجام شده در رابطه (۱)

ضخامت (cm) ($D_2 - D_1/2$)	D_2 (cm)	q/L ($W.m^{-1}$)
۰	۲/۱۵	۵۷۵
۰/۵	۳/۱۵	۶۱۴
۱	۴/۱۵	۶۰۱/۸
۱/۵	۵/۱۵	۵۷۵/۸
۲	۶/۱۵	۵۴۸
۲/۵	۷/۱۵	۵۲۲
۳	۸/۱۵	۴۹۹/۸
۳/۵	۹/۱۵	۴۷۹
۴	۱۰/۱۵	۴۶۲
۴/۵	۱۱/۱۵	۴۴۶/۴
۵	۱۲/۱۵	۴۳۲
۵/۵	۱۳/۱۵	۴۲۰/۲
۶	۱۴/۱۵	۴۰۹
۶/۵	۱۵/۱۵	۳۹۹
۷	۱۶/۱۵	۳۸۹/۹
۷/۵	۱۷/۱۵	۳۸۱/۵
۸	۱۸/۱۵	۳۷۴
۸/۵	۱۹/۱۵	۳۶۶/۶
۹	۲۰/۱۵	۳۶۰/۳
۹/۵	۲۱/۱۵	۳۵۴/۳
۱۰	۲۲/۱۵	۳۴۸/۷

جدول (۲): مشخصات اجزای سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت در مقیاس میکرو (MCHP)

بخش اصلی	جزء	مشخصات
محرك اولیه	موتور	توان نامی: ۵/۹ kW حجم جابه‌جایی: ۱۹۶ cc
	ژنراتور	توان تولیدی: ۲ kW
بازيافت حرارت	مبدل حرارتی	قطر × طول: ۲۰ × ۶۰cm جنس: فولاد ضد زنگ
	لوله	قطر × طول: ۱ × ۱۵۰cm جنس: مس
پمپ مبدل	توان: ۱۵ وات	حد اکثر دبی: ۱۱ l.min ⁻¹
	عایق لوله آگروز	ضخامت عایق: ۸/۵ cm
	لوله‌ها	لوله خروجی گاز
لوله خروجی آب		قطر اسمی: ۱/۲ اینچ جنس: فولاد ضد زنگ
شیر و اتصالات	شیر گازی	اندازه: ۱/۲ اینچ تعداد: ۴
	شیر فلکه کشویی	اندازه: ۳/۴ اینچ تعداد: ۳
مخزن ذخیره گرما	قطر	۳۰ cm
	ارتفاع	۶۰ cm



شکل (۳): نمای کلی از دستگاه MCHP ساخته شده

۱.۳. ضخامت عایق لوله‌ی آگروز

شکل (۴) و جدول (۳) محاسبات مربوط به عایق‌کاری مربوط به لوله‌ی آگروز را نشان می‌دهد (رابطه ۱).

در شکل (۴) مشخص است که استفاده از عایقی به ضخامت



شکل (۶): مبدل حرارتی نوع پوسته و لوله مورد استفاده (الف) نمای کلی (ب) لوله‌های مسی مورد استفاده (ب)



شکل (۵): لوله‌ی آگزوز عایق‌شده در سیستم MCHP

۱.۲.۳. بررسی عملکرد بازیافت حرارت

تغییرات دمای گازهای خروجی از آگزوز و دمای آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی تحت بارهای مختلف موتور (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و بار کامل) در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نشان داده شده است.

در یک موتور درون‌سوز، دمای خروجی از آگزوز در مدت زمان حدود ۵ دقیقه به حالت پایدار می‌رسد. در این تحقیق که از گازهای خروجی از آگزوز برای بازیافت حرارت استفاده شده است، مشاهده شد که دمای گازهای خروجی در حدود ۳۵ دقیقه به حالت پایدار رسیده است. علت اصلی آن، اینرسی حرارتی بیشتر گازهای خروجی به دلیل عایق‌کاری لوله آگزوز متصل مبدل حرارتی است. این نتایج با کار محققان دیگر که از گرمای خروجی آگزوز یک موتور دیزل برای تبادل حرارتی با روغن استفاده کرده‌اند، مشابهت دارد [۲۲].

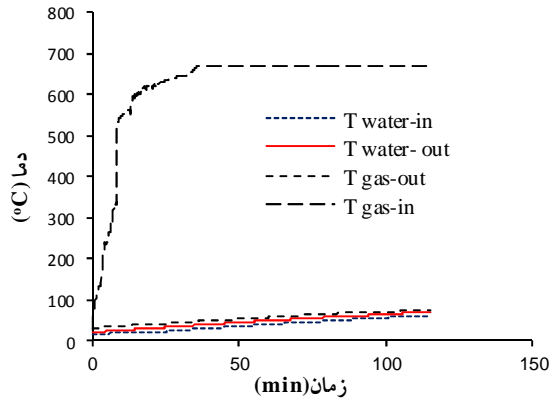
زمانی که بار موتور افزایش می‌یابد، دمای گازهای خروجی از آگزوز نیز به علت اتلاف بیشتر حرارت افزایش خواهد یافت؛ زیرا در بارهای بیشتر، سوخت بیشتری برای احتراق کامل‌تر پاشیده می‌شود و دمای محفظه احتراق زیاد می‌شود. در همه بارهای موتور دیده شد که تغییرات دمای گازهای خروجی و آب خروجی از مبدل در ابتدای تبادل حرارتی، محسوس است؛ درحالی‌که شیب نمودار زمانی که دمای آب خروجی از مبدل نزدیک به ۶۰ درجه می‌رسد، کاهش می‌یابد؛ در مقدار انرژی گرمایی ثابتی، افزایش دمای آب خروجی از مبدل، نرخ افزایش دما را کاهش می‌دهد. در تمامی بارها دمای گازهای خروجی از مبدل نزدیک به دمای آب خروجی از مبدل است و دمای آن‌ها در انتهای آزمایش به صورت تقریبی یکسان است. این زمان برای بارهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و بار کامل به ترتیب در حدود ۱۹۵، ۱۸۰، ۱۲۵ و ۱۱۵ دقیقه است.

۲.۳. بازیافت حرارت

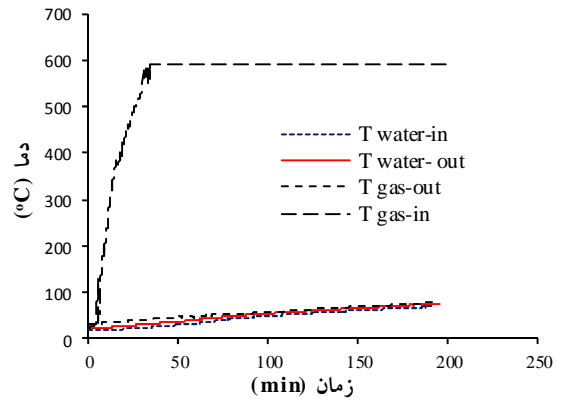
مبدل حرارتی و پمپ مبدل، مجموعه بازیافت حرارت را در سیستم MCHP تشکیل می‌دهند. با توجه به طول لوله‌های محاسبه‌شده در وضعیت‌های مختلف بار موتور و سیال خنک‌شونده، طراحی مبدل حرارتی براساس بزرگ‌ترین طول لوله مبدل به دست آمده، ۱۴/۳۸ متر صورت گرفت تا در تمامی موقعیت‌های عملکردی، موتور مبدل کارایی خوبی داشته باشد؛ لذا در این تحقیق، از لوله‌های مسی با طول ۱۵ متر و قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. برای کاهش فضای مبدل حرارتی از ۳۰ عدد لوله مسی به دلیل خاصیت ضد زنگ آن و ضریب هدایتی بالا با طول ۰/۵ متر استفاده شد که به شکل خاصی خم داده شده و در درون پوسته مبدل به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۶۰ سانتی‌متر قرار گرفته‌اند (شکل ۶). جدول (۴) ویژگی سیستم بازیافت حرارت به کار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول (۴): مشخصات سیستم بازیافت حرارت در تحقیق حاضر

جنس پوسته	فولاد گالوانیزه
قطر داخلی پوسته	۲۰۰ mm
ضخامت پوسته	۲۰ mm
طول پوسته	۶۰۰ mm
جنس لوله	مس
قطر داخلی لوله	۱۰ mm
ضخامت لوله	۱ mm
طول لوله	۱۵ m
سطح مقطع لوله	دایره‌ای
نوع عایق به کار رفته در پوسته	پشم سنگ با پوشش آلومینیوم
ضریب هدایت حرارتی مس	$388 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
توان پمپ مبدل	۱۵ W



شکل (۱۰): تغییرات دمایی گاز ورودی و خروجی از آگزوز و آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی در بار کامل



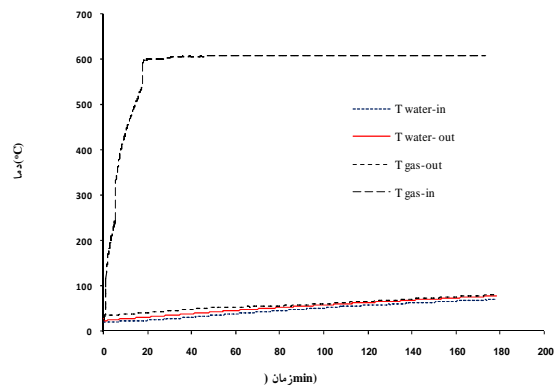
شکل (۷): تغییرات دمایی گاز ورودی و خروجی از آگزوز و آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی در بار ۲۵٪

همچنین بازده مبدل حرارتی استفاده شده در این تحقیق در حدود ۸۳ تا ۹۳ درصد است. عملکرد بازده مبدل در بارهای بیشتر به دلیل دمای افزون تر گازهای خروجی از آگزوز و در نتیجه مقدار گرمای بازیافتی بیشتر، چشمگیرتر است.

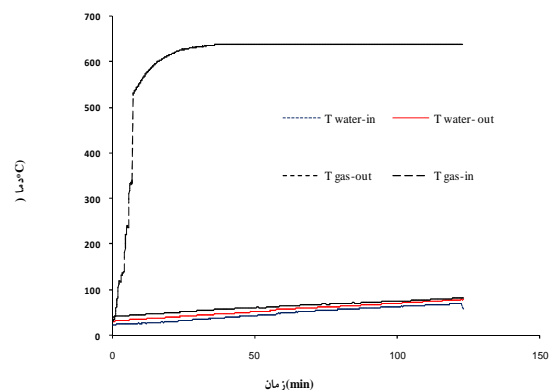
۳.۳. بررسی عملکرد سیستم MCHP

در این تحقیق، قبل از محاسبه عملکرد سیستم همزمان قدرت و حرارت (CHP)، دانستن اطلاعات مربوط به تعادل گرمایی موتور لازم است. برای این کار، موتور تحت بارهای مختلف ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و بار کامل قرار گرفت و مقدار توان ترمزی موتور (P_b)، تلفات حرارتی آگزوز (Q_{ex}) و تلفات حرارتی محاسبه نشده که شامل تلفات سیستم روغن کاری، تلفات تابش از سطح موتور و قسمتی از تلفات اصطکاکی درون موتور (Q_{ii}) است، بررسی شد.

شکل (۱۱) درصد انرژی خروجی از موتور در بارهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد را نشان می دهد. توان مفید (ترمزی) از تبدیل انرژی مکانیکی محور خروجی موتور به برق که به ژنراتور متصل است، حاصل می شود. با افزایش مقدار بار موتور از صفر تا بار کامل، توان ترمزی از صفر تا ۲۹ درصد افزایش می یابد. در بار صفر، مقدار توان ترمزی صفر است. در این بار همه توان تولیدی موتور صرف تلفات اصطکاکی، سیستم روغن کاری و تلفات آگزوز و... می شود. در بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد، تلفات انرژی از آگزوز به طور تقریبی یکسان است (۴۴/۱۷ تا ۴۵/۴۸ درصد). اگرچه در محدوده این بارها مقدار انرژی گازهای خروجی از آگزوز با افزایش بار افزایش می یابد، به موازات آن، انرژی ورودی به موتور هم به علت افزایش در مصرف سوخت، افزایش می یابد. نرخ افزایشی نسبت این دو مقدار (انرژی

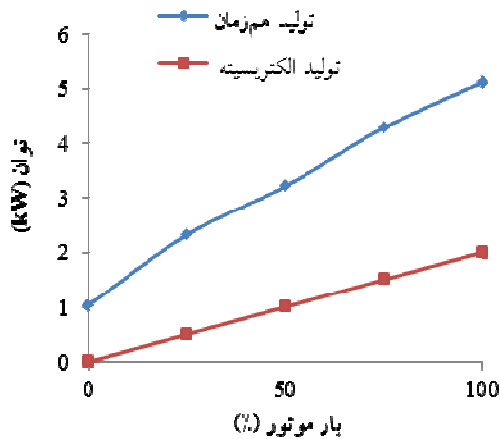


شکل (۸): تغییرات دمایی گاز ورودی و خروجی از آگزوز و آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی در بار ۵۰٪



شکل (۹): تغییرات دمایی گاز ورودی و خروجی از آگزوز و آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی در بار ۷۵٪ موتور

سیستم تولید هم‌زمان، تولید الکتریسیته همراه با تولید انرژی حاصل از حرارت است، افزایش می‌یابد. از مقایسه دو نمودار مشاهده شد که مقدار توان ذخیره در سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت نسبت به سیستم تولید الکتریسیته تنها در بارهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و بار کامل به ترتیب ۱/۰۲۷ kW، ۱/۸۲، ۲/۲۱۲، ۲/۷۸۲ و ۳/۱۱۴ است.



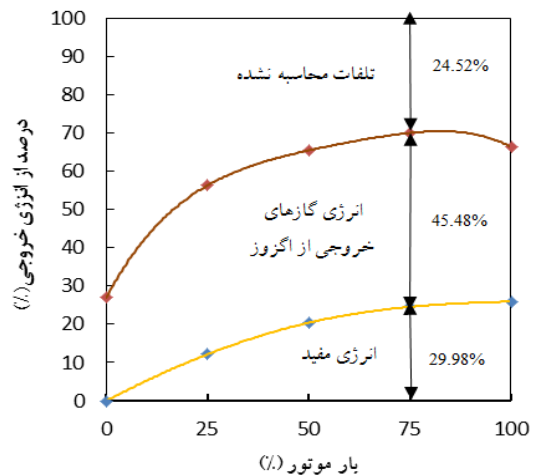
شکل (۱۲): مقایسه توان تولیدی سیستم تولید هم‌زمان (MCHP) با سیستم تولید الکتریسیته تنها

بازده انرژی معیار مناسبی برای مقایسه دو سیستم در بارهای مختلف موتور است. در این تحقیق، مقایسه بازده سیستم MCHP و سیستم معمول در بارهای مختلف بررسی شد. شکل (۱۳) بازده انرژی را در دو حالت تولید هم‌زمان و تولید الکتریسیته تنها را نشان می‌دهد.

محدوده بازده کل سیستم در حالت فقط تولید الکتریسیته از ۰ تا ۲۵ درصد در بارهای مختلف موتور است. بیشترین بازده در بار کامل و ۷۵ درصد است که دلیل آن اقتصادی بودن موتور در این رژیم کاری می‌باشد. در بار صفر به دلیل آنکه هیچ‌گونه کار مفیدی تولید نمی‌شود، بازده انرژی صفر است. در سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت، از آنجاکه هم الکتریسیته و هم حرارت به‌عنوان کار مفید خروجی تولید می‌شود، بازده کلی سامانه افزایش می‌یابد. بازده سیستم MCHP در بی‌باری، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و بار کامل به ترتیب ۲۷، ۵۶، ۶۵/۴، ۷۰ و ۶۶/۶ درصد به دست آمد. با افزایش بار موتور، بازده سیستم نیز افزایش یافت؛ زیرا در بارهای بیشتر مقدار کار مفید خروجی از سیستم (الکتریسیته و حرارت) نسبت به بارهای کمتر موتور بیشتر است. بیشترین بازده سیستم MCHP در بار ۷۵ درصد است. در بار کامل به دلیل افزایش مصرف سوخت اولیه، بازده سیستم نسبت به بار ۷۵ درصد به مقدار کمی، کمتر است.

تلف شده به انرژی کل) به‌طور تقریبی یکسان است. در بار کامل، درصد انرژی تلفات از ۴۰/۳ درصد است. این مقدار نسبت به بار ۷۵ درصد کاهش یافته است؛ زیرا اگرچه انرژی خروجی از موتور در بار کامل افزایش یافته است، موتور برای حفظ این بار مقدار سوخت بیشتری را مصرف کرده و باعث افزایش انرژی ورودی (مصرفی) در موتور شده است.

تلفات محاسبه‌نشده نیز در بارهای ۰ تا ۷۵ درصد، به‌طور چشمگیری کاهش یافته است؛ زیرا هرچه کار مفید موتور بیشتر باشد، تلفات حرارتی محاسبه‌نشده که تفاوت انرژی ورودی و کار مفید است، بیشتر می‌شود. در بار صفر، هیچ کار مفیدی انجام نمی‌شود. مقدار تلفات حرارتی محاسبه‌نشده، بیشینه است (۶۸/۳۳ درصد). این مقدار در بارهای ۲۵ و ۵۰ درصد به ترتیب ۴۱/۷۱ و ۴۱/۵۶ درصد است. کمترین مقدار تلفات حرارتی محاسبه‌نشده در بار ۷۵ درصد، ۲۵ درصد است. در بار کامل، مقدار تلفات حرارتی محاسبه‌نشده بیشتر از بار ۷۵ درصد است (۳۰/۶ درصد)؛ زیرا مقدار انرژی ورودی به‌علت مصرف سوخت بیشتر، بیشتر است. نتایج به‌دست آمده در این مطالعه با نتایج محققان دیگر که از موتور دیزل و موتور اشتعال جرقه‌ای گازسوز برای تولید قدرت و حرارت استفاده کرده‌اند، هم‌خوانی نزدیکی دارد [۲۳-۲۶].



شکل (۱۱): درصد انرژی خروجی از موتور بر حسب بار موتور

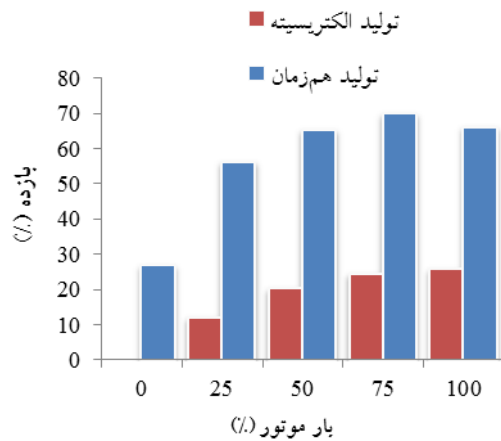
از آنجاکه موتور در شرایط مختلف کار می‌کند، مقایسه بازده سیستم CHP و سیستم معمول در بارهای مختلف بررسی شد. شکل (۱۲) مقدار توان تولیدی مفید در دو حالت تولید هم‌زمان و تولید الکتریسیته تنها را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل (۱۲)، با افزایش بار موتور، توان مفید موتور در هر دو حالت افزایش می‌یابد. در بار بیشتر، کار خروجی از موتور که در سیستم معمول تنها تولید الکتریسیته و در

موتور از مقدار $1/207$ تا $3/144$ kW افزایش می‌یابد. درصد تلفات خروجی از آگروز در بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به‌طور تقریبی یکسان ($45/48$ تا $44/17$) و در بار کامل این مقدار $40/3$ درصد به‌دست آمد. همچنین مقدار توان ذخیره در سیستم MCHP نسبت به یک سیستم تولید الکتریسیته تنها، $1/027$ ، $1/82$ ، $2/212$ ، $2/782$ و $3/114$ kW به‌ترتیب در بارهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد و بار کامل بوده است. بیشترین بازده سیستم MCHP در بار ۷۵ درصد و بیشترین بازده سیستم تولید الکتریسیته تنها در بار کامل به‌ترتیب مقدار ۷۰ و ۲۵ درصد به‌دست آمد. نرخ افزایش بازده سیستم MCHP در مقایسه با یک سیستم تولید قدرت و حرارت جداگانه (فقط تولید الکتریسیته) در بارهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد و بار کامل عملکرد موتور به‌ترتیب $364/18$ ، $221/2$ ، $185/46$ و $155/7$ درصد به‌دست آمد؛ بنابراین، استفاده از این سیستم در مقایسه با سیستم‌های معمول تولید الکتریسیته و حرارت، مزایای صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به‌همراه خواهد داشت.

سپاسگزاری

از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت ایران (IFCO) که با کمک‌های مالی خویش این تحقیق را سامان دادند، کمال تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

kW	توان مورد نیاز پمپ	P_p
-	عدد پراپل	Pr
$m^3 \cdot s^{-1}$	دبی حجمی	Q
W	توان حرارتی	q
m	شعاع لوله	R
-	عدد رینولدز	Re
$^{\circ}C \cdot W^{-1}$	مقاومت حرارتی جداره لوله	R_w
m^2	سطح انتقال حرارت	s
$^{\circ}C$	دما	t و T
$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	ضریب کلی انتقال حرارت	U
$m \cdot s^{-1}$	سرعت خطی سیال در لوله	V
علائم یونانی		
$^{\circ}C$	اختلاف درجه حرارت	ΔT
m	ارتفاع بین دو سطح	ΔZ
$m^2 \cdot s^{-1}$	ضریب پخش گرمایی	α
$N \cdot m^{-3}$	وزن مخصوص آب	γ
Pa.s	گرانروی سیال	μ



شکل (۱۳): بازده انرژی در سیستم تولید هم‌زمان (CHP)

و سیستم تولید الکتریسیته تنها

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، سیستم تولید هم‌زمان قدرت و حرارت در مقیاس میکرو با حداکثر ظرفیت ۲ کیلووات الکتریسیته و ۳ کیلووات حرارت با محرک اولیه موتور درون‌سوز گازسوز طراحی و ساخته شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش بار موتور، توان گرمای خروجی از

فهرست علائم

a_s	سطح مقطع جریان	m^2
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D_e	قطر معادل هیدرولیکی	m
d_p	قطر لوله	m
f	ضریب اصطکاک سیال	-
G	سرعت جرمی سیال	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
h	ضریب همرفت	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
H_L	افت فشار ایجادشده مسیر مبدل حرارتی	m
h_L	ارتفاع معادل افت فشار	m
H_p	حداکثر ارتفاع تولیدی یک پمپ	m
K	ضریب رسانندگی عایق	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
k	ضریب افت اتصالات	-
L	طول لوله	m
LMTD	اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی	$^{\circ}C$
\dot{m}	دبی جرمی	$kg \cdot h^{-1}$
Nu	عدد ناسلت	-

س	لایه جرمی	زیرنویس
w	آب، دیواره	a
1 و 2	ورودی و خروجی به مبدل	ex
∞	محیط	i و o
		r

مراجع

- [۱] نظامی، مهدی، «بهره‌برداری از استانداردهای بین‌المللی برای مقابله با تغییرات آب‌وهوایی»، ماهنامه استاندارد، ش ۲۲۱، ۱۱-۸، سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۹.
- [2] De Paepe, M., D'Herdt, P., Mertens, D., "Micro-CHP systems for residential applications", Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 3435-46, 2006.
- [3] Eriksson, G., Kjellström, B., "Assessment of combined heat and power (CHP) integrated with wood-based ethanol production", Applied Energy, Vol. 87, pp. 3632-41, 2006.
- [4] Onovwiona, H.I., Ismet Ugursal, V., Fung, A.S., "Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 848-61, 2007.
- [5] Wu, D.W., Wang, R.Z., "Combined cooling, heating and power: A review", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 32, pp. 459-95, 2006.
- [6] Pehnt, M., Cames, M., Fischer, C., Praetorius, B., Schneider, L. Schumacher, K., Voß, J.P., *Micro Cogeneration. Towards Decentralized Energy Systems Netherlands*, Springer, 2006.
- [7] EPA., *Catalog of CHP Technologies*, United States Environmental Protection Agency, USA, 2008.
- [۸] طبسی‌زاده، محمد، طراحی، ساخت و ارزیابی یک دستگاه خشک‌کن مخزنی با استفاده از گرما و توان تراکتور دوچرخ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۰.
- [۹] چیتچیان، حمید، کاربرد سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت، اولین همایش روش‌های پیشگیری از اتلاف منابع ملی، تهران، ۱۳۸۳.
- [۱۰] زارعی، نیما، ارزیابی استفاده از سیستم‌های CHP برای واحدهای مسکونی بزرگ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق انرژی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۴.
- [۱۱] براتیان، ایمان، مطالعات فنی اقتصادی تولید هم‌زمان برق و حرارت با استفاده از بیوفیول در یک موتور درون‌سوز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی انرژی دانشگاه صنعت آب و برق، ۱۳۸۶.
- [12] Ghobadian, B., Ameri, M., Baratian, I. "Economic Investigation of ICCHP Using Gasohol- A Case Study for Iran", Paper presented at the The 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition, Finland, 2007.
- [13] Ameri, M., Ghobadian, B., Baratian, I., "Technical comparison of a CHP using various blends of gasohol in an IC engine", Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1469-1474, 2008.
- [۱۴] قلی‌زاده، علی، مدل‌سازی سیکل هم‌زمان قدرت و حرارت در مقیاس میکرو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی سیستم‌های انرژی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸.
- [۱۵] تیموری حمزه‌کلایی، فاطمه، امکان‌سنجی فنی اقتصادی استفاده از MICRO-CHP در ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی سیستم‌های انرژی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.
- [۱۶] مرادی، حدیث، مدل‌سازی و کنترل منابع تولید هم‌زمان برق و حرارت خانگی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۹.
- [۱۷] امانی، سعید و عبدالرضا کرباسی، عایق‌های حرارتی، ج ۱، وزارت نیرو، سازمان بهره‌وری انرژی ایران، ۱۳۸۳.
- [۱۸] خوش‌گفتار، محمدرضا، مقدمه‌ای بر طراحی ترموهیدرولیکی مبدل‌های حرارتی، ج ۱، مؤسسه انتشاراتی جهاد دانشگاهی (ماجد)، ۱۳۷۴.
- [19] Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, D.P., *Introduction to Heat Transfer*, United States of America, John Wiley & Sons, 2011.
- [20] FOS., *Fundamentals of Service Hydraulics*, United States of America, John Deere, 1972.
- [۲۱] عباس‌زاده مایوان، احمد، طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه خالص‌سازی بیودیزل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۹.
- [22] Pandiyarajan, V., Chinna Pandian, M., Malan, E., Velraj, R., Seeniraj, R.V., "Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system", Applied Energy, Vol. 88, pp. 77-87, 2011.
- [23] Khatri, K.K., Sharma, D., Soni, S.L., Tanwar, D., "Experimental investigation of CI engine operated Micro-Trigeneration system", Applied Thermal Engineering,

Vol. 30, pp. 1505-1509, 2010.

- [24] Huangfu, Y., Wu, J.Y., Wang, R.Z., Kong, X.Q., Wei, B.H., "Evaluation and analysis of novel micro-scale combined cooling, heating and power (MCCHP) system", Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 1703-1709, 2007.
- [25] Lin, L., Wang, Y., Al-Shemmeri, T., Ruxton, T., Turner, S., Zeng, S., Huang, J., He, Y., Huang, X., "An

experimental investigation of a household size trigeneration", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 576-585, 2007.

- [26] Kong, X.Q., Wang, R.Z., Wu, J.Y., Huang, X.H., Huangfu, Y., Wu, D.W., Xu, Y.X., "Experimental investigation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine", International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 977-987, 2005.