

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی سیستم‌های انرژی

گرایش سیستم‌های انرژی

بررسی عملی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد الکترو لایزر تولید کننده گاز هیدروکسی و ارزیابی اثرات تزریق آن در موتور احتراق داخلی

نگارنده: فرهاد سالک

استاد راهنما

دکتر محمد ضامن

استاد مشاور

دکتر وحید حسینی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۴۵/۲۹۸/۱۲۴

تاریخ: ۹۸/۷/۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای فرهاد سالک با شماره دانشجویی ۹۶۰۸۲۲۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی تحت عنوان بررسی عملی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد الکترولیزر تولید کننده گاز هیدروکسی و ارزیابی اثرات تزریق آن در موتور احتراق داخلی که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: <u>ب.ا.</u>)
<input checked="" type="checkbox"/> عملی	<input type="checkbox"/> نظری

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد ضامن	استادیار	
۳- استاد مشاور	دکتر وحید حسینی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمود چهارطاقی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر احمد نظری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، مادر فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودش
بیاسایم، که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یآوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و
مطمئن برایم بوده است.

و خداوند بلند مرتبه بیامرزد پدر مهربانم را که همیشه یادش در قلب من زنده و روحش همیشه دعا
گوی من است.

تقدیم به وجود با ارزشتان...

که وجودشان شادی بخش و صفایشان مایه آرامش من است.

تشکر و قدردانی

انجام این پروژه را مدیون زحمات اساتید فرزانه ام، جناب آقایان دکتر ضامن و دکتر حسینی هستم چراکه بدون راهنمایی‌های ایشان تامین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌نمود. لذا از زحمات ایشان تشکر می‌نمایم و طول عمر باعزت را برایشان از خداوند مسالت می‌نمایم.

معلمانا مقامت ز عرش برتر باد همیشه توسن اندیشه ات مظفر باد

و در پایان از تمام کسانیکه (دوستان) در انجام این پروژه، موجب دلگرمی بنده بودند تشکر می‌نمایم.

تعمیر نامه

اینجانب فرهاد سالک دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه "بررسی عملی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد الکترولاایزر تولید کننده گاز هیدروکسی و ارزیابی اثرات تزریق آن در موتور احتراق داخلی" تحت راهنمایی دکتر محمد ضامن متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

استفاده از سوخت‌های فسیلی در سراسر دنیا باعث ایجاد مشکلات زیادی از قبیل انتشار آلاینده‌های زیست محیطی شده است. ناوگان حمل و نقل که از عمده‌ترین مصرف کنندگان سوخت‌های فسیلی در کشورها می‌باشند، در بحث تولید آلاینده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گاز مونوکسید کربن که در فرآیند احتراق ناقص در موتور بوجود می‌آید، یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های تولیدی می‌باشد. در سال‌های اخیر جهت بهبود کیفیت احتراق در موتورهای احتراقی، تزریق گاز هیدروژن به عنوان سوخت کمکی بررسی و پیشنهاد گردیده است. در این پژوهش، بکارگیری الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی جهت تولید این گاز و تزریق آن در موتور مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، یک الکترولایزر تک‌سلولی ساخته شده و اثر پارامترهایی نظیر هندسه سلول‌ها و فاصله الکترودها و پارامترهای فیزیکی دیگر نظیر امواج آلتراسونیک، میدان مغناطیسی و جریان پالسی در فرآیند الکترولایزر آب مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل شده، الکترودهای صفحه‌ای با فاصله ۱ میلی‌متر دارای بیشترین بازده در میان حالت‌های هندسی دیگر می‌باشد. همچنین، تاثیر جریان پالسی در افزایش بازده الکترولایزر بیشتر از موارد دیگر بدست آمده است.

به منظور ارزیابی اثر پاشش گاز هیدروکسی در موتور احتراقی، در ابتدا تاثیر پاشش گاز هیدروکسی در موتور EF7 توسط یک الکترولایزر صفحه‌ای مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل شده، تزریق این گاز باعث کاهش گاز مونوکسید کربن به میزان حدود ۹۰ درصد شده است. سپس مصرف انرژی الکترولایزر با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی مختلف بررسی گردید. استفاده از سیستم تغذیه پالسی در الکترولایزر باعث افزایش بیشتر بازده در فرآیند الکترولایزر نسبت به بقیه پارامترهای گردیده است. در انتها جهت بکارگیری سیستم پیشنهادی در موتور احتراق داخلی یک سیستم ترکیبی متشکل از موتور، الکترولایزر و ماژول‌های ترموالکتریک (جهت بازآوری انرژی‌های تلفاتی موتور)

طراحی و تحلیل گردید. در انتها، ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی سیستم ترکیبی طراحی شده ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: الکترولیز آب، گاز هیدروکسی، جریان پالسی، مونوکسید کربن، موتور احتراق داخلی، مبدل ترموالکتریک

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- فرهاد سالک، محمد ضامن میلاد نیکروش، تحلیل آزمایشگاهی بکارگیری الکترودهای استوانه ای در الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی، شانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۷

۲- فرهاد سالک، محمد ضامن میلاد نیکروش، تحلیل ترمودینامیکی و آزمایشگاهی کوپل سیستم تولید گاز هیدروکسی با پنل های فتوولتائیک مجهز به دنبال کننده شمالی-جنوبی، ششمین کنفرانس سالیانه انرژی پاک، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۷

فهرست مطالب

د	فهرست جداول
ه	فهرست اشکال
ط	فهرست علائم
۱	فصل ۱ : مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ معرفی انواع روشهای تولید هیدروژن
۵	۱-۲-۱ مبدل گاز طبیعی تبدیل با بخار آب
۶	۱-۲-۲ روش الکترولیز آب
۸	۳-۱ هیدروژن خالص و گاز هیدروکسی
۹	۴-۱ کاربرد الکترولیزر تولید کننده گاز هیدروکسی در خودروها
۱۰	۵-۱ پارامترهای فیزیکی افزایش بازده الکترولیزر
۱۳	فصل ۲: پیشینه پژوهش
۱۴	۱-۲ مقدمه
۱۵	۲-۲ مروری بر تحقیقات گذشته
۱۵	۱-۲-۲ روشهای افزایش بازده در الکترولیزرهای تولید کننده گاز هیدروکسی
۱۸	۲-۲-۲ تزریق هیدروکسی به موتور بنزینی
۲۰	۳-۲-۲ سیستمهای بازیافت انرژی تلفاتی
۲۱	۳-۲ معرفی پژوهش حاضر

۲۱	..... ۱-۳-۲ نوآوری
۲۳	فصل ۳: طراحی و آماده سازی بستر آزمایش
۲۴	..... ۱-۳ مقدمه
۲۴	..... ۲-۳ آماده سازی سلولهای آزمایش
۲۶	..... ۳-۳ آزمایشهای سری اول: تعیین هندسه و فاصله بین الکترودها
۲۹	..... ۴-۳ آزمایشهای سری دوم: تاثیر پارامترهای فیزیکی مختلف
۳۰	..... ۱-۴-۳ امواج آلتراسونیک
۳۲	..... ۲-۴-۳ میدان مغناطیسی دائم
۳۶	..... ۳-۴-۳ اثر جریان پالسی
۳۹	..... ۵-۳ شکل نهایی بستر آزمایش
۴۱	فصل ۴: نتایج آزمایشها
۴۲	..... ۱-۴ روابط به کارگرفته شده در تحلیل
۴۳	..... ۲-۴ نتایج آزمایشهای سری اول
۴۶	..... ۳-۴ نتایج آزمایشهای سری دوم
۵۳	فصل ۵: ارزیابی به کارگیری الکترولايزر گاز هیدروکسی در موتور احتراق داخلی
۵۴	..... ۱-۵ ارزیابی عملی تزریق گاز هیدروکسی در موتور احتراق داخلی
۵۶	..... ۲-۵ طراحی سیستم تامین انرژی الکترولايزر توسط مبدل ترموالکتریک
۵۸	..... ۱-۲-۵ مدلسازی موتور
۶۲	..... ۲-۲-۵ طراحی سیستم بازیافت ترموالکتریک
۶۷	..... ۳-۲-۵ ارزیابی تولید توان توسط سیستم ترموالکتریک
۶۸	..... ۳-۵ طراحی الکترولايزر اصلاح شده و ارزیابی اقتصادی کل سیستم
۷۰	..... ۴-۵ تحلیل زیست محیطی

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات

۷۳

۷۴..... ۱-۶ نتیجه گیری

۷۵..... ۲-۶ پیشنهادات

۷۷

پیوست

۷۹

مراجع

فهرست جداول

- جدول ۳-۱. ابعاد و فواصل الکترودهای سلول‌های آزمایش..... ۲۶
- جدول ۳-۲. مشخصات فنی ماژول آلتراسونیک..... ۳۲
- جدول ۳-۳. مشخصات فنی آهنربا..... ۳۵
- جدول ۳-۴. مشخصات ماژول تولید جریان پالسی..... ۳۸
- جدول ۴-۱. مقدار انرژی مصرفی و سطح مورد نیاز الکترودها و تغییرات آنها با به‌کارگیری روش‌های مختلف..... ۵۱
- جدول ۵-۱. مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه تست گاز..... ۵۶
- جدول ۵-۲. مشخصات فنی موتور خودرو سمند..... ۵۸
- جدول ۵-۳. داده‌های تجربی حاصل از آزمایش مبدل ترموالکتریک [۵۹]..... ۶۳
- جدول ۵-۴. توان و انرژی مصرفی، سطح مورد نیاز و هزینه ساخت الکترولایزر با به‌کارگیری روش‌های مختلف..... ۶۹
- جدول ۵-۵. قیمت اجزای مختلف سیستم طراحی شده..... ۷۰
- جدول ۶-۱. مقادیر پارامترهای مختلف برای شبیه‌سازی موتور EF7..... ۷۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. بلوک دیاگرام سیستم تولید هیدروژن به روش رفورمینگ بخار..... ۶
- شکل ۱-۲. سلول الکترولیز تولید کننده هیدروژن خالص دارای غشای نیمه تراوایی..... ۷
- شکل ۱-۳. سلول الکترولیز دارای الف) غشای نیمه تراوایی و ب) بدون غشای نیمه تراوایی..... ۹
- شکل ۱-۲. بستر آزمایش ساخته شده توسط حسن زاده [۵۲]..... ۱۷
- شکل ۲-۲. بستر آزمایش ساخته شده توسط لین [۳۹]..... ۱۸
- شکل ۳-۲. بستر آزمایش ساخته شده برای اندازه‌گیری مقدار گاز تولیدی توسط محمد الکسابی [۵۵]..... ۱۹
- شکل ۴-۲. شماتیک نشان‌دهنده محل قرارگیری الکترولیزر و محل تزریق سوخت در موتور [۵۵]..... ۱۹
- شکل ۱-۳. الکترودهای صفحه‌ای الف) قبل از عملیات پرس و ب) بعد از عملیات پرس..... ۲۵
- شکل ۲-۳. سلول‌ها و الکترودهای الف) صفحه‌ای و ب) استوانه‌ای..... ۲۶
- شکل ۳-۳. محفظه الکترولیز ساخته شده برای سلول استوانه‌ای و بابلر..... ۲۷
- شکل ۴-۳. محفظه الکترولیز در حالت کوپل با منبع تغذیه DC الف) استوانه‌ای و ب) صفحه‌ای..... ۲۷
- شکل ۵-۳. منبع تغذیه استفاده شده در بستر تست..... ۲۸
- شکل ۶-۳. شماتیک استفاده از روش سنجش دبی حجمی گاز تولیدی توسط الکترولیزر..... ۲۹
- شکل ۷-۳. لوله گاز جمع‌کن مدرج استفاده شده در آزمایش‌ها..... ۲۹
- شکل ۸-۳. بستر تست آماده شده برای آزمایش‌ها سری دوم..... ۳۰
- شکل ۹-۳. محل نصب ماژول آلتراسونیک در الف) محفظه الکترولیز استوانه‌ای و ب) در محفظه الکترولیز صفحه‌ای..... ۳۱
- شکل ۱۰-۳. نصب ماژول آلتراسونیک در محفظه الکترولیز صفحه‌ای..... ۳۱

- شکل ۳-۱۱ نیروهای وارد شده به حباب‌های هیدروژن تولیدی [۳۹]..... ۳۳
- شکل ۳-۱۲ تغییر جهت نیروی لورنتز با تغییر آرایش قطب‌های آهنرباها [۳۹]..... ۳۳
- شکل ۳-۱۳ ابعاد آهنربای طراحی شده..... ۳۴
- شکل ۳-۱۴ پایه‌ها و منبع تغذیه و آهنرباهای ساخته شده برای آزمایش‌های سری دوم..... ۳۴
- شکل ۳-۱۵ قدرت میدان مغناطیسی تولیدی توسط آهنربای ساخته شده در فواصل مختلف از هسته آهنربا و اعمال توان‌های مختلف..... ۳۵
- شکل ۳-۱۶ دستگاه تسلا متر مورد استفاده در آزمایش..... ۳۶
- شکل ۳-۱۷ الف) ماژول تولید سیگنال و ب) ماژول تقویت کننده استفاده شده در آزمایش‌ها..... ۳۷
- شکل ۳-۱۸ شماتیک مدار الکتریکی سیستم تولید جریان پالسی..... ۳۷
- شکل ۳-۱۹ آزمایش و تنظیم مدار تولید جریان پالسی توسط اسیلوسکوپ..... ۳۸
- شکل ۳-۲۰ دستگاه اسیلوسکوپ مدل GOS-602..... ۳۸
- شکل ۳-۲۱ شماتیک بستر آزمایش آماده شده..... ۳۹
- شکل ۳-۲۲ بستر آزمایش آماده شده در آزمایشگاه..... ۳۹
- شکل ۴-۱ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط هر سلول آزمایش در دانسیته‌های توانی مختلف..... ۴۳
- شکل ۴-۲ شدت انرژی هر سلول آزمایش در دانسیته‌های جریانی مختلف..... ۴۵
- شکل ۴-۳ بازده انرژی هر سلول آزمایش در دانسیته‌های جریانی مختلف..... ۴۵
- شکل ۴-۴ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط سلول A-F با اعمال و بدون اعمال امواج آلتراسونیک در دانسیته‌های توانی مختلف..... ۴۶
- شکل ۴-۵ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط سلول A-F با اعمال و بدون اعمال میدان مغناطیسی در دانسیته‌های توانی مختلف..... ۴۷
- شکل ۴-۶ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط سلول A-F با به‌کارگیری جریان پالسی در فرکانس‌های متفاوت در دانسیته‌های توانی مختلف..... ۴۷

- شکل ۴-۷ بازده انرژی سلول در دانسیته‌های جریان‌ی مختلف با به‌کارگیری روش‌های به‌سازی متفاوت..... ۴۸
- شکل ۴-۸ شدت انرژی سلول در دانسیته‌های جریان‌ی مختلف با به‌کارگیری روش‌های به‌سازی متفاوت..... ۴۹
- شکل ۴-۹ سطح ویژه سلول در دانسیته‌های جریان‌ی مختلف با به‌کارگیری روش‌های به‌سازی متفاوت..... ۴۹
- شکل ۵-۱ الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی به همراه تجهیزات جانبی..... ۵۴
- شکل ۵-۲ محل قرار گیری شیلنگ خروجی الکترولایزر در منیفولد هوای موتور..... ۵۵
- شکل ۵-۳ دستگاه تست گاز تستو مدل ۳۱۰..... ۵۵
- شکل ۵-۴ بلوک دیاگرام اجزای سیستم ترکیبی تولید و تزریق گاز هیدروکسی..... ۵۷
- شکل ۵-۵ بلوک دیاگرام موتور EF7 در نرم افزار AVL boost..... ۵۹
- شکل ۵-۶ مقایسه پارامتر قدرت خروجی موتور در دوره‌های مختلف در داده‌های آزمایشگاهی و مدل..... ۶۰
- شکل ۵-۷ مقایسه پارامتر مصرف سوخت مخصوص ترمزی در داده‌های آزمایشگاهی و مدل..... ۶۰
- شکل ۵-۸ نمودار دبی گازهای اگزوز موتور در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف..... ۶۱
- شکل ۵-۹ نمودار مقدار دمای گازهای اگزوز موتور در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف..... ۶۱
- شکل ۵-۱۰ نمودار مقدار فشار گازهای اگزوز موتور در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف..... ۶۲
- شکل ۵-۱۱ ابعاد و اجزای مبدل ترموالکتریک..... ۶۳
- شکل ۵-۱۲ نمونه ساخته شده ماژول ترموالکتریک..... ۶۳
- شکل ۵-۱۳ آزمون برازش نیکویی پارامتر تولید توان مبدل ترموالکتریک..... ۶۴
- شکل ۵-۱۴ آزمون برازش پارامتر دمای سیال خنک کننده در ورودی ترموالکتریک..... ۶۴
- شکل ۵-۱۵ آزمون برازش پارامتر دمای سیال خنک کننده در مجرای خروجی ترموالکتریک..... ۶۵

- شکل ۵-۱۶ بلوک دیاگرام اجزای موتور در حالت کوپل با مبدل ترموالکتریک (TEG)..... ۶۶
- شکل ۵-۱۷ میزان توان خروجی موتور در دوره‌های مختلف در حالت های بدون ترموالکتریک و با ترموالکتریک..... ۶۶
- شکل ۵-۱۸ میزان توان تولیدی توسط سیستم بازیافت ترموالکتریک در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف..... ۶۷
- شکل ۵-۱۹ سیکل رانندگی تهران [۶۷]..... ۶۸
- شکل ۵-۲۰ نمای ایزومتریک و انفجاری الکترولایزر طراحی شده در نرم افزار سالیدورک..... ۶۹
- شکل ۵-۲۱ نرخ کاهش تولید گاز مونوکسید کربن به ازای تعداد خودروهای سمند EF7 موجود در تهران با نصب سیستم ترکیبی طراحی شده..... ۷۱

فهرست علائم

پارامتر	واحد	توضیحات
V	V	ولتاژ
I	A	جریان الکتریکی
A_{Cathod}	m ²	سطح الکترود کاتدیک
DU		سیکل کاری
\dot{m}_H	kg/s	دبی جرمی هیدروژن
\dot{V}_{HHO}	lit/h	دبی حجمی هیدروکسی
E_{AUX}	W	مصرف تجهیزات جانبی
P	W	تولید توان
T_{EXi}	K	دمای گازهای اگزوز در ورودی
		ماژول ترموالکتریک
\dot{m}_{EX}	kg/s	دبی جرمی گازهای اگزوز
T_{Ci}	K	دمای سیال خنک کننده در ورودی
		ورودی ماژول ترموالکتریک
T_{Co}	K	دمای سیال خنک کننده در خروجی
		ماژول ترموالکتریک
LHV	kJ/kg	ارزش حرارتی پایینی سوخت هیدروژن

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه، پیشرفت روز افزون تکنولوژی باعث افزایش نرخ مصرف سوخت‌های فسیلی در دنیا گردیده است. کشورهای توسعه یافته، مصرف کننده ۸۰ درصد از منابع انرژی دنیا هستند و بخش عمده‌ای از این انرژی از سوخت‌های فسیلی مانند نفت، زغال سنگ و گاز تامین می‌شود که به تولید گازهای گلخانه‌ای و در نهایت تشدید پدیده گرم شدن زمین می‌انجامد. در چنین شرایطی، استفاده از انرژی‌های جایگزین، مناسب و ممکن به نظر می‌رسد [۱-۵].

درعین حال میزان مصرف نفت در هر سال، ۲ تا ۳ برابر میزان اکتشاف آن است. مساله این نیست که چه زمانی آخرین قطره نفت روی زمین مصرف شود، بلکه نکته مهم‌تر آن است که چه وقت میزان نفت تولیدی نمی‌تواند پاسخگوی اندازه مصرف بشر باشد [۶]. قیمت نفت در حال افزایش است و سرانجام روزی فراخواهد رسید که تامین نفت با بحران مواجه خواهد شد. این موضوع در صنعت حمل و نقل بسیار پراهمیت است چرا که ۹۷ درصد از خودروها از مواد نفتی به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. وابستگی به نفت می‌تواند با ترکیب دو راهکار بهینه سازی مصرف انرژی و توسعه منابع انرژی جایگزین کاهش یابد.

از سوی دیگر، استفاده از سوخت‌های فسیلی در سراسر دنیا، باعث افزایش تولید گازهای آلاینده و مضر مانند CO و NOx گردیده است. عملاً گاز مونوکسید کربن حاصل احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی است که به جای گاز دی‌اکسیدکربن در فرایند احتراق تشکیل می‌شود. مقدار تولید مونوکسیدکربن در جهان توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) به طور تقریبی معادل ۲۶۰۰ میلیون تن در سال برآورد گردیده است که ۶۰٪ از این مقدار توسط فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود. مواد موجود در خاک می‌توانند مقداری از این CO را جذب نموده و مقداری نیز در اثر فعل و انفعالات به CO₂ تبدیل می‌شوند. در صورتیکه میزان CO از 750 ppm تجاوز نماید سبب مرگ خواهد شد [۶].

سرعت روند تخریبی آلاینده‌ها، نگرانی کارشناسان و دوستداران محیط زیست را در هرچه بیشتر شدن شکاف اولیه لایه اوزون و پیامدهای نامطلوب آن، همچنین تخریب بیش از پیش محیط زیست

فراهم آورده است. این معضل هم اکنون یکی از بزرگ ترین مشکلات شهرهای بزرگ است؛ به گونه‌ای که طبق تحقیقات مؤسسه مطالعات بین المللی انرژی، حدود ۸۰ درصد از آلودگی هوای شهر تهران، ناشی از خودروهای سواری است که در سطح شهر تردد می‌کنند. این آلودگی بیشتر به دلیل گازهای سمی مونوکسید کربن، کربورهای هیدروژن و اکسیدهای نیتروژن است که از آگزوز خودروها خارج می‌شوند. این گازها سمی هستند و آثار سویی روی سلامت انسان دارند [۶].

یکی از سوخت‌های جایگزین نفت که جدیداً سرمایه‌گذاری‌های زیادی برای گسترش تولید آن در سراسر دنیا می‌شود، سوخت هیدروژن است. ترکیب فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر و هیدروژن یک منبع انرژی پاک و پایدار به حساب می‌آید [۷-۱۰]. تصور کنید که یک سوخت حرارتی آنقدر پاکیزه باشد که وقتی در اجاق خانه شما می‌سوزد نیازی به دودکش نداشته باشید. سوخت موتور یک وسیله نقلیه را در نظر بگیرید که آنقدر تمیز می‌سوزد که آب خارج شده از موتور آن قابل مصرف است. یک دستگاه ذخیره انرژی را در نظر بگیرید که آلودگی ایجاد نمی‌کند و گاز گلخانه‌ای، باران اسیدی و اثرات خوردندگی شیمیایی ایجاد نکرده و هیچ دودی به صورت رد پا بر جای نمی‌گذارد، هیچگونه پسماند رادیواکتیوی ندارد و در عمل از هیچ منبع سوخت طبیعی استفاده نمی‌کند. ترکیب سوخت هیدروژن و منابع تجدیدپذیر می‌تواند این ویژگی‌ها را داشته باشد [۱۱-۱۳].

۲-۱ معرفی انواع روش‌های تولید هیدروژن

با وجود اینکه هیدروژن دومین عنصر فراوان در طبیعت می‌باشد، ولی این گاز همانند سوخت‌های فسیلی متداول در دسترس نیست. هیدروژن را می‌توان از سوخت‌هایی نظیر زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی یا از طریق فرآیندهایی همچون الکترولیز آب، رفورمینگ گاز طبیعی و اکسیداسیون جزئی سوخت‌های فسیلی به دست آورد [۱۴-۱۶]. تولید هیدروژن توسط روش‌های گوناگونی می‌تواند صورت گیرد، روشهای تولید و توزیع هیدروژن عبارتند از [۶]:

۱. تولید انبوه هیدروژن بصورت متمرکز

. توزیع به صورت هیدروژن مایع

. توزیع به صورت گاز فشرده شده

. توزیع به صورت جامد (گاز ذخیره شده در هیدریدهای فلزی)

۲. تولید گاز هیدروژن در جایگاههای سوخت گیری (غیرمتمرکز)

. از منابع گاز طبیعی به روش رفورمینگ متان و اکسیداسیون جزئی: در این روش، مولکولهای

گاز متان در حرارت‌های بالا شکسته شده و هیدروژن خالص تولید می‌گردد.

. با روش الکترولیز آب قلیایی: در این روش، از آب یونیزه شده فاقد هرگونه ناخالصی در فرایند

الکترولیز استفاده می‌گردد. همچنین، سلول‌های الکترولایزر فاقد غشاء جداکننده پلیمری می‌باشند.

. به روش الکترولیز با غشاء پلیمری: در این روش، آب توسط سلول دارای غشاء پلیمری که در

زمان جداسازی گاز هیدروژن و اکسیژن تولیدی را جدا می‌کند، الکترولیز شده و هیدروژن خالص در

این فرآیند تولید می‌گردد.

دورنمای هیدروژن بعنوان یک سوخت در آینده در دو مرحله از زمان حائز اهمیت است:

۱. تولید هیدروژن از منابع فسیلی

. اکسیداسیون جزئی نفت سنگین

. مبدل گاز طبیعی با پروسه تبدیل گاز توسط بخار

. مبدل گاز طبیعی اکسیداسیون جزئی

۲. تولید هیدروژن از منابع غیر فسیلی (تجدیدپذیرها)

. فتوالکتروشیمیایی

. مواد بیولوژیکی

. بیوشیمیایی

. ترموشیمیایی

. ترمولیز آب

. رادیولیز آب

. مواد زیست توده

. الکترولیز آب

برای بهینه سازی و ایجاد تنوع در روشهای تجاری تولید هیدروژن، نیاز به تحقیق و توسعه بیشتر و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی است. روش‌های پیشرفته‌ای جهت جداسازی مواد آلاینده لازم است تا قیمت هیدروژن تولیدی را کاهش داده و بازده را افزایش دهند. روش‌های مناسب‌تری هم برای تولید هیدروژن به صورت پراکنده برای تولید این گاز نیاز است و باید تلاش‌هایی برای افزایش بازده و توسعه فرآیندهای تجاری موجود همچون رفورمینگ گاز متان و الکترولایزرها انجام گیرد [۱۷، ۱۸].

دانشیته کم هیدروژن در حالت گازی، کاربرد هیدروژن را به‌عنوان حامل انرژی با مشکل روبرو ساخته است [۶]. بدین معنی که نسبت به سوخته‌های مایع همچون بنزین یا متانول از محتوای انرژی کمی به ازاء هر واحد حجم برخوردار است. هیدروژن مایع بالاترین ارزش حرارتی را نسبت به کلیه سوخته‌ها داراست. اما باید در دمای بسیار پایین (۲۵۳ درجه سانتیگراد) و فشارهای بالا ذخیره شود که این مساله، ذخیره‌سازی و حمل و نقل آن را مشکل می‌کند.

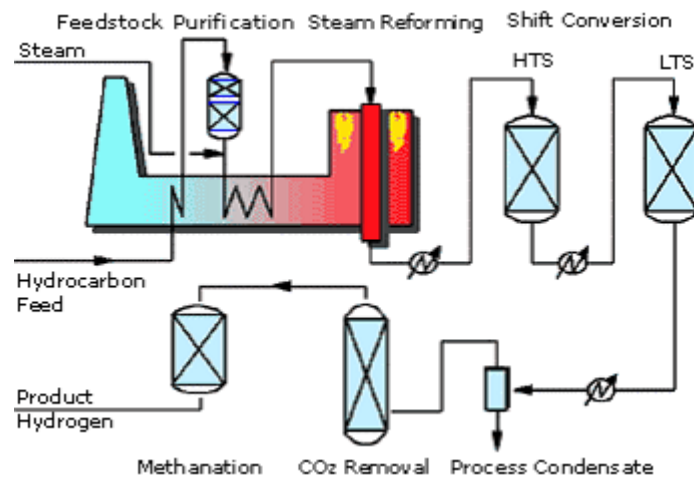
۱-۲-۱ مبدل گاز طبیعی تبدیل با بخار آب

تبدیل گاز طبیعی توسط بخار آب، یکی از روش‌های متداول تولید هیدروژن به حساب می‌آید [۱۹-۲۱]. متان (عنصر اصلی گاز طبیعی) در واکنش تعادلی با بخار آب شرکت کرده و محصول واکنش بطور عمده هیدروژن و گاز مونوکسید کربن می‌باشد:



نقش اصلی بخار در واکنش‌های تبدیل با بخار این است که تعادل را به سمت تولید CO و H_2 هدایت می‌کند و با توجه به تعادلی بودن واکنش، با کاهش فشار، واکنش به سمتی پیش می‌رود که تعداد بیشتری مولکول هیدروژن تولید شود. علاوه بر متان سایر هیدروکربن‌ها نیز می‌توانند در واکنش تبدیل با بخار آب شرکت کرده و تولید هیدروژن نمایند.

این واکنش به شدت گرماگیر بوده و برای تولید بیشتر هیدروژن و مونوکسیدکربن باید واکنش در شرایط دمایی بالا و فشار پائین انجام شود. در طول فرآیند، فشار معمولاً ثابت می‌باشد؛ بنابراین بالا بردن درجه حرارت واکنش را به سمت تولید هیدروژن پیش می‌برد. برای تأمین چنین حرارت بالایی (حدود ۸۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) راکتوری که واکنش در آن انجام می‌شود را در بخش تشعشعی یک کوره قرار می‌دهند.

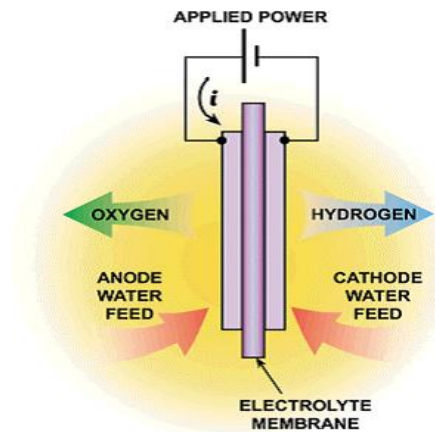


شکل ۱-۱. بلوک دیاگرام سیستم تولید هیدروژن به روش رفورمینگ بخار

۱-۲-۲ روش الکترولیز آب

اصول الکترولیز آب اولین بار توسط مایکل فارادای در سال ۱۸۲۰ میلادی ارایه گردید و فرآیندی است که طی آن هیدروژن و اکسیژن از آب تولید می‌شود [۲۲-۲۳]. لغت الکترولیز در حقیقت به معنای

شکستن و جدا کردن (در اینجا آب) با استفاده از جریان برق می‌باشد. الکترولیز آب فرآیند بسیار ساده‌ای می‌باشد که طی آن جریان برق را از میان محلولی که شامل آب و الکترودها می‌باشد، می‌گذرانند. مطابق شکل ذیل طرز کار دستگاه الکترولیز به این صورت است که قطب منفی باتری به کاتد (الکتروده منفی) و قطب مثبت باتری به آند (الکتروده مثبت) متصل می‌شود. در الکتروده آند تمایل به جذب الکترون‌ها وجود دارد. آب دارای هدایت الکتریکی پایینی برای عبور جریان الکتریکی می‌باشد به این خاطر برای افزایش هدایت الکتریکی در فرآیند الکترولیز به آن الکترولیت اضافه می‌کنند.



شکل ۱-۲. سلول الکترولیز تولید کننده هیدروژن خالص دارای غشای نیمه تراوایی

مولکول‌های آب در اطراف الکتروده کاتد به یونهای OH^- و H^+ تفکیک می‌شوند و مقدار مولکول‌های آب در اطراف کاتد کاهش می‌یابد و غلظت OH^- بالا می‌رود. انتظار می‌رود که مولکول آب به یک یون H^+ و یک یون OH^- تفکیک شود، اما این اتفاق رخ نمی‌دهد؛ به دلیل اینکه اتم اکسیژن دارای الکترونگاتیوی بیشتری نسبت به اتم هیدروژن می‌باشد.



بنابراین این مسئله باعث می‌شود که سطح بیرونی کاتد کاملاً توسط یون‌های هیدروکسید پوشیده شود اما یون H^+ فاقد پروتون می‌باشد و تلاش زیادی کرده تا یک الکترون گرفته و به صورت یک اتم

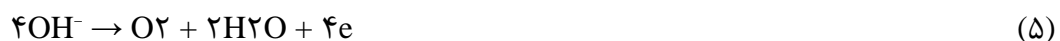
هیدروژن در می آید:



این اتم هیدروژن با اتم هیدروژن دیگری برخورد کرده و تشکیل یک مولکول گاز هیدروژن را می دهد و این مولکول گاز هیدروژن به صورت حباب هایی از سطح آب خارج می شود:

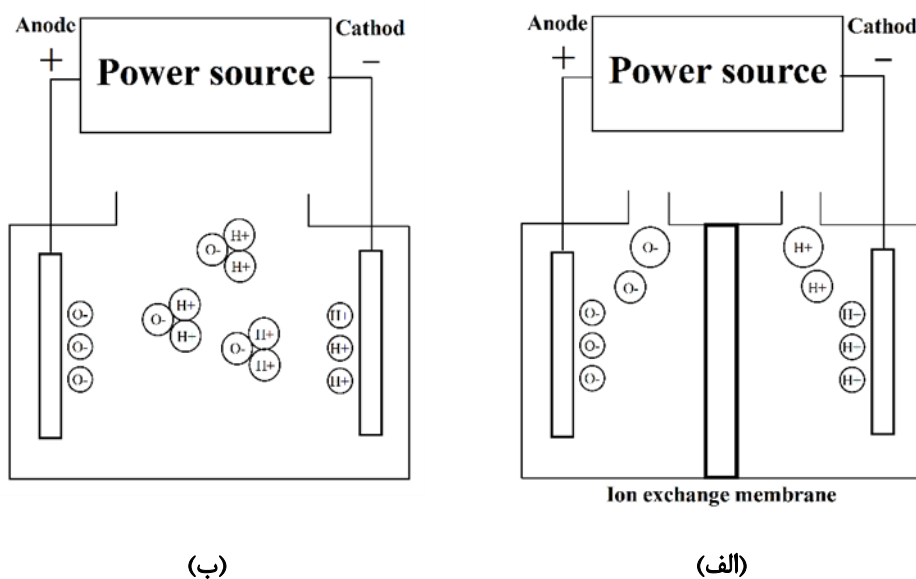


در عین حال یون های هیدروکسید (OH^-) به سمت آند مهاجرت کرده و به سطح آند می رسند. آند الکترون های اضافی را که یون های هیدروکسید از هیدروژن گرفته بود، را پس می گیرد و یون هیدروکسید مجدداً با سه مولکول هیدروکسید دیگر تشکیل یک مولکول گاز اکسیژن و دو مولکول آب می دهد. مولکول اکسیژن پایدار بوده و به صورت حباب هایی به سطح آب می آید.



۳-۱ هیدروژن خالص و گاز هیدروکسی

در صورتی که در الکترولایزر تولید کننده سوخت هیدروژنی، از غشاء نیمه تراوا، به منظور جداسازی هیدروژن و اکسیژن در زمان تولید استفاده گردد، خروجی الکترولایزر هیدروژن خالص خواهد بود [۲۳-۲۴]. چنانچه غشاء نیمه تراوا ذکر شده حذف گردد، هیدروژن و اکسیژن تولیدی با یکدیگر ترکیب شده و گاز هیدروکسی در خروجی الکترولایزر تولید می گردد. به الکترولایزرهای تولید کننده گاز هیدروکسی، الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی می گویند. از این نوع الکترولایزرها غالباً در خودروها به منظور کاهش آلاینده های تولیدی توسط آنها، مورد استفاده قرار می گیرد. عدم استفاده از غشاء یونی در این نوع الکترولایزرها، باعث کاهش قیمت نهایی آنها نسبت به انواع دیگر شده است.



شکل ۳-۱. سلول الکترولیز دارای الف) غشای نیمه تراوایی و ب) بدون غشای نیمه تراوایی

۴-۱ کاربرد الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی^۱ در خودروها

وقتی از سوخت هیدروژن به عنوان سوخت کمکی در خودروها استفاده می‌گردد، مقدار سوخت مورد نیاز در زمان پاشش، به صورت آبی در الکترولایزر تولید می‌شود [۲۸-۳۰]. تولید آبی این گاز در زمان کار موتور، باعث کاهش خطرات ناشی از ذخیره سازی این سوخت پایه هیدروژنی در خودروها شده و ریسک انفجار مخزن حاوی گاز را به صفر می‌رساند.

بازده حرارتی موتورهای بنزینی، غالباً در بازه ۲۰ تا ۳۵ درصد می‌باشد [۳۱-۳۲]. بدین ترتیب حدود ۶۵ تا ۸۰ درصد از انرژی شیمیایی سوخت، در موتور از طریق اگزوز، سیستم خنک کننده و روانکاری، تلف می‌گردد. با به کارگیری یک سیستم بازیافت انرژی در هریک از مجراهای تلفاتی موتور، می‌توان مقدار قابل توجهی از انرژی تلفاتی را بازیافت کرد [۳۳-۳۶]. کاربرد سیکل‌های ترمودینامیکی مانند سیکل رانکین، برای تون و جذبی و ماژول‌های الکتروشیمیایی مانند مبدل‌های ترموالکتریک غالباً برای بازیافت انرژی‌های تلفاتی موتور، مرسوم می‌باشند.

^۱ HHO Generator

۵-۱ پارامترهای فیزیکی افزایش بازده الکترولایزر

یکی از عوامل کاهش بازده الکترولایزرها، تشکیل لایه حبابی روی الکترودها می‌باشد که باعث افزایش تلفات انتقال جرم، خواهد شد. مولکول‌های هیدروژن و اکسیژن تولیدی در الکترولایزر، در زمان تولید، به شکل حباب به سطح الکترودها چسبیده و این امر باعث افزایش مقاومت الکتریکی سلول و در نتیجه کاهش بازده الکترولایزر خواهد شد [۳۷ و ۱۲]. به منظور افزایش بازده انرژی الکترولایزرها، از روش‌های مختلفی استفاده می‌گردد [۳۸-۴۰]. برخی از این روش‌ها شامل:

- امواج آلتراسونیک

- میدان مغناطیسی خارجی

- القای جریان پالسی

معمولاً هر یک از اجزاء ذکر شده در قالب یک ماژول، در الکترولایزر نصب می‌گردد. استفاده از امواج آلتراسونیک، باعث افزایش بازده پمپ حباب‌های تولیدی می‌گردد [۳۸]. حباب‌های هیدروژن و اکسیژن تولیدی در بدو تولید، روی سطح الکترودها قرار گرفته و این امر باعث افزایش مقاومت الکتریکی سلول خواهد شد. استفاده از امواج آلتراسونیک، باعث حرکت حباب‌ها به سمت سطح آب و در نتیجه انتقال سریع آنها به خروجی الکترولایزر می‌گردد. میدان مغناطیسی نیز تاثیر مشابه امواج آلتراسونیک، در الکترولایزر خواهد داشت [۳۹]. استفاده از دو آهنربا با قطب‌های ناهم نام در داخل الکترولایزر، باعث اعمال نیروی لورنتز به حباب‌های تولیدی می‌گردد. نیروی لورنتز باعث افزایش سرعت حرکت حباب‌ها و در نتیجه افزایش بازده پمپ حباب‌ها در الکترولایزر خواهد شد. یکی دیگر از راه‌های افزایش بازده پمپی حباب‌های تولیدی در الکترولایزر، استفاده از جریان DC پالسی می‌باشد. در این روش، جریان پالسی با فرکانس‌ها و سیکل‌های کاری مختلف به الکترولایزر اعمال می‌گردد [۴۰]. برای کاربرد این نوع روش در الکترولایزر، جریان DC منبع تغذیه توسط یک بورد تولید سیگنال و تقویت کننده، به جریان پالسی تبدیل می‌گردد.

در روش تولید هیدروژن با بهره‌گیری از مکانیزم الکترولیز آب، آب در فاصله‌ی بین دو الکتروود آند و کاتد قرار گرفته و با عبور الکترون بین دو الکتروود ذکر شده، مولکولهای آب شکسته شده و هیدروژن و اکسیژن تولید می‌گردد.

بازده تولید گاز هیدروژن توسط الکتروولایزر، یکی از نکات کلیدی در تولید توسط این روش می‌باشد. بطور کلی الکتروولایزرهای تولید کننده هیدروژن دارای انواع مختلفی می‌باشند که در صنایع مختلف کاربرد دارند. در پژوهش حال حاضر، الکتروولایزر نوع الکتروولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی به دلیل سادگی، وزن کم و کاربرد زیاد مورد ارزیابی قرار گرفته است. الکتروولایزرهای تولید کننده گاز هیدروکسی دارای غشای نیمه تراوایی برای جداسازی گاز هیدروژن و اکسیژن در بدو تولید نبوده، بدین ترتیب ارزان‌تر از بقیه انواع الکتروولایزرها می‌باشند. گاز تولیدی توسط این نوع الکتروولایزرها را، گاز هیدروکسی یا HHO می‌نامند که معمولاً ترکیبی از هیدروژن و اکسیژن می‌باشد.

در این پایان‌نامه، پس از مقدمه در فصل اول، پیشینه پژوهش در فصل دوم ارائه گردیده است. سپس مراحل ارزیابی عملی یک الکتروولایزر تک سلولی در فصل سوم تشریح و نتایج آن در فصل چهارم ارائه شده است. مصرف انرژی این نوع الکتروولایزر با بهره‌گیری از روش‌های مختلف و بررسی پارامترهای گوناگون، بهسازی گردیده است. در فصل ۵، از الکتروولایزر ذکر شده جهت اصلاح عملکرد احتراق در موتور احتراقی بنزینی (موتور سمند EF7)، در دور آرام، جهت کاهش آلاینده CO بهره‌گیری شده است. گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکتروولایزر، مستقیماً به مجرای هوای ورودی موتور تزریق شده و تأثیر آن بر تولید گاز مونواکسید کربن توسط موتور، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز الکتروولایزر از انرژی‌های تلفاتی موتور، طرحی ترکیبی شامل موتور، الکتروولایزر و مولد های ترموالکتریک ارائه گردیده است.

فصل ۲: پیشینه پژوهش

۱-۲ مقدمه

مصرف انرژی های فسیلی (زغال سنگ، نفت، گاز و ...)، آلودگی هوا و محیط زیست را به همراه آورده، به طوری که تنفس در هوای پاک و بدون آلاینده‌ها به یکی از آرزوهای شهروندان شهرهای بزرگ از جمله تهران تبدیل شده است.

طبق آمار سازمان بهشت زهرا در سال ۱۳۹۸، ماهانه حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد از مرگ و میرها به علت سگته قلبی است و از قرار معلوم ترافیک تهران، متهم شماره یک این تلفات انسانی و تهدید سلامت شهروندان است [۶]. هزینه درمان ناشی از آلودگی هوا در یک سال، برای شهروندان تهرانی حداقل ۱۶۰ میلیارد ریال است. با توجه به این مشکلات، آنچه ذهن هر پرسشگری را به خود مشغول می‌کند، این است که برای این معضل چه راهکارهایی می‌توان اندیشید. در این زمینه تلاش‌های بسیاری در سطح داخلی و بین‌المللی انجام شده است. برای مثال، ۱۶۰ کشور جهان؛ پروتکل کیوتو را در دسامبر ۱۹۹۷ به منظور کاهش میزان خالص انتشار گازهای گلخانه‌ای تصویب کردند. اما آنچه بیشتر محققان به عنوان راهکارهای جدید به منظور کاهش آلاینده‌های محیط زیست سفارش می‌کنند، کاهش مصرف سوخت های فسیلی و جانشینی انرژی های نو (انرژی بادی، آبی و ...) است.

مونوکسید کربن با فرمول شیمیایی CO، گازی است که بر اثر سوختن ناقص کربن به وجود می‌آید. این گاز بسیار سمی است و چون رنگ و بوی خاصی ندارد، به آن قاتل نامرئی می‌گویند. میل ترکیبی گاز کربن مونوکسید با هموگلوبین خون انسان، ۳۰۰ برابر اکسیژن است [۶]، لذا در صورتی که انسان در معرض گاز کربن مونوکسید با غلظت بالا باشد، این گاز به سرعت جایگزین اکسیژن در خون و در نهایت مرگ می‌شود.

گاز مونوکسید کربن اغلب به دلیل پدیده احتراق ناقص در موتورها تولید می‌گردد [۴۱]. یکی از راهکارهای مقابله با پدیده احتراق ناقص در موتور خودروها، غنی سازی هوای ورودی آنها توسط سوخت

هیدروژن می‌باشد [۴۲]. از آنجا که تغذیه کامل موتور خودروها، با سوخت هیدروژن قابل دستیابی است، اما تولید هیدروژن فرآیندی انرژی بر بوده و در حال حاضر از این سوخت، به عنوان سوخت کمکی در موتورهای احتراقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۲-۱ روش‌های افزایش بازده در الکترولایزرهای تولید کننده گاز هیدروکسی

۲-۲-۱-۱ القای امواج پالسی DC

چمبرز [۴۳] نیز اختراعی به ثبت رسانیده مبنی بر القای امواج پالسی DC با فرکانس ۲۵۰ کیلوهرتز که باعث افزایش تولید گاز، توسط الکترولایزر خواهد شد. محققان دیگری [۴۴]، با القای امواج مربعی DC با فرکانس حدود ۴۰ کیلوهرتز، باعث افزایش بازده قابل توجه گاز توسط الکترولایزر شده‌اند. فرکانس رزونانس سلولهای الکترولایزر بستگی به پارامترهای زیادی دارد و این فرکانس در هر الکترولایزر با اندازه ها و مشخصات مختلف متفاوت است. لاونتون [۴۴] در آزمایشها خود، با القای جریان DC با شکل موج مربعی و با پیک ولتاژ بالا، باعث افزایش بازده الکترولیز، در حد قابل توجهی شده است.

نکته حائز اهمیت در انواع تکنیکهای رزونانسی، آماده‌سازی اولیه الکترودها می‌باشد. صافی سطح الکتروود تاثیر بسزایی در بازده الکترولیز داشته و باید حتما قبل از ساخت سلولها، کاملا تمیز و صاف شوند [۴۵].

نیگل مونک [۴۶]، تحقیقاتی بر روی روش پالس الکتریکی در فرایند الکترولیز انجام داده است. وی در تحقیقات خود بدین نکته اشاره کرده که برای کاهش مصرف انرژی الکترولایزر و همچنین کوچکتر کردن سایز آن، باید میزان Surface current density الکتروود افزایش یابد. وی از روش پالس جریان

DC الکتریکی برای رسیدن به این هدف استفاده کرد. او در مروری که انجام داده، به بررسی اثرات خازن در مدارات پالس انرژی الکتریکی در الکترولیز پرداخته است. استفاده از خازن در مدارات، باعث استمرار فرایند الکترولیز در زمان Pulse off-time خواهد شد. سپس بدین نتیجه رسید که دستیابی به Current density بالا، مستلزم استفاده از الکترولیز پلاسمایی می‌باشد. در برخی موارد، تولید هیدروژن در این روش، حدود ۲۰ برابر بیشتر برآورد شده است.

دمیر و همکارانش [۴۷]، تاثیر جریان پالسی با فرکانس‌های مختلف را بر روی الکترولیزر نوع آلکالین مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌هایشان، استفاده از روش پالسی باعث کاهش ۲۰ تا ۲۵ درصدی مصرف انرژی سلول الکترولیزر به ازای تولید یک مول هیدروژن شده است. به علاوه، ناوهیرو [۴۸]، در تحقیقاتش بر روی روش پالسی بدین نتیجه رسید که افزایش جریان اعمالی به سلول، در زمان به کار گیری جریان پالسی، باعث کاهش بازده سلول نخواهد شد. به علاوه، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هرچه سیکل کاری پالس کوتاه‌تر باشد، بازده الکترولیز بالاتر خواهد بود.

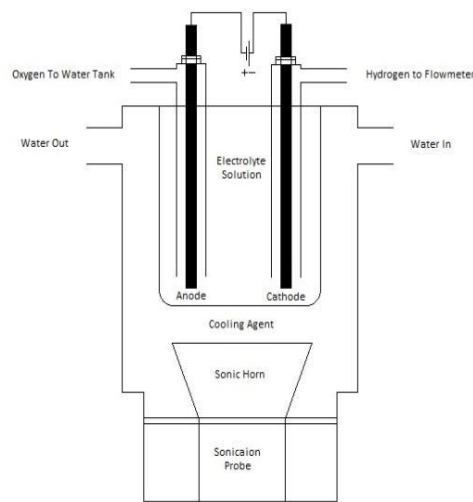
۲-۱-۲-۲-۲ هندسه الکترودها

ماندال و همکارانش [۴۰] به اثرات الکترودهای میله‌ای و صفحه‌ای در فرآیند الکترولیز را بررسی و آن‌ها را باهم مقایسه کرده‌اند. آن‌ها در تحقیقاتشان به این نتیجه رسیدند که الکترودهای میله‌ای باعث افزایش بازده الکترولیز آب به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد خواهد شد. در آزمایش‌ها انجام شده توسط استنلی میر و لاونتون [۴۵ و ۴۹] از الکترودهای نوع لوله‌ای در فرآیند الکترولیز استفاده شده است. همچنین چمبرز [۴۳] نیز در طرح ثبت اختراع خود، از الکترودهای نوع لوله‌ای استفاده کرده ولی هیچکدام از آن‌ها مقایسه‌ای بین این نوع الکترودها و الکترودهای صفحه‌ای انجام نداده‌اند.

۲-۱-۲-۲-۳ امواج آلتراسونیک

گزارش‌های خروجی مقالات حاکی از این است که استفاده از امواج آلتراسونیک در فرآیند الکترولیز

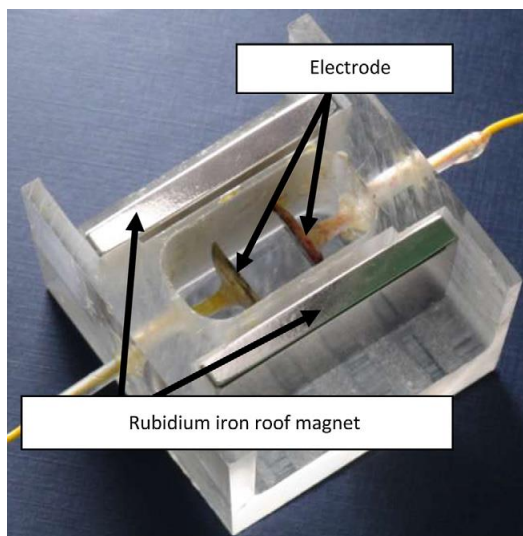
آب، باعث افزایش بازده الکترولیز خواهد شد [۳۰ و ۵۰-۵۲]. آزمایش امواج آلتراسونیک با شدت‌های مختلف و بررسی تاثیرات آن بر بازده سلول توسط مین و هورانگ انجام گرفته است [۵۰]. آن‌ها به این موضوع اشاره کرده‌اند که به‌کارگیری امواج آلتراسونیک باعث افزایش بازده پمپ حباب‌های تشکیل شده در فرآیند الکترولیز خواهد شد که در نتیجه باعث افزایش بازده کلی سلول می‌گردد. در آزمایش‌ها انجام گرفته توسط سلمان حسن زاده [۵۲]، استفاده از امواج آلتراسونیک در الکترولیزر، باعث افزایش ۴,۵ درصدی بازده تولید گاز هیدروژن و افزایش ۱,۳ درصدی بازده انرژی سلول الکترولیز گردیده است.



شکل ۱-۲ بستر آزمایش ساخته شده توسط سلمان حسن زاده [۵۲]

۴-۱-۲-۲ میدان مغناطیسی

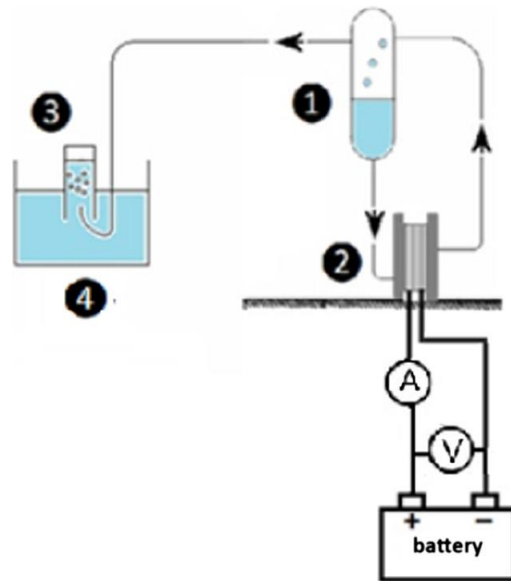
لین و همکارانش [۳۹ و ۵۳ و ۵۴]، تاثیرات میدان مغناطیسی بر بازده الکترولیز آب را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آنها در آزمایش‌ها خود، از آهنرباهای دائم (جنس نئودیوم) با شدت میدان حدوداً ۴,۵ تسلا استفاده کردند. سپس میزان تولید هیدروژن توسط سلول الکترولیز را ثبت و با کمک دوربین فریم بالا، ثبت و مورد تحلیل قرار دادند. طبق گزارشات موجود در مقالات ارائه شده توسط ایشان، به‌کارگیری آهنربای دائم با شدت میدان ذکر شده باعث افزایش بازده ۲۵ درصدی تولید هیدروژن سلول الکترولیز شده است.



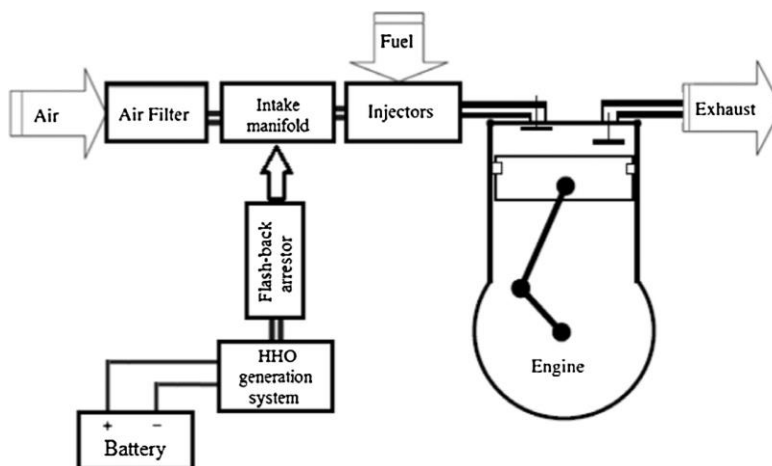
شکل ۲-۲ بستر آزمایش ساخته شده توسط لین [۳۹]

۲-۲-۲ تزریق هیدروکسی به موتور بنزینی

محمد الکسای و همکارانش [۵۵]، به بررسی اثر پاشش مقادیر مختلف گاز هیدروکسی بر بازده موتور احتراقی و آلاینده‌های تولیدی توسط آن پرداخته‌اند. در آزمایش‌های انجام گرفته توسط ایشان، ابتدا یک دستگاه الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی ساخته شده و با تغییر پارامترهای غلظت الکترولیت و فاصله بین سلول‌ها، به‌سازی گردیده است. پس از تزریق گاز هیدروکسی به موتور، بازده حرارتی موتور به میزان ۱۰ درصد افزایش و تولید آلاینده های CO، HC و NOx به ترتیب به میزان ۳۴٪، ۱۸٪ و ۱۵٪ کاهش داشته است.



شکل ۲-۳ بستر آزمایش ساخته شده برای اندازه‌گیری مقدار گاز هیدروکسی تولیدی توسط محمد الکسابی [۵۵]



شکل ۲-۴ شماتیک نشان‌دهنده محل قرارگیری الکترولایزر و محل تزریق سوخت در موتور [۵۵]

تحقیقات کامل‌تری توسط یاسین کاراکگز و همکارانش [۵۶] در سال ۲۰۱۸ در زمینه پاشش گاز هیدروکسی در موتور و بررسی اثرات آن بر پارامترهای مختلف موتور انجام گرفته است. برحسب نتایج تحقیقات آنها، مقدار پارامتر $ISFC^1$ موتور در زمان پاشش گاز هیدروکسی افزایش چشم‌گیری داشته و همچنین آلاینده‌های CO و HC به ترتیب به میزان $21/3$ درصد و $86/1$ درصد کاهش داشته‌اند. وی

¹ Indicator Specific Fuel Consumption

به این نکته اشاره کرده است که مقدار آلاینده NOx در زمان پاشش افزایش ناچیزی داشته که با به کارگیری روش EGR و مبدل کاتالیستی سه راهه می توان آنرا کنترل کرد.

تحلیل پاشش گاز هیدروکسی در حالت کارکرد تحت بار موتور توسط محققانی دیگر [۵۷,۵۸] مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج بدست آمده نشان دهنده کاهش میزان HC و CO تولیدی توسط موتور با تزریق مقادیر مختلف از این گاز می باشد.

۳-۲-۲ سیستم های بازیافت انرژی تلفاتی

به منظور بازیافت انرژی های تلفاتی اگزوز موتور خودروهای سواری معمولاً از سیکل های ترمودینامیکی در مقیاس کوچک [۳۳-۳۵] و یا ماژول ترموالکتریک [۶۲-۵۹] استفاده می گردد. در سیستم نیرو محرکه خودروهای سواری بنزینی، بطور متداول از ماژول های ترموالکتریک با سیستم خنک کاری مجزا به دلیل سادگی و وزن کم استفاده می شود. مبدل های ترموالکتریک معمولاً دارای وزن کم و ابعاد کوچک بوده و نصب آنها بر روی سیستم اگزوز موتور آسان می باشد. ماساگور و همکارانش [۵۹] به بررسی تاثیر به کارگیری مبدل ترموالکتریک بر مصرف سوخت موتور و خروجی آن در شرایط مختلف موتور، پرداخته اند. آنها مبدل ترموالکتریک را مدلسازی عددی کرده و توسط آزمایش های تجربی، مدلسازی انجام شده را صحت گذاری کرده اند. بررسی اثر نوسانی بودن دبی گازهای اگزوز موتور و تاثیرات آن در خروجی مبدل توسط نور ادین و همکارانش [۶۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها به این نتیجه رسیدند که این پدیده باعث تغییر ۳۰ درصدی خروجی مبدل ترموالکتریک، نسبت به حالت غیر نوسانی می گردد. همچنین گوکان شو و همکارانش [۶۲] به بررسی به کارگیری سطوح گسترده و آرایش های مختلف ماژول های ترموالکتریک در بازده خروجی آن پرداخته اند. آنها در نهایت به طرح بهینه ای دست یافته اند که باعث افزایش ۳۰ درصدی بازده مبدل ترموالکتریک شده است.

۳-۲ معرفی پژوهش حاضر

در این پژوهش از الکترولایزر نوع تولید کننده گاز هیدروکسی جهت اصلاح احتراق در موتور احتراق داخلی و کاهش آلاینده مونوکسید کربن استفاده شده است. در ابتدا با ساخت نمونه الکترولایزر تک سلولی اثر تغییر پارامترهای مختلف بر مصرف انرژی الکترولایزر به سازی گردیده و سپس ابعاد و وزن آن تعیین گردیده است. تاثیر پارامترهای هندسی نظیر شکل الکترودها و فاصله آنها از یکدیگر در داخل سلول و پارامترهای فیزیکی نظیر امواج آلتراسونیک، میدان مغناطیسی و جریان پالسی در میزان تولید گاز هیدروکسی توسط سلول و همچنین مصرف انرژی آن مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. سپس آزمایش پاشش گاز هیدروکسی در موتور در حالت دور آرام و کارکرد درجا با هدف کاهش آلاینده‌گی تولیدی توسط موتور انجام گرفته است. در قدم بعدی موتور مورد نظر مدلسازی شده و انرژی‌های تلفاتی آن در حالت رانندگی شهری بدست آمده است. براساس مدلسازی صورت گرفته، عملکرد به کارگیری مبدل ترموالکتریک، در سیستم اگزوز موتور مورد ارزیابی قرار گرفته است. انرژی تولیدی توسط ترموالکتریک در حالت رانندگی تحت بارهای مختلف در شهر، در باطری ذخیره شده و در زمان توقف خودرو، به الکترولایزر به سازی شده منتقل و پاشش گاز هیدروکسی در موتور انجام می‌گیرد.

۳-۲-۱ نوآوری

در تحقیقات انجام گرفته تاکنون در زمینه به کارگیری روش‌های مختلف افزایش بازده الکترولایزر از الکترولایزر نوع تولید کننده گاز هیدروکسی استفاده نشده است و اغلب از الکترولایزرهای تولید کننده هیدروژن خالص استفاده شده است. از طرفی دیگر، در اکثر مقالات، تاثیر پارامترهایی نظیر تاثیر امواج آلتراسونیک و میدان مغناطیسی خارجی، از دیدگاه میکروسکوپیک و فیزیک محض بررسی شده در حالی که در این پژوهش، تاثیر تمامی پارامترها از دیدگاه انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

اغلب محققانی که روی پاشش گاز هیدروکسی در موتور احتراقی مطالعه انجام داده‌اند، پاشش هیدروکسی با مقادیر مختلف را در حالات مختلف موتور مورد بررسی داده‌اند و از مصرف انرژی الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی صرف نظر کرده‌اند. طبق آنالیزهای انجام گرفته، مصرف انرژی الکترولایزر برای تولید دبی حجمی زیاد از گاز هیدروکسی، بسیار زیاد بوده و غالباً تزریق آن به صورت آبی در دورهای بالا و تحت بارهای بالا از دیدگاه انرژی دست یافتی نبوده و باعث ایجاد مشکلات دیگر از قبیل کاربرد باطری‌های ظرفیت بالا خواهد شد. در این پژوهش، پاشش الکترولایزر فقط در حالت کار درجا موتور، یعنی حالتی که احتراق موتور دارای نواقص زیادی است، به منظور کاهش آلاینده مونوکسید کربن تولیدی در زمانی که موتور در ترافیک‌های سنگین قرار دارد، انجام گرفته است. همچنین مصرف انرژی الکترولایزر ارزیابی گردیده و با طراحی یک سیستم بازفراوری انرژی، به طور کامل از انرژی‌های تلفاتی موتور تامین گردیده است.

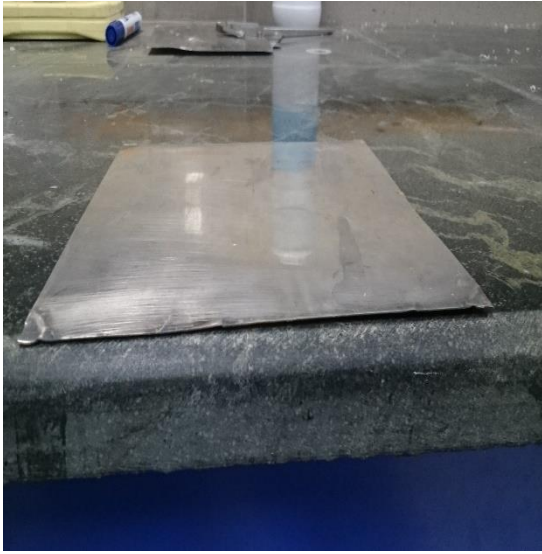
فصل ۳: طراحی و آماده سازی بستر آزمایش

۳-۱ مقدمه

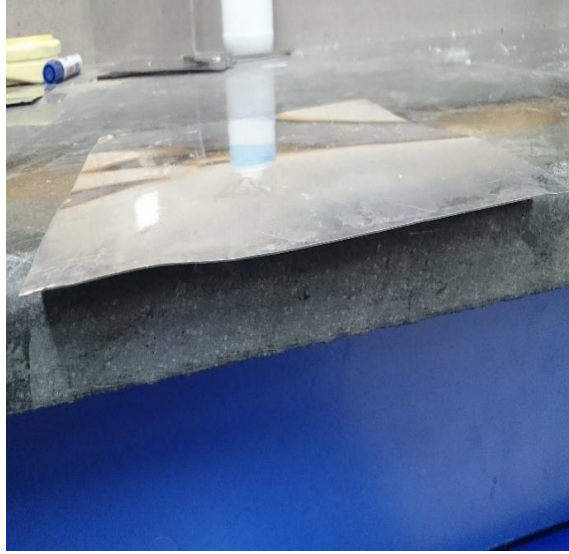
جهت ارزیابی عملی اثر پارامترهای مختلف برای بهبود مصرف انرژی الکترولایزر، یک واحد آزمایشگاهی تک سلولی طراحی و ساخته شد. طراحی آزمایش به گونه‌ای انجام گردیده است که در مرحله اول آزمایش، هندسه سلول و فواصل بهینه بین الکترودهای آن تعیین گردد. سپس در آزمایشها تاثیر پارامترهای خارجی مختلف بر مقدار تولید گاز هیدروکسی بررسی گردید.

۳-۲ آماده‌سازی سلول‌های آزمایش

الکترودهای استوانه‌ای و صفحه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن با اشکال مختلف و فواصل مختلف تحت جریان DC مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بدین منظور، سلولهای استوانه‌ای و صفحه‌ای با فواصل مختلف طراحی و ساخته شدند. برای ساخت سلول‌های صفحه‌ای از ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده گردید. همچنین، از لوله‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ضخامت یک میلی‌متر جهت ساخت الکترودهای استوانه‌ای (با ابعاد ذکر شده در جدول ۱-۳) استفاده شد. در زمان برش دهی ورق استیل جهت تولید الکترودهای صفحه‌ای، صفحات تولید دارای اعوجاج گردیده و توسط پرس هیدرولیک کاملاً صاف گردید.



(ب)



(الف)

شکل ۱-۳ الکترودهای صفحه‌ای الف) قبل از عملیات پرس و ب) بعد از عملیات پرس

قبل از ساخت سلول‌ها، الکترودها در فرآیند آماده سازی که شامل مراحل زیر می‌باشند، قرار گرفته‌اند:

- هر الکترود در ظرفی پر از هیدروکلریک اسید به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند
- سپس به مدت ۴۰ دقیقه در داخل محفظه الکترولیز، به منبع تغذیه DC متصل و تحت اثر فرآیند الکترولیز قرار گرفتند
- به مدت ۲۰ دقیقه در داخل ظرفی پر از سرکه خوابانیده شدند
- در انتها سطوح آنها توسط اسکاج و آب مورد شست و شو قرار گرفتند

مراحل آماده سازی الکترودها به منظور افزایش صافی و تمیز کردن سطوح آنها از هرگونه مواد ناخالص، انجام گرفت. سپس الکترودهای آماده شده توسط آب بندها با ضخامت‌های مختلف به یکدیگر متصل شده و بدین ترتیب سلول‌های آزمایش با فواصل مختلف ساخته شدند. ابعاد و فواصل الکترودها در سلول‌های ساخته شده در جدول ۱-۳ ارائه گردیده است.



(ب)

(الف)

شکل ۳-۲ سلول‌ها و الکترودهای الف) صفحه‌ای و ب) استوانه‌ای

جدول ۳-۱. ابعاد و فواصل الکترودهای سلول‌های آزمایش

سلول	فاصله بین الکترودها [mm]	ابعاد الکترود کاتود [mm]	ابعاد الکترود آند [mm]
A-F	۲	۱۶۰*۱۶۰	۱۶۰*۱۶۰
B-F	۳	۱۶۰*۱۶۰	۱۶۰*۱۶۰
C-F	۶/۵	۱۶۰*۱۶۰	۱۶۰*۱۶۰
A-C	۲	۲۰۰*۳۲∅	۲۰۰*۲۵∅
B-C	۳	۲۰۰*۳۸∅	۲۰۰*۳۲∅
C-C	۶/۵	۲۰۰*۳۸∅	۲۰۰*۲۵∅

۳-۳ آزمایش‌های سری اول: تعیین هندسه و فاصله بین الکترودها

به منظور آزمایش الکترودها تحت جریان DC و اندازه‌گیری دبی گاز هیدروکسی تولیدی توسط آنها، محفظه‌های الکترولیز مخصوص سلول‌های استوانه‌ای و صفحه‌ای طراحی و ساخته شد. این محفظه‌ها از

جنس پلکسی بوده و دارای درپوش می باشند. گاز تولید شده در محفظه، توسط لوله‌ی آلومینیومی تعبیه شده روی درپوش، از محفظه خارج می گردد. به منظور کاهش رطوبت، گاز هیدروکسی تولیدی پس از ترک محفظه الکترولیز، وارد بابلر^۱ می گردد.



شکل ۳-۳ محفظه الکترولیز ساخته شده برای سلول استوانه‌ای و بابلر



(ب)

(الف)

شکل ۴-۳ محفظه الکترولیز در حالت کوپل با منبع تغذیه DC (الف) استوانه‌ای و (ب) صفحه‌ای

^۱ Bubbler

بدین ترتیب، سلول‌های آزمایش داخل محافظ الکترولیز مخصوص خود قرار داده شده، الکتروود کاتد و آند به ترتیب توسط سیم به قطب منفی و مثبت منبع تغذیه متصل شده‌اند (مانند شکل ۳-۴). سپس آب مقطر درون ظرفی دیگر (بشر) با KOH محلول گردیده‌اند. KOH به عنوان الکترولیت به آب اضافه گردیده و باعث کاهش خوردگی الکتروودها و افزایش هدایت الکتریکی سلول‌ها خواهد شد. صرف نظر از تاثیرات هیدروکسید پتاسیم بر بازده سلول‌ها، درصد وزنی آن در محلول الکترولیت تولیدی در آزمایش‌های تعیین هندسه و فاصله الکتروودها، برابر ۵ درصد در نظر گرفته شد.

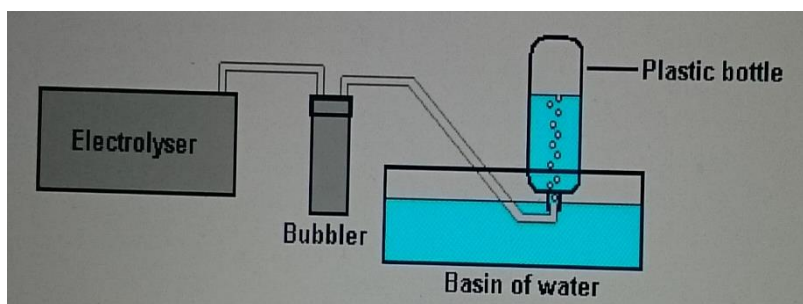


شکل ۳-۵ منبع تغذیه استفاده شده در بستر تست

منبع تغذیه DC مدل MP-3010 نشان داده شده در شکل ۳-۵، توانایی تولید جریان و ولتاژ به ترتیب تا ۱۰ آمپر و ۲۴ ولت را دارا می‌باشد. دقت قرائت ولتاژ و جریان در منبع تغذیه مورد نظر ۰/۵ درصد می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری دبی گاز هیدروکسی تولیدی توسط هر سلول، از دو روش اندازه‌گیری به‌طور همزمان استفاده گردیده است. یکی از روش‌ها اندازه‌گیری دبی بوسیله ترازوی آزمایشگاهی می‌باشد. ترازوی استفاده شده دارای دقت ۰/۰۱ گرم بوده و مقدار بیشینه وزن قابل اندازه‌گیری توسط آن، ۳ کیلوگرم می‌باشد. بستر آزمایش (شامل محفظه الکترولیز و بابلر) روی کفه ترازو قرار داده شده و در بازه زمانی مشخص، مقدار تغییر وزن آب داخل محفظه اندازه‌گیری شده است.

روش دیگر اندازه‌گیری مقدار گاز تولیدی، استفاده از لوله گاز جمع‌کن می‌باشد. این روش که دبی حجمی گاز تولیدی را اندازه‌گیری می‌کند، توسط الکسابی نیز پیشنهاد شده است (۵۵). در این روش،

لوله خروجی از بابلر به محفظه گاز جمع کن متصل گردیده و گاز هیدروکسی تولیدی به لوله گاز جمع کن منتقل می گردد. محفظه گاز جمع کن شامل ظرفی پر از آب بوده که لوله گاز جمع کن (که قبلا پر از آب شده است) به طور عکس داخل آن قرار گرفته است. با ورود گاز هیدروکسی به داخل لوله گاز جمع کن، به دلیل ازدیاد حجم قسمت بالایی لوله، آب داخل لوله به محفظه گاز جمع کن تخلیه می گردد. مقدار تغییر ارتفاع آب اندازه گیری شده و بدین ترتیب حجم گاز هیدروکسی تولید شده در فرآیند الکترولیز اندازه گیری می شود.



شکل ۳-۶ شماتیک استفاده از روش سنجش دبی حجمی گاز تولیدی توسط الکترولایزر

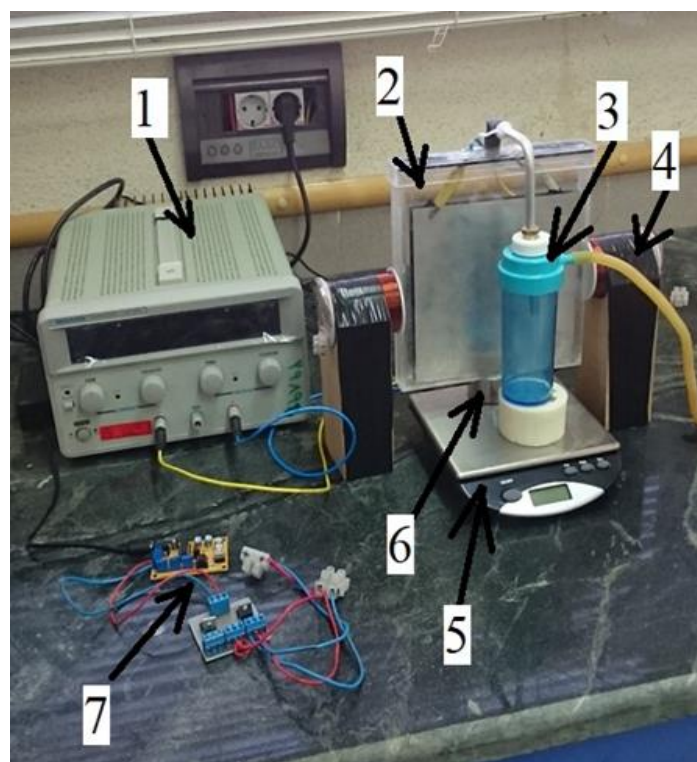


شکل ۳-۷ لوله گاز جمع کن مدرج استفاده شده در آزمایشها

۳-۴ آزمایش های سری دوم: تاثیر پارامترهای فیزیکی مختلف

بدین ترتیب سلول آزمایش برتر از لحاظ هندسه و فاصله، در آزمایشها سری اول تعیین گردید

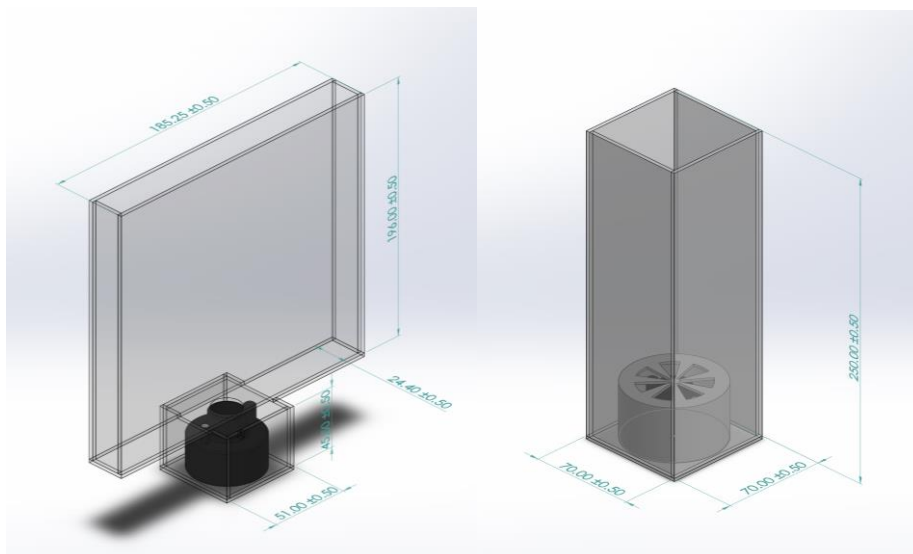
(توضیحات کامل در فصل بعد ارائه گردیده است). به منظور بررسی تاثیر پارامترهایی نظیر امواج آلتراسونیک، میدان مغناطیسی خارجی و جریان پالسی بر بازده الکترولیز در سلول ذکر شده، از ماژول‌ها و بردهای الکترونیکی مختلف استفاده گردید. ماژول‌های ذکر شده در محفظه الکترولیز همانند شکل ۳-۸ نصب گردیده‌اند. اجزای بستر تست آماده شده برای آزمایش‌های سری دوم شامل: ۱) منبع تغذیه DC، ۲) محفظه الکترولیز، ۳) بابلر، ۴) آهنربا، ۵) ترازوی آزمایشگاهی، ۶) ماژول آلتراسونیک، ۷) مدار تولید جریان پالسی.



شکل ۳-۸ بستر تست آماده شده برای آزمایش‌های سری دوم

۳-۴-۱ امواج آلتراسونیک

ماژول آلتراسونیک به کار گرفته شده در بستر تست، در واقع کیت دستگاه بخور سرد می‌باشد. این کیت در کف محفظه الکترولیز نصب گردیده و با انتشار جریان صوتی به سمت بالا، بر بازده الکترولیز و نرخ تولید حباب‌ها در نزدیکی سطح الکترودها تاثیر مستقیم می‌گذارد. مشخصات ماژول آلتراسونیک به کار گرفته شده در جدول ۳-۲ ارائه گردیده است.



(ب)

(الف)

شکل ۹-۳ محل نصب ماژول آلتراسونیک در الف) محفظه الکترولیز استوانه‌ای و ب) در محفظه الکترولیز صفحه‌ای



شکل ۱۰-۳ نصب ماژول آلتراسونیک در محفظه الکترولیز صفحه‌ای

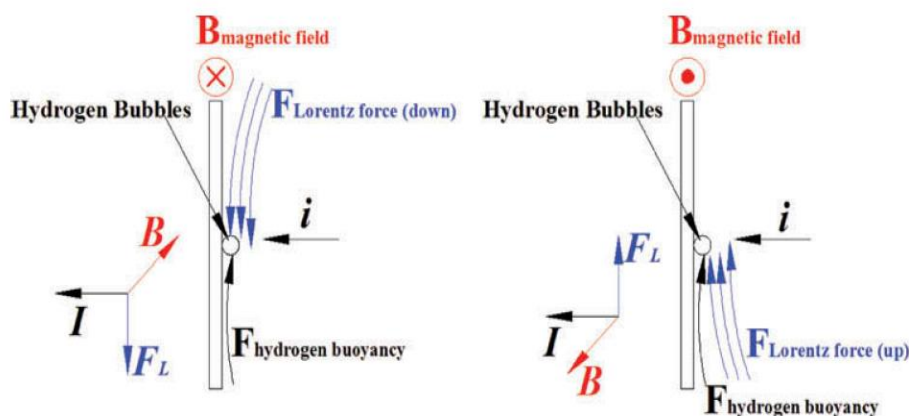
جدول ۳-۲. مشخصات فنی ماژول آلتراسونیک

پارامتر	واحد	مقدار
مدل		XQPA550-12
ابعاد	mm	۴۰*۴۵
فرکانس کاری	MHZ	۱/۷
دمای کاری	K	۲۷۴-۳۲۳
توان مصرفی	W	۲۰
قطر پیزوالکتریک	mm	۲۰

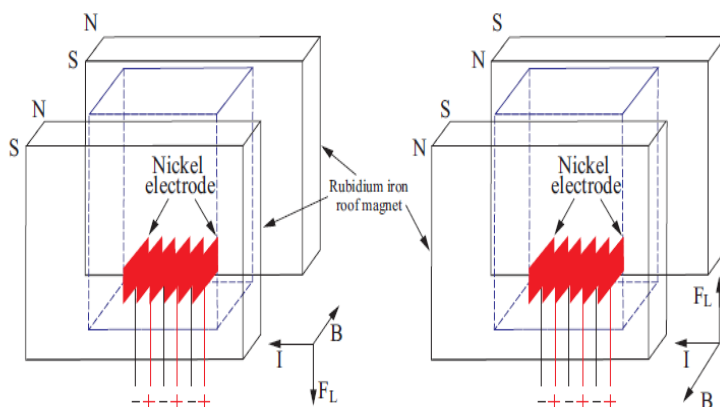
۳-۴-۲ میدان مغناطیسی دائم

آرایش و چیدمان آهنرباهای به کار گرفته شده در محفظه الکترولیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع، چیدمان قرارگیری قطب آهنرباها نسبت به الکترودهای کاتدیک و آندیک، تعیین کننده جهت اعمال نیروی لورنتز^۱ به حباب‌های تولیدی می‌باشد [۳۹]. در حالت بهینه، نیروی لورنتز باید به سمت بالا باشد (شکل ۳-۱۱). در زمانی که نیروی شناوری به سمت بالا به حباب هیدروژن اعمال می‌گردد، اگر نیروی لورنتز نیز هم جهت با آن باشد، حباب با سرعت بیشتری به سمت سطح آب حرکت کرده و توده حباب‌های تشکیل شده روی الکتروود کاهش می‌یابد. در نتیجه کاهش این توده، مقاومت الکتریکی سلول کاهش یافته و بازده الکترولیز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب آرایش شکل ۳-۱۲ سمت راست، انتخاب گردید.

^۱ Lorentz force

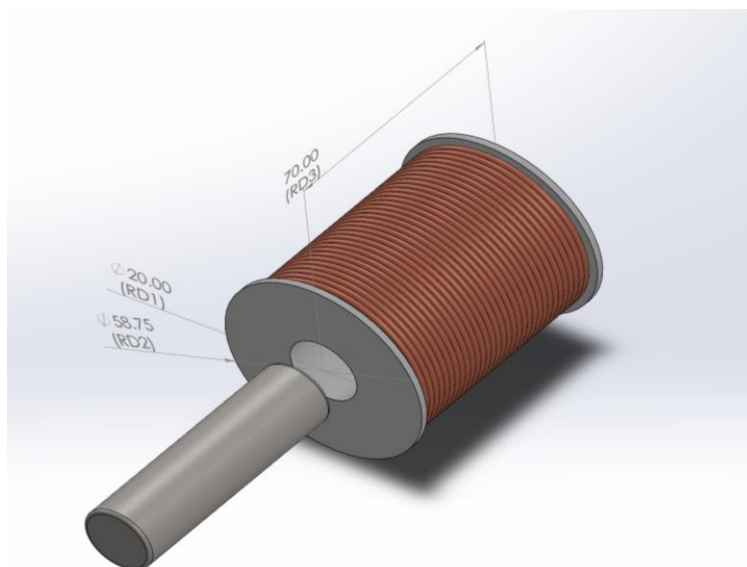


شکل ۳-۱۱ نیروهای وارد شده به حباب‌های هیدروژن تولیدی [۳۹]

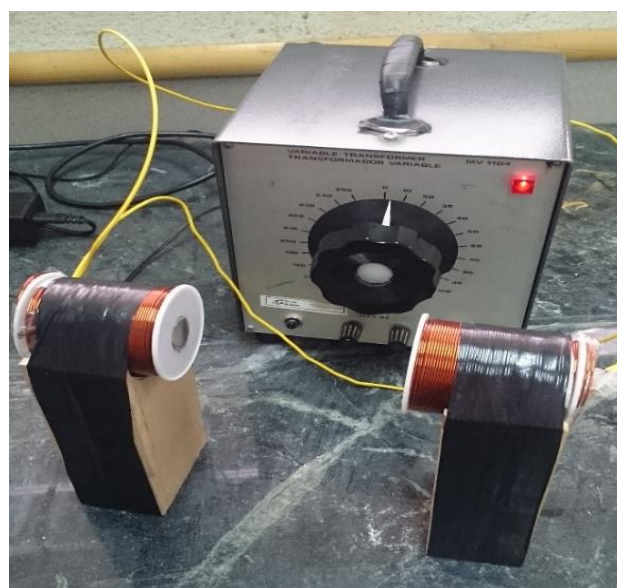


شکل ۳-۱۲ تغییر جهت نیروی لورنتز با تغییر آرایش قطب‌های آهنرباها [۳۹]

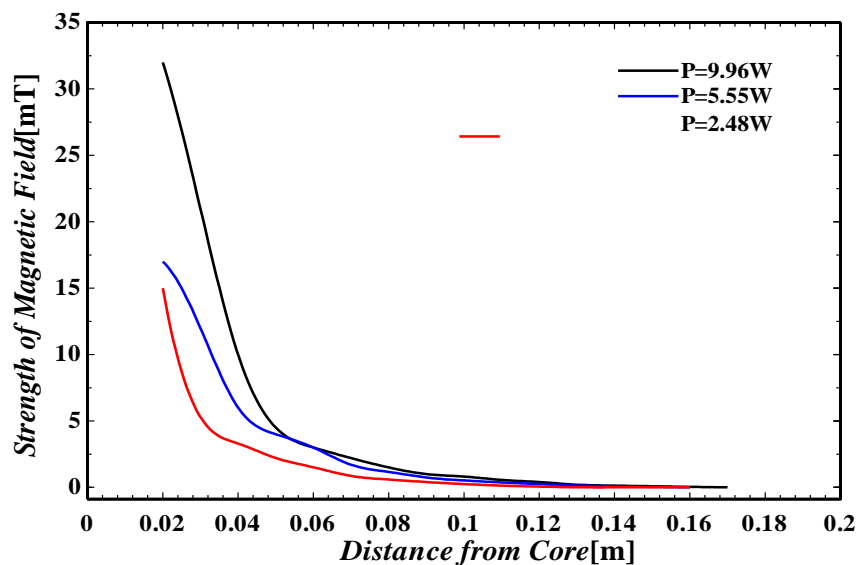
در آزمایشها از دو آهنربای الکتریکی جهت ارزیابی مصرف انرژی آهنربا استفاده گردید. این آهنرباها از هسته‌ی استوانه‌ای آهنی و سیم پیچ‌های مسی ساخته شده است (مطابق شکل ۳-۱۲). قدرت میدان مغناطیسی تولید شده توسط آهنرباها با اعمال توان‌های مختلف توسط دستگاه تسلا متر اندازه‌گیری شده و در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. مشخصات فنی آهنرباهای ساخته شده در جدول ۳-۳ ارائه گردیده است. میدان تولیدی توسط آهنرباها، میدان DC می‌باشد. عمق نفوذ آهنربای بکار گرفته شده حدود ۵ سانتی‌متر در حالت بدون بار می‌باشد. علت انتخاب آهنربا با این مشخصات، بازه مصرف انرژی آهنربا می‌باشد که مجموع آن حدود ۲۰ وات برآورد شده است.



شکل ۳-۱۳ ابعاد آهنربای طراحی شده



شکل ۳-۱۴ پایه‌ها و منبع تغذیه و آهنرباهای ساخته شده برای آزمایشها سری دوم



شکل ۳-۱۵ قدرت میدان مغناطیسی تولیدی توسط آهنربای ساخته شده در فواصل مختلف از هسته آهنربا و اعمال

توان‌های مختلف

جدول ۳-۳. مشخصات فنی آهنربا

پارامتر	واحد	مقدار
جنس سیم پیچ		مس
جنس هسته		آهن
تعداد دور سیم پیچ		۶۰۰
ماکزیموم ولتاژ	V	۴
ماکزیموم قدرت میدان مغناطیسی	mT	۳۲



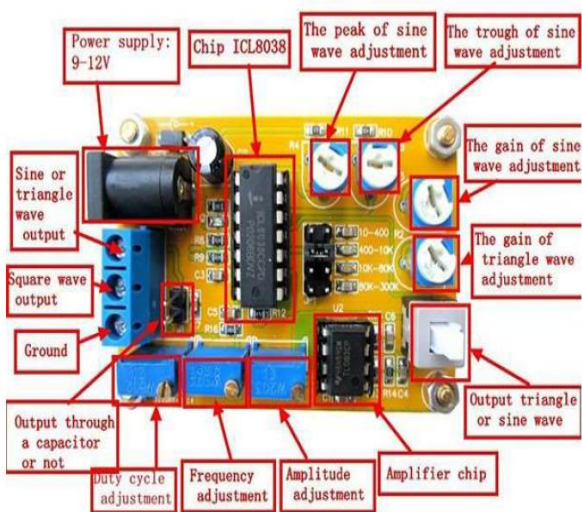
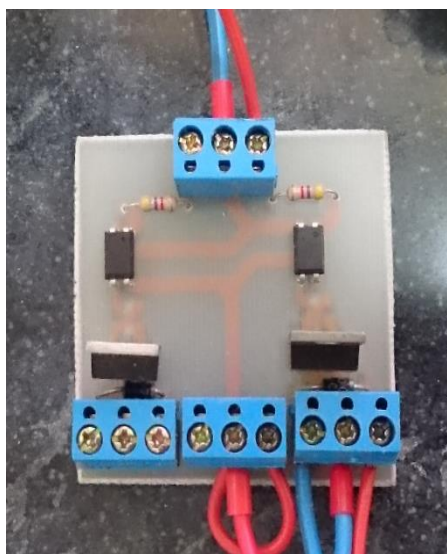
شکل ۳-۱۶ دستگاه تسلامتر مورد استفاده در آزمایش

به منظور اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی تولیدی توسط آهنربا، از دستگاه تسلامتر مدل MG-701 استفاده گردیده است. این دستگاه دارای دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌تسلا می‌باشد.

۳-۴-۳ اثر جریان پالسی

به منظور تولید جریان پالسی، از ماژول تولید سیگنال استفاده گردیده است. این ماژول، سیگنال‌های مربعی با فرکانس و سیکل کاری متفاوت تولید می‌کند. سیگنال تولیدی توسط ماژول، به وسیله ماژول تقویت کننده که به منبع تغذیه متصل است، تقویت شده و به سلول منتقل می‌گردد. بر طبق آزمایشها انجام شده تاکنون [۴۰، ۴۶، ۴۸، ۶۳]، جریان پالسی مربعی با سیکل وظیفه ۱۰ درصد، بالاترین بازده الکترولیز را در سلول مورد نظر ایجاد خواهد کرد. لذا، در ابتدا مقدار سیکل کاری پالس تولیدی توسط ماژول، در ۱۰ درصد تنظیم گردید. بدین ترتیب، جریان DC تولید شده توسط منبع تغذیه به جریان DC پالسی مربعی تبدیل می‌گردد. مشخصات ماژول تولید سیگنال پالسی استفاده شده در آزمایشها در جدول ۴-۴ ارائه گردیده است. جهت نمایش شکل موج تولید شده توسط ماژول تولید سیگنال و تنظیم سیکل کاری آن از اسیلوسکوپ^۱ آنالوگ مدل GOS-602 استفاده گردید.

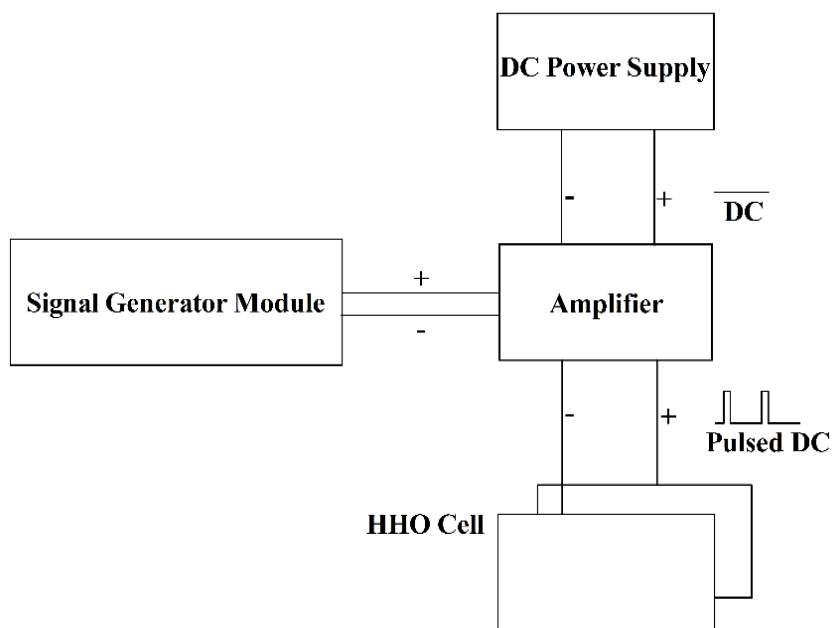
^۱ Oscilloscope



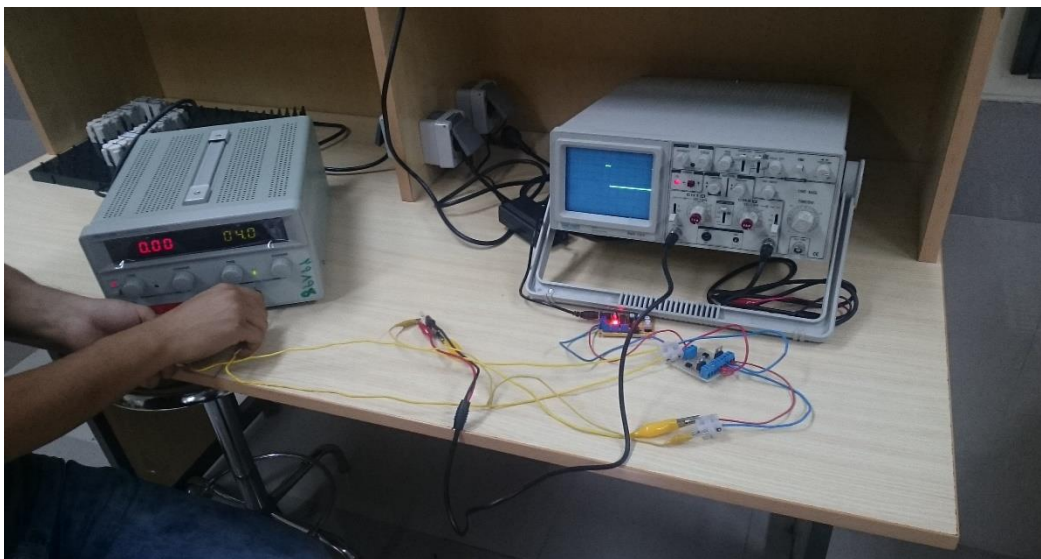
(ب)

(الف)

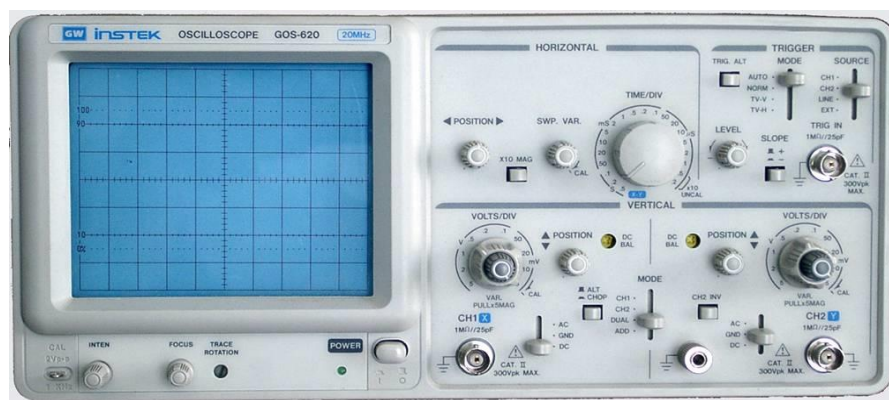
شکل ۱۷-۳ الف) ماژول تولید سیگنال و ب) ماژول تقویت کننده استفاده شده در آزمایشها



شکل ۱۸-۳ شماتیک مدار الکتریکی سیستم تولید جریان پالسی



شکل ۳-۱۹ آزمایش و تنظیم مدار تولید جریان پالسی توسط اسیلوسکوپ



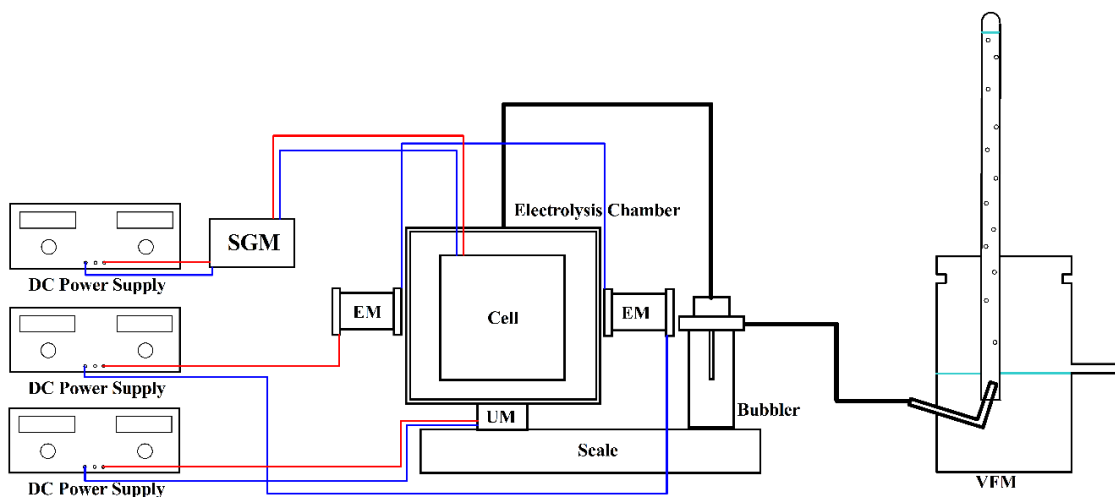
شکل ۳-۲۰ دستگاه اسیلوسکوپ مدل GOS-602

جدول ۳-۴. مشخصات ماژول تولید جریان پالسی

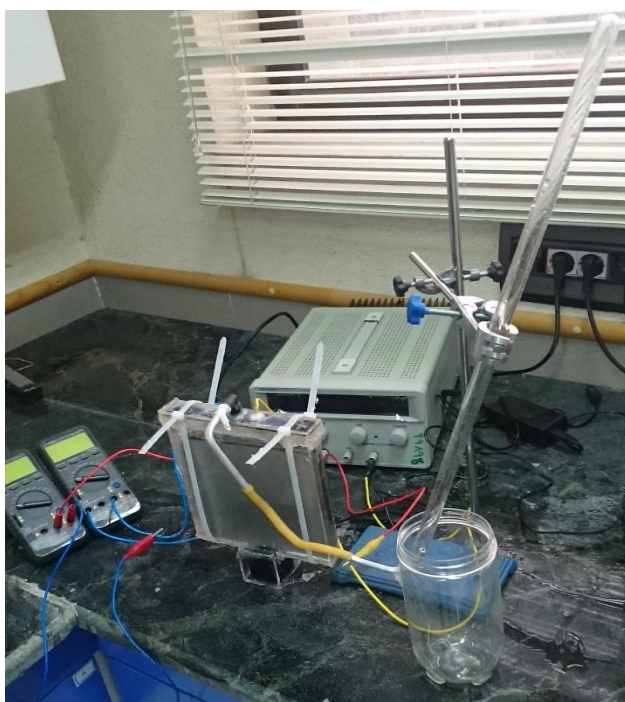
پارامتر	واحد	مقدار
بازه فرکانس جریان پالسی تولیدی	Hz	۱۰ تا ۳۰۰۰۰۰
بازه سیکل کاری جریان پالسی تولیدی	%	۲ تا ۹۸
ولتاژ تغذیه برد	V	۱۲ تا ۲۴

۳-۵ شکل نهایی بستر آزمایش

در نتیجه بستر آزمایش سلول آماده گردیده و مقادیر گاز تولیدی توسط سلول با اعمال توان‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در کل زمان انجام آزمایش‌ها، دمای محیط آزمایشگاه در بازه ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط تقریباً برابر ۰/۹۸ بار اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳-۲۱ شماتیک بستر آزمایش آماده شده



شکل ۳-۲۲ بستر آزمایش آماده شده در آزمایشگاه

فصل ۴ : نتایج آزمایش ها

۱-۴ روابط به کار گرفته شده در تحلیل

به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف انرژی، روابط زیر مورد استفاده قرار گرفته است [۵۳-۵۱]:

$$Power\ Density = \frac{V \times I \times DU}{A_{Cathod}} \quad (۱-۴)$$

که در رابطه بالا V, I و DU به ترتیب بیان گر ولتاژ، جریان اعمالی و سیکل کاری^۱ پالس تولیدی می باشند و A_{Cathod} نیز سطح الکتروود کاتدیک است. این پارامتر نشان دهنده حداکثر میزان اعمال توان به ۱ متر مربع از سلول می باشد. هرچه میزان این پارامتر کمتر باشد، به ازای سطح کمتر سلول، هیدروکسی بیشتری تولید شده و صرفه اقتصادی الکترولایزر افزایش می یابد.

$$Energy\ Efficiency = \frac{\dot{m}_H \times LHV_H}{V \times I \times DU + E_{AUX}} \quad (۲-۴)$$

$$Energy\ Intensity = \frac{V \times I \times DU + E_{AUX}}{\dot{V}_{HHO}} \quad (۳-۴)$$

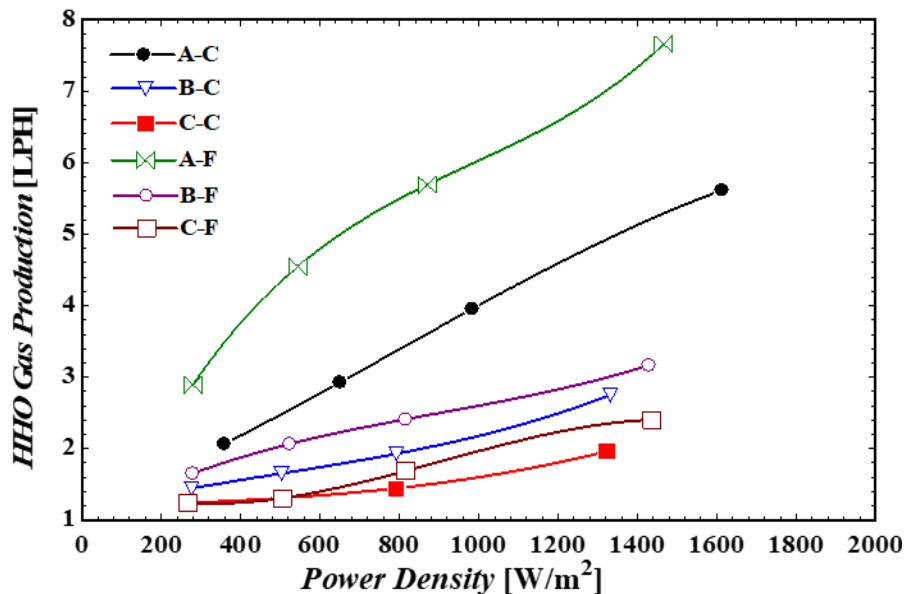
$$Surface\ Intensity = \frac{A_{Cathod}}{\dot{V}_{HHO}} \quad (۴-۴)$$

$\dot{m}_H, LHV_H, \dot{V}_{HHO}$ و E_{AUX} نیز به ترتیب دبی هیدروژن، ارزش حرارتی پایینی هیدروژن، دبی حجمی گاز هیدروکسی و مصرف داخلی ماژول های مورد استفاده می باشند. بازده الکترولیز همان بازده انرژی می باشد که در رابطه (۲-۴) ارائه گردیده است. پارامترهای شدت انرژی و سطح که بیانگر میزان انرژی مصرفی و سطح مورد نیاز به ازای هر واحد نرخ تولید گاز هیدروکسی می باشند، به ترتیب در روابط (۳-۴) و (۴-۴) نمایان گردیده اند.

^۱ Duty cycle

۲-۴ نتایج آزمایش‌های سری اول

در ابتدا، غلظت KOH در محفظه الکترولیز به کمترین میزان ممکن (۵ درصد وزنی آب) جهت چشم پوشی از اثرات KOH بر بازده الکترولیز، تنظیم گردید. سپس آزمایش‌های سری اول جهت تعیین فاصله الکترودها و هندسه الکترودها در حالت بهینه انجام گرفت. براین اساس، سلول‌های آماده شده برای آزمایش که در جدول ۳-۱ فصل قبل ارائه گردیده است، در داخل محفظه الکترولیز قرار گرفته و جریان DC توسط منبع تغذیه به آنها اعمال گردید. در انتها نرخ تولید گاز هیدروکسی در دانسیته‌های جریانی و توانی متفاوت توسط دبی سنج‌ها اندازه‌گیری گردید.



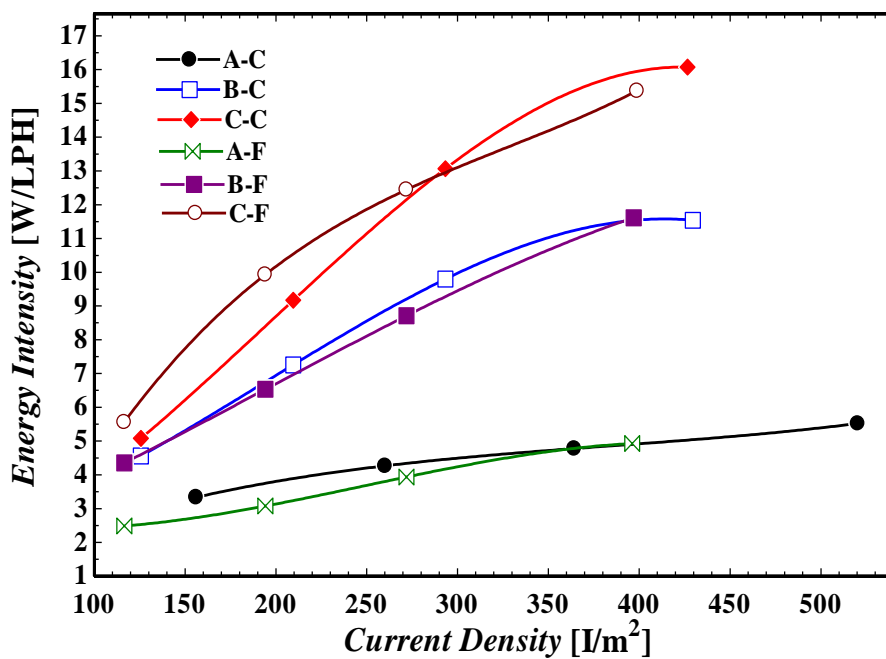
شکل ۱-۴ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط هر سلول آزمایش در دانسیته‌های توانی مختلف

شکل ۱-۴ نشان دهنده نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط هر سلول آزمایش در دانسیته‌های توانی مختلف می‌باشد. با مراجعه به شکل ۱-۴ می‌توان بدین نتیجه رسید که نرخ تولید گاز هیدروکسی با کاهش فاصله بین الکترودها، افزایش یافته است. بنابراین فاصله بین الکترودها و کاتد پارامتری بسیار تاثیر گذار بر نرخ تولید گاز توسط سلول می‌باشد. همچنین به وضوح دیده می‌شود که نرخ تولید گاز هیدروکسی الکترودهای صفحه‌ای در دانسیته توانی یکسان، بیشتر از الکترودهای استوانه‌ای می‌باشد.

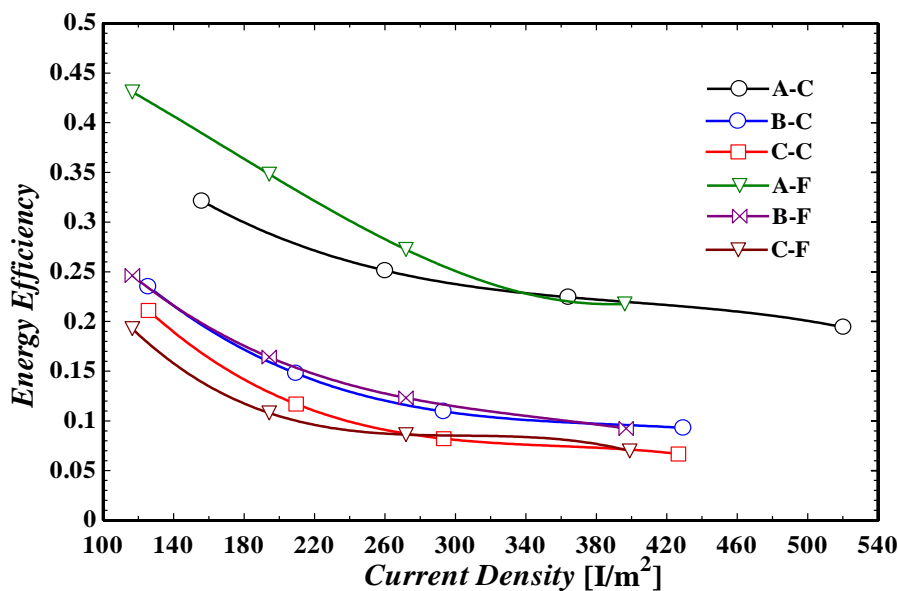
یکی از علل افزایش بازده الکترولیز با کاهش فاصله بین الکترودها، کاهش مقاومت الکتریکی سلول بوده که در نتیجه باعث افزایش جریان الکتریکی شده است. بدین ترتیب، از بین سلول‌های آزمایش، سلول صفحه‌ای که الکترودهای آن به اندازه ۲ میلی‌متر از هم فاصله دارند (سلول A-F)، بیشترین مقدار تولید گاز هیدروکسی را در میان سلول‌های دیگر، در دانسیته‌های توانی متفاوت دارا می‌باشد.

شدت مصرف انرژی هر سلول آزمایش در دانسیته‌های جریانی متفاوت توسط شکل ۴-۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله بین الکترودها، شدت مصرف انرژی سلول افزایش داشته است. همچنین شدت مصرف انرژی سلول A-F، که بیشترین نرخ تولید گاز را دارا می‌باشد، از ۲/۵ وات بر لیتر بر ساعت به ۴ وات بر لیتر بر ساعت در بازه دانسیته جریانی ۱۰۰ تا ۴۰۰ آمپر بر متر مربع، افزایش داشته است. به‌علاوه، با توجه به شکل ۴-۲ می‌توان به این نکته اشاره کرد که شدت مصرف انرژی سلول‌های آزمایش چندان به هندسه آنها حساس نیست.

بازده انرژی هر سلول آزمایش در دانسیته‌های جریانی مختلف در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. بر طبق نمودارهای ارائه شده در این شکل، بازده انرژی با دانسیته جریان رابطه عکس دارد. بالاترین میزان بازده انرژی نیز متعلق به سلول نوع A-F بوده که مقدار آن از ۰/۴۴ به ۰/۲ با افزایش دانسیته جریانی تا ۴۰۰ آمپر بر مترمربع، کاهش داشته است. همچنین می‌توان از شکل ۴-۳ دریافت که بازده انرژی همانند شدت انرژی، حساسیت چندان به هندسه سلول ندارد.



شکل ۲-۴ شدت انرژی هر سلول آزمایش در دانسیته‌های جریان مختلف



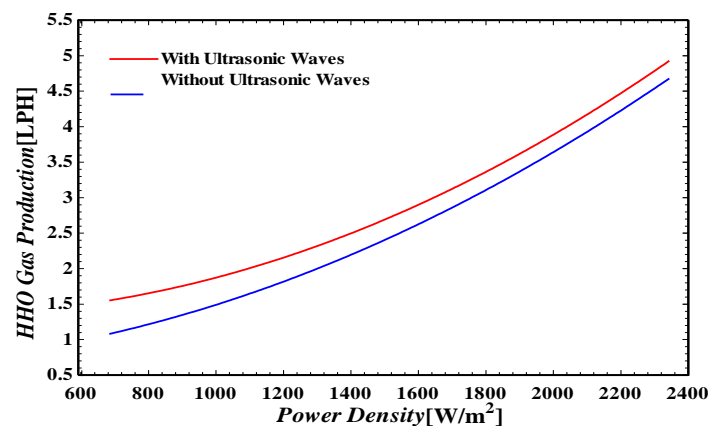
شکل ۳-۴ بازده انرژی هر سلول آزمایش در دانسیته‌های جریان مختلف

در نتیجه سلول نوع A-F به عنوان بهترین نوع سلول بدلیل عملکردی بهتر در میان بقیه سلول‌ها انتخاب گردید. پس از انتخاب بهترین سلول از لحاظ هندسه و فاصله بین الکترودها، برای انجام

آزمایش‌های سری دوم، غلظت KOH در محلول الکترولیت به مقدار بهینه (۲۵ درصد وزنی) افزایش یافته است [۶۴].

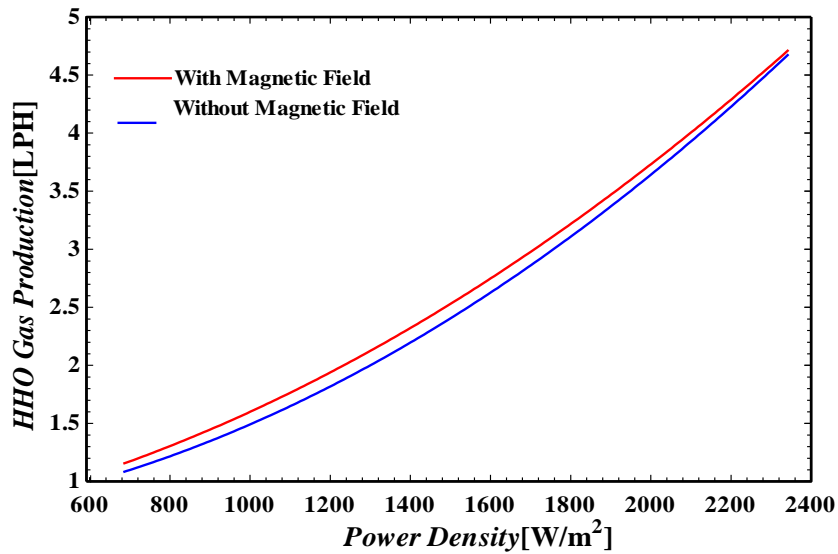
۳-۴ نتایج آزمایش‌های سری دوم

تاثیر روش‌های مختلف نظیر امواج آلتراسونیک، میدان مغناطیسی و جریان پالسی بر بازده تولید گاز سلول در آزمایش‌های سری دوم مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا اثر امواج آلتراسونیک در محفظه الکترولیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴-۴، نشان دهنده نرخ گاز هیدروکسی تولیدی توسط سلول A-F در زمان اعمال امواج آلتراسونیک، در دانسیته‌های توانی متفاوت می‌باشد. کاربرد ماژول آلتراسونیک در محفظه الکترولیز باعث افزایش نرخ تولید گاز سلول از ۶/۴ درصد (در دانسیته جریانی بالا) تا ۵۲/۴ درصد (در دانسیته جریانی کم) شده است. این افزایش نرخ تولید، بدلیل افزایش سرعت انتقال حباب‌های تشکیل شده در نوحی نزدیک الکترودها به سطح آب داخل الکترولیزر می‌باشد. مقدار اثر گذاری میدان مغناطیسی خارجی بر نرخ تولید گاز هیدروکسی در سلول توسط شکل ۴-۵ نشان داده شده است. با مراجعه به این شکل می‌توان دریافت که به کارگیری میدان مغناطیسی در فرآیند الکترولیز باعث افزایش نرخ تولید گاز هیدروکسی تا ۸ درصد خواهد شد. بدین ترتیب تاثیر امواج آلتراسونیک بر نرخ تولید گاز توسط سلول بیشتر از میدان مغناطیسی خارجی می‌باشد.

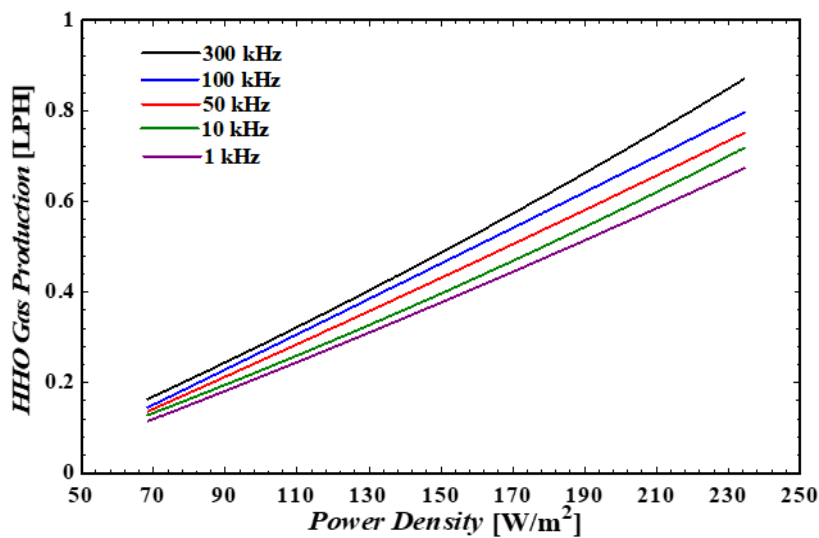


شکل ۴-۴ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط سلول A-F با اعمال و بدون اعمال امواج آلتراسونیک در دانسیته‌های

توانی مختلف



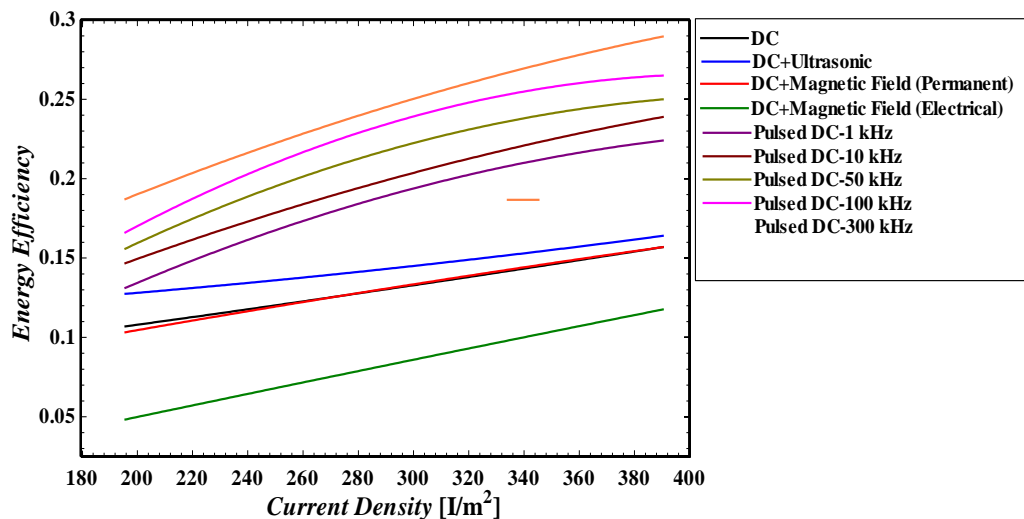
شکل ۴-۵ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط سلول A-F با اعمال و بدون اعمال میدان مغناطیسی در دانسیته‌های توانی مختلف



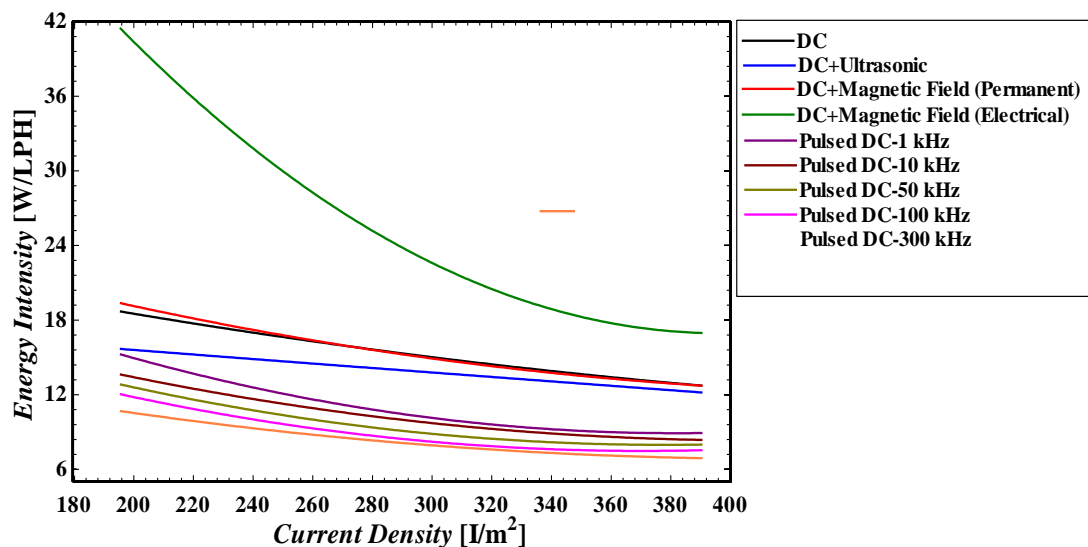
شکل ۴-۶ نرخ تولید گاز هیدروکسی توسط سلول A-F با به کارگیری جریان پالسی در فرکانس‌های متفاوت در دانسیته‌های توانی مختلف

نرخ تولید گاز هیدروکسی در حالت به کارگیری جریان پالسی با فرکانس‌های مختلف در دانسیته‌های توانی متفاوت در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. در طی آزمایش‌ها، مقدار سیکل کاری جریان پالسی

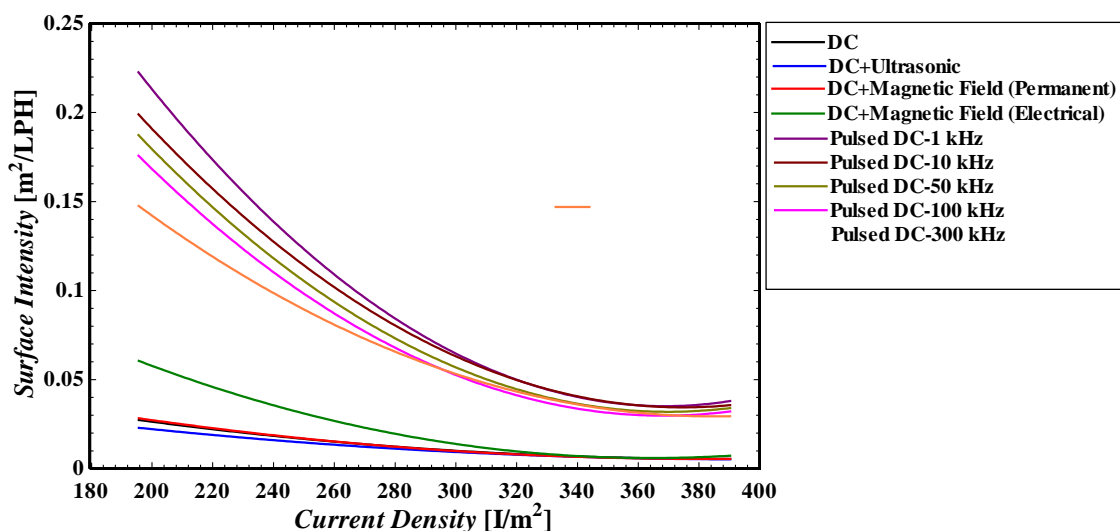
اعمالی برابر ۱۰ درصد (که برابر مقدار بهینه می‌باشد [۴۰]) تنظیم شده است. نمودارهای موجود در شکل ۴-۶ نشان دهنده این است که پالس‌های با فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز در دانسیته‌های توانی مشخص، گاز هیدروکسی بیشتری تولید خواهد کرد. این امر بدلیل کاهش تعداد حباب‌های تولیدی در اطراف الکترودها می‌باشد که باعث کاهش مقاومت الکتریکی سلول‌ها خواهد شد. اما باید به این نکته اشاره کرد که بدلیل به کار بردن روش پالسی، بازه دانسیته توانی سلول (بیشینه و کمینه توان اعمالی به سطح مشخص از سلول) در مقایسه با میدان مغناطیسی و امواج آلتراسونیک، کاهش یافته است. این امر باعث اضافه شدن یک باطری به سیستم تولید گاز هیدروکسی شده که یکی از معایب این روش به حساب می‌آید.



شکل ۴-۷ بازده انرژی سلول در دانسیته‌های جریانی مختلف با به کارگیری روش‌های به سازی متفاوت



شکل ۴-۸ شدت انرژی سلول در دانسیته‌های جریانی مختلف با به‌کارگیری روش‌های به‌سازی متفاوت



شکل ۴-۹ سطح ویژه سلول در دانسیته‌های جریانی مختلف با به‌کارگیری روش‌های به‌سازی متفاوت

تغییرات بازده انرژی، شدت مصرف انرژی و سطح ویژه سلول با به‌کارگیری روش‌های به‌سازی مختلف در دانسیته‌های جریانی متفاوت محاسبه گردیده و به ترتیب در شکل‌های ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ نشان داده شده است. برحسب نتایج بدست آمده، جریان پالسی با فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز بیشترین بازده انرژی و کمترین میزان شدت انرژی را در مقایسه با دیگر روش‌ها به خود اختصاص داده است. همچنین کمترین میزان سطح ویژه نیز به آن اختصاص داده شده که نشان دهنده این است که استفاده از این سلول باعث

افزایش سطح الکترودهای سلول شده که در نهایت ممکن است باعث ایجاد مشکلات اقتصادی در برخی سیستم‌ها شود. روش امواج آلتراسونیک، در جایگاه بعد از روش پالسی از لحاظ بازده انرژی قرار گرفته است. این روش کمترین میزان سطح ویژه را در مقایسه با دیگر روش‌ها به خود اختصاص داده است. همچنین این روش دارای مقادیر متوسط شدت انرژی در بازه ۱۲ تا ۱۶ وات بر لیتر بر ساعت را دارا می‌باشد. استفاده از آهنرباهای دائم در فرآیند الکترولیز باعث افزایش ناچیز بازده انرژی سلول گردیده است. در حالی که کاربرد آهنرباهای الکتریکی (مصرف کننده توان) باعث کاهش بازده انرژی سلول گردیده است. در نتیجه، استفاده از آهنرباهای مصرف کننده انرژی (دارای سیم پیچ متصل به منبع تغذیه) در الکترولیزر تولید کننده گاز هیدروکسی پیشنهاد نمی‌گردد. همچنین روش آهنرباهای الکتریکی بیشترین مقدار شدت انرژی سلول، کمترین مقدار سطح ویژه را در مقایسه با دیگر روش‌ها (بجز روش پالسی) به خود اختصاص داده‌اند.

در نتیجه، کاربرد روش امواج آلتراسونیک باعث رسیدن به کمترین میزان سطح ویژه الکترولیزرهای تولید کننده گاز هیدروکسی می‌گردد. از طرفی دیگر، روش پالسی باعث دستیابی به بیشترین بازده انرژی الکترولیزر در مقایسه با دیگر روش‌ها خواهد شد. اما این روش دارای یک ایراد اساسی بوده و آن مقدار کم دانسیته انرژی آن می‌باشد که باعث ایجاد مشکلات اقتصادی در برخی سیستم‌ها خواهد شد. دلیل اصلی مشکل اقتصادی ایجاد شده، نیاز به سطح بیشتر الکتروود و در نتیجه گرانتر شدن قیمت الکترولیزر در حالت به کارگیری روش پالسی می‌باشد.

جدول ۴-۱. مقدار انرژی مصرفی و سطح مورد نیاز الکترودها و تغییرات آنها با به‌کارگیری روش‌های مختلف

روش‌ها	مصرف انرژی [W]	تغییرات مصرف انرژی نسبت به روش معمولی [%]	سطح الکتروده مورد نیاز [m ²]	تغییرات سطح الکتروده مورد نیاز نسبت به روش معمولی [%]
معمولی	۱۲/۷۲	۰	۰/۰۰۵۴۲۸	۰
آهنرباهای الکتریکی	۱۶/۹۶	۳۳/۳۳	۰/۰۰۷۲۳۸	۳۳/۳۵
آهنرباهای دائم	۱۲/۶۸	-۰/۳۱	۰/۰۰۵۳۲	-۱/۹۸۹
ماژول آلتراسونیک	۱۲/۱۷	-۴/۳۲	۰/۰۰۵۱۵۴	-۵/۰۴۷
جریان پالسی (300kHz)	۶/۸۹۴	-۴۵/۸	۰/۰۲۹۴۲	۴۴۲
جریان پالسی (100kHz)	۷/۵۳۷	-۴۰/۷۵	۰/۰۳۲۱۶	۴۹۲/۴۸
جریان پالسی (50kHz)	۷/۹۸۹	-۳۷/۱۹	۰/۰۳۴۰۹	۵۲۸/۰۳۹
جریان پالسی (10kHz)	۸/۳۵۷	-۳۴/۳	۰/۰۳۵۶۶	۵۵۶/۹۶
جریان پالسی (1kHz)	۸/۹۱۳	-۲۹/۹۲	۰/۰۳۸۰۳	۶۰۰/۶۳

جدول ۴-۱ نشان دهنده میزان توان سطح مورد نیاز الکترولایزر با به‌کارگیری روش‌های مختلف و تغییرات آنها نسبت به حالت معمولی (الکترولیز ساده)، برای تولید یک لیتر بر ساعت گاز هیدروکسی در دانسیته جریانی ۳۹۰ آمپر بر مترمربع (بیشترین دانسیته جریانی اعمالی توسط منبع تغذیه) می‌باشد. همانطور که در جدول مشخص است، آهنرباهای الکتریکی باعث افزایش توان مصرفی و سطح الکترودها

شده و استفاده از آن‌ها به عنوان روش بهسازی در الکترولايزر پیشنهاد نمی‌گردد. همچنین، آهنرباهای دائم کاهش ناچیزی در میزان مصرف توان سلول ایجاد کرده‌اند. امواج آلتراسونیک باعث کاهش ۴/۳۲ درصدی توان مصرفی و کاهش حدود ۵ درصدی سطح الکترودهای الکترولايزر شده‌اند. کمترین مقدار توان مصرفی را روش پالسی با فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز دارا می‌باشد. به‌طور کلی روش پالسی باعث افزایش سطح الکتروود مورد نیاز سلول در مقایسه با روش‌های دیگر شده است. براساس اطلاعات ارائه شده در جدول، با افزایش فرکانس پالس‌های اعمالی، میزان سطح مورد نیاز سلول و مصرف توان آن کاهش یافته است. نتایج نشان‌دهنده این است توان مصرفی و سطح مورد نیاز کمینه در فرکانس‌های بالاتر از ۳۰۰ کیلوهرتز قابل دستیابی می‌باشد.

فصل ۵ : ارزیابی به کارگیری اکترو لایزر گاز

هیدروکسی در موتور احتراق داخلی

۱-۵ ارزیابی عملی تزریق گاز هیدروکسی در موتور احتراق داخلی

در این بخش نتایج بکارگیری یک الکترولایزر ۶ سلولی نوع DC (که در آزمایش‌های پیشین نویسنده مورد استفاده قرار گرفته و در آزمایشگاه موجود بوده است) در موتور احتراق داخلی ارایه گردیده است. هدف از این بخش نشان دادن اثر بخشی تزریق گاز هیدروکسی در آلایندگی موتور به خصوص در دور آرام بوده است. این الکترولایزر قابلیت تولید گاز هیدروکسی با نرخ ۰/۱۲۶ لیتر بر دقیقه گاز هیدروکسی را داشته که برای تزریق در حالت دور آرام، مناسب می‌باشد. سپس، گاز هیدروکسی تولیدی مستقیماً در مانیفولد گاز موتور سمند EF7 تزریق گردیده و تاثیر آن بر مقدار مونوکسید کربن تولیدی توسط موتور بررسی گردید.

به منظور اندازه‌گیری آلاینده‌های تولیدی توسط موتور، از دستگاه تست گاز مدل Testo310 استفاده گردیده است (شکل ۵-۳). در زمان آزمایش، موتور در حالت درجا (دور آرام) بوده و تزریق انجام گرفت. آزمایش تزریق و اندازه‌گیری مقادیر آلاینده‌ها سه بار تکرار شد. در مرحله تزریق و تست پاشش، ابتدا آلاینده‌های تولیدی توسط موتور ثبت گردیده و پس از اعمال ولتاژ و جریان به الکترولایزر و پاشش گاز در مانیفولد هوای ورودی موتور، دوباره مقدار تولید آلاینده مونوکسید کربن اندازه‌گیری و ثبت شده است.



شکل ۱-۵ الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی به همراه تجهیزات جانبی



شکل ۲-۵ محل قرار گیری شیلنگ خروجی الکترولایزر در منیفولد هوای موتور



شکل ۳-۵ دستگاه تست گاز تستو مدل ۳۱۰

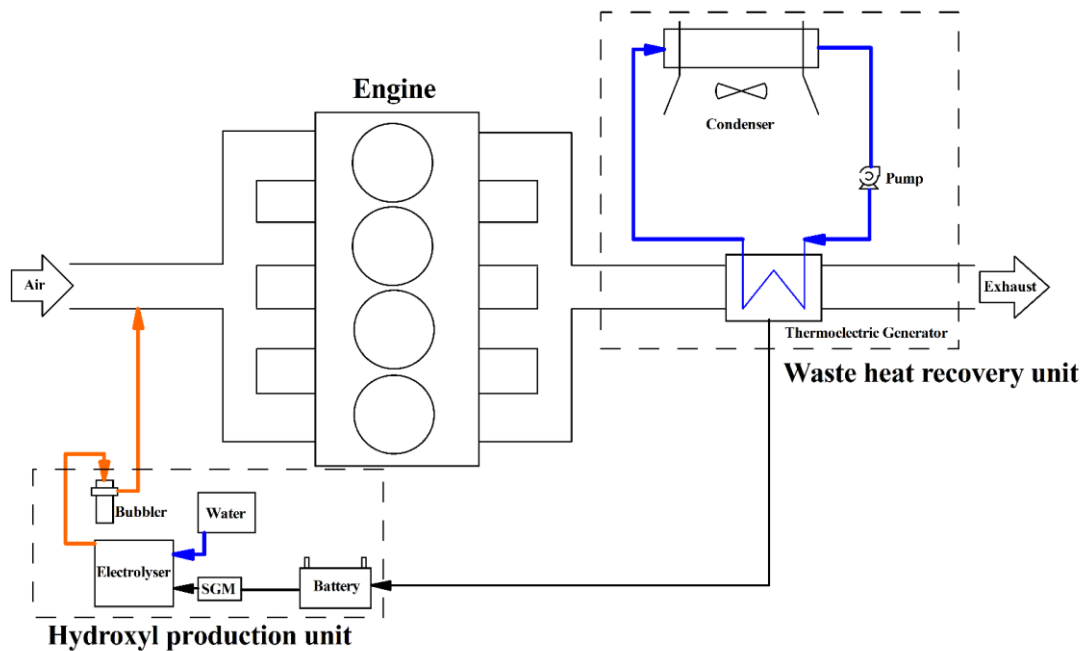
براساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها که در جدول ۱-۵ ارائه گردیده است، با پاشش گاز هیدروکسی در حالت دور آرام موتور، نرخ تولید گاز مونوکسید کربن حدود ۹۷ درصد کاهش داشته است که این پدیده نشان دهنده موثر بودن گاز هیدروکسی در اصلاح فرآیند احتراق می‌باشد.

جدول ۵-۱. مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه تست گاز

مشخصه	قبل از پاشش	بعد از پاشش
گاز مونوکسید کربن (ppm)	۲۳۰۳	۵۲
گاز دی اکسید کربن (%)	۱۳/۹۵	۱۴/۳۹
اکسیژن (%)	۲/۱	۱/۵
هوای اضافی (%)	۱۱/۱	۷/۶

۵-۲ طراحی سیستم تامین انرژی الکترولایزر توسط مبدل ترموالکتریک

همانطور که در فصل های قبل اشاره گردید تامین انرژی الکترولایزر جهت بکارگیری در خودرو مساله مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی، مصرف کننده انرژی می‌باشد. از طرفی، تامین انرژی الکترولایزر به وسیله باطری اصلی موتور ممکن است باعث اختلال در شبکه برقی خودرو گردد. لذا در این بخش پتانسیل موجود در موتور به منظور بازیافت انرژی تلفاتی آن بوسیله مبدل ترموالکتریک جهت تغذیه انرژی مورد نیاز الکترولایزر مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴-۵) نشان دهنده تمامی اجزای سیستم ترکیبی تولید و تزریق گاز هیدروکسی در یک موتور به همراه سیستم تامین انرژی با استفاده از ترموالکتریک می‌باشد.



شکل ۴-۵ بلوک دیاگرام اجزای سیستم ترکیبی تولید و تزریق گاز هیدروکسی

یک سیستم بازیافت انرژی برای موتور به منظور تامین انرژی مصرفی الکترولایزر طراحی گردید. مطابق شکل ۴-۵، انرژی گرمایی دود آگزوز موتور توسط مبدل ترموالکتریک نصب شده در مسیر لوله-های آگزوز تبدیل به انرژی الکتریکی می‌گردد. این انرژی الکتریکی به باتری سیستم تزریق آنی هیدروکسی منتقل شده و در زمان نیاز، توسط الکترولایزر مصرف می‌شود.

استفاده از مبدل ترموالکتریک به عنوان سیستم بازیافت انرژی، به دلیل وزن کم، تجهیزات جانبی کمتر نسبت به سیستم‌های مشابه، سادگی و ایجاد فشار برگشتی کمتر انتخاب گردید. استفاده از مبدل‌های ترموالکتریک در آگزوز خودروهای سواری به منظور بازیافت انرژی برای تامین انرژی تجهیزات جانبی موتور توسط شرکتهای خودروسازی مطرح دنیا ارائه و استفاده شده است [۶۲-۵۹]. به منظور شبیه‌سازی مبدل ترموالکتریک، ابتدا باید دبی و دمای دود آگزوز در محل نصب آن تعیین گردد. به این ترتیب ابتدا مدلسازی موتور EF7 به منظور محاسبه پارامترهای خواسته شده برای شبیه‌سازی سیستم بازیافت، انجام گرفته است.

۵-۲-۱ مدل‌سازی موتور

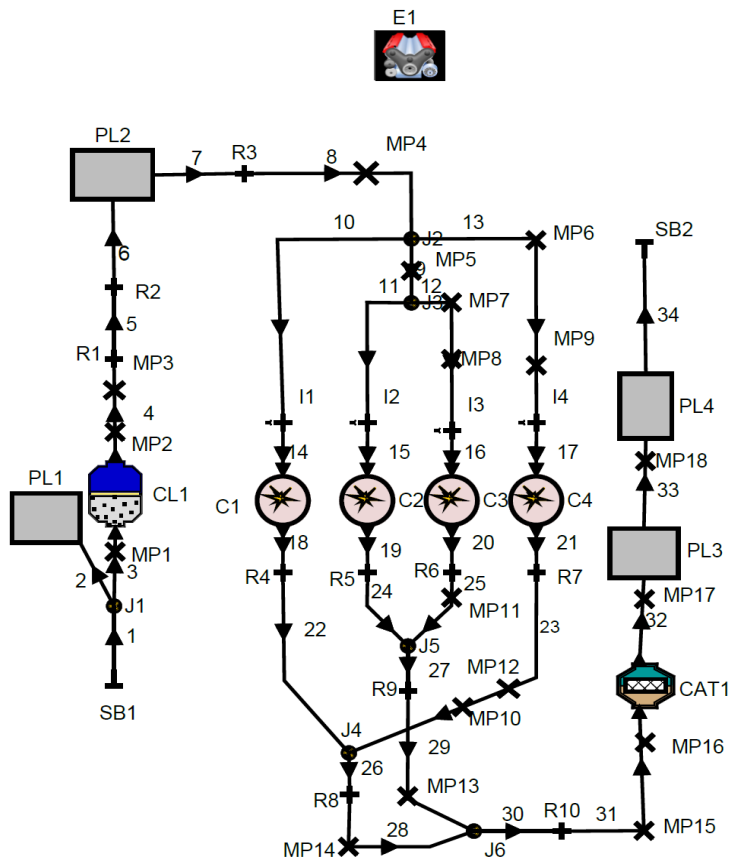
به منظور شبیه‌سازی سیستم بازیافت انرژی در موتور سمند، از نرم افزار AVL boost کمک گرفته شده است. نرم افزار AVL boost نرم افزار تخصصی طراحی موتورهای احتراق داخلی به شکل عددی می‌باشد. به منظور محاسبه دبی و دمای اگزوز، ابتدا موتور خودرو سمند EF7 در نرم افزار AVL boost مدل‌سازی گردید. مشخصات موتور خودرو ذکر شده در جدول ۵-۲ ارائه شده است.

جدول ۵-۲. مشخصات فنی موتور خودرو سمند

مقدار	واحد	مشخصه
بنزین		سوخت مصرفی
۴		تعداد سیلندرها
۷۸/۶	mm	قطر پیستون
۸۵	mm	کورس پیستون
۱-۳-۴-۲		ترتیب جرعه
۱۷۰۰	cc	حجم موتور
۱۱		نسبت تراکم
۸۲/۱۲	kW	حداکثر قدرت در دور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه
۶۷۰۰	RPM	دور حداکثر
۱۵۰/۷۵	Nm	حداکثر گشتاور در دور ۴۵۰۰ دور بر دقیقه

به منظور شبیه‌سازی احتراق در موتور مورد نظر، از مدل احتراقی Vibe two zone در نرم افزار AVL استفاده گردید. مدل احتراقی ذکر شده دارای دقت بالایی می‌باشد. همچنین از مدل Woschni جهت مدل‌سازی انتقال حرارت بین گازهای داخل سیلندر و دیواره های سیلندر، استفاده شده است.

مدلسازی اجزای فیزیکی موتور نظیر لوله‌ها، منیفولد هوا و دود و غیره، در محیط AVL boost براساس شرایط فیزیکی موتور خودرو EF7 مطابق شکل ۵-۵ طراحی گردیده است. بدین ترتیب، مقادیر دبی و دمای دودهای اگزوز در MP15 (محل نصب ماژول ترموالکتریک) اندازه‌گیری گردید.

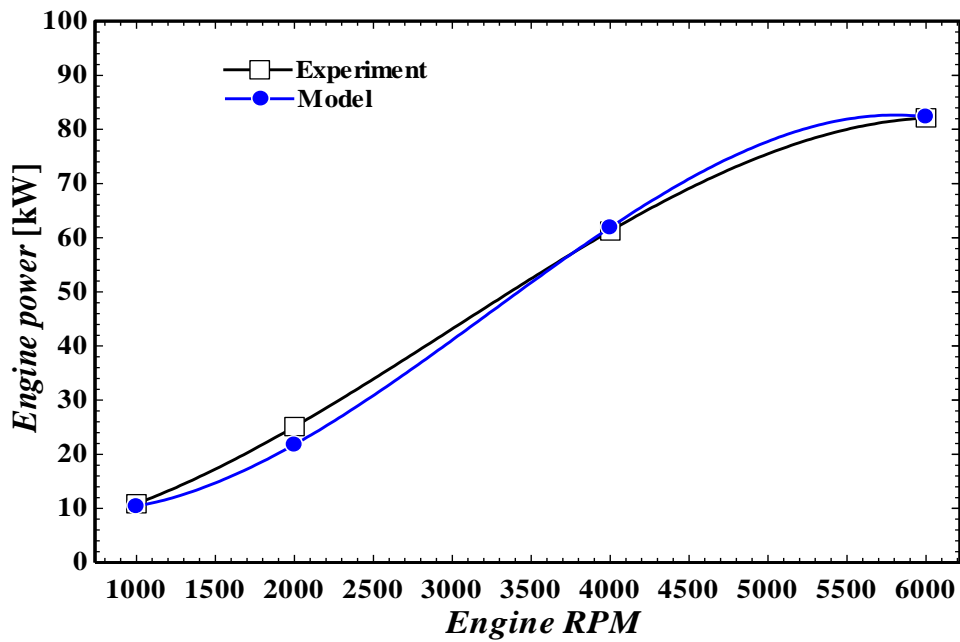


شکل ۵-۵ بلوک دیاگرام موتور EF7 در نرم افزار AVL boost

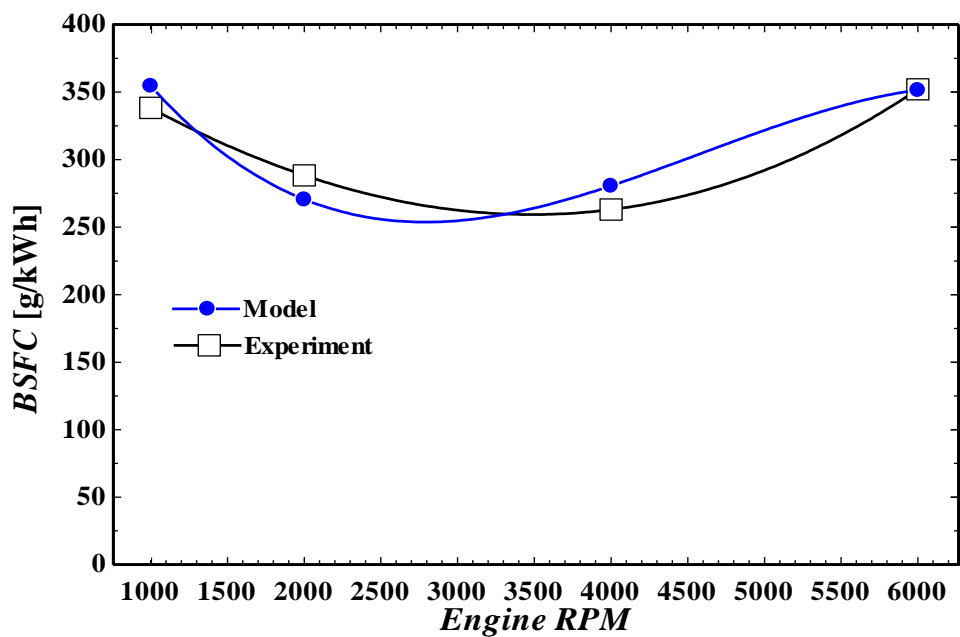
۵-۲-۲-۱-۵ صحنه گذاری مدل موتور

به منظور صحنه گذاری مدل سازی انجام گرفته، دو پارامتر اصلی موتور شامل قدرت خروجی و مصرف سوخت مخصوص ترمزی^۱ (BSFC) در نتایج آزمایشگاهی مرجع [۶۶] با مدل مقایسه گردید. براساس مقایسه انجام گرفته، خطای مدل سازی کمتر از ۸ درصد محاسبه گردیده است که نشان دهنده دقت بالای مدل سازی می باشد.

^۱ Brake Specific Fuel Consumption



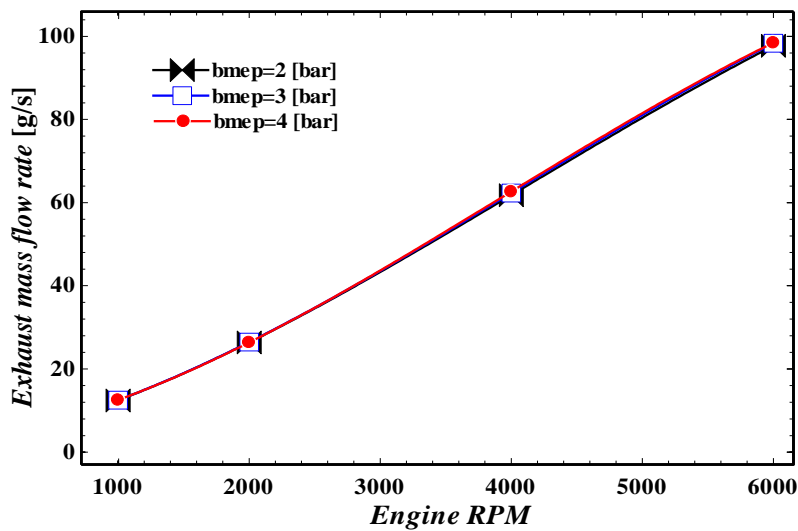
شکل ۶-۵ مقایسه پارامتر قدرت خروجی موتور در دورهای مختلف در داده های آزمایشگاهی و مدل



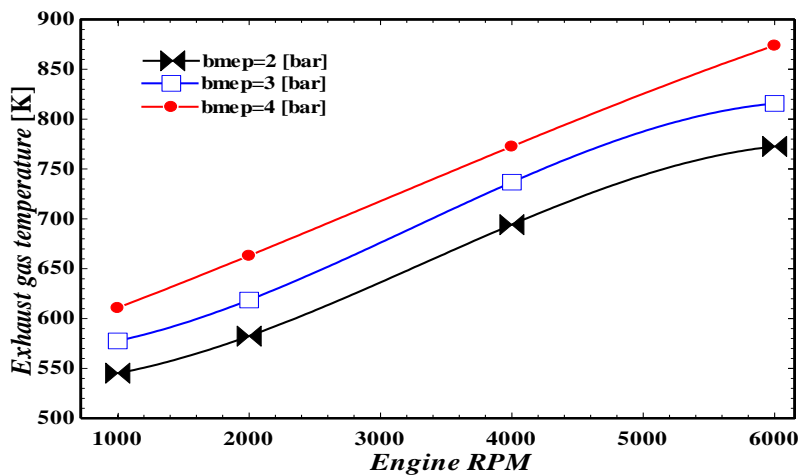
شکل ۷-۵ مقایسه پارامتر مصرف سوخت مخصوص ترمزی در داده های آزمایشگاهی و مدل

۵-۲-۲-۲ تحلیل داده‌های خروجی نرم افزار

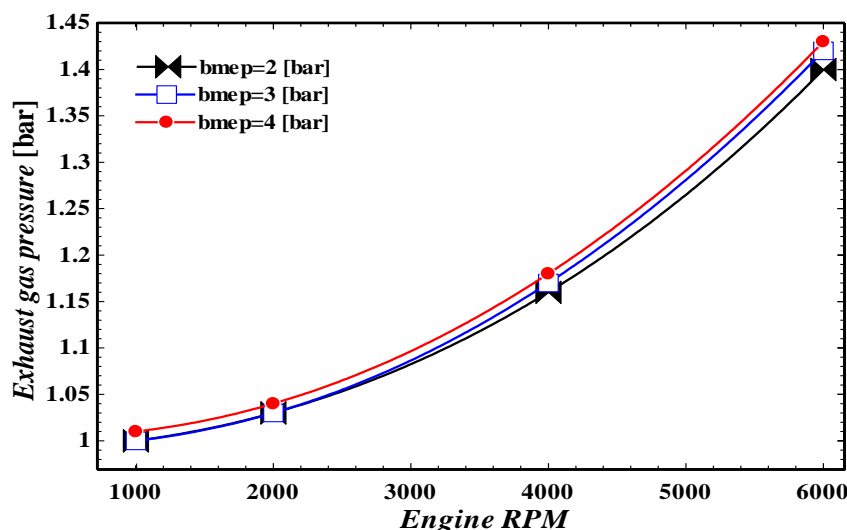
به منظور بازیافت انرژی‌های تلفاتی اگزوز موتور با استفاده از ماژول‌های ترموالکتریک داشتن دما و دبی گازهای خروجی از موتور در شرایط کارکرد مختلف آن مورد نیاز است. از آنجا که هدف بررسی عملکرد ماژول ترموالکتریک در شرایط رانندگی شهری می‌باشد، مقادیر دبی و دمای گازهای اگزوز موتور در زمانی که موتور با فشار کاری متوسط ترمزی بین ۲ تا ۴ بار کار می‌کند، در نرم افزار شبیه سازی و داده ها به صورت زیر استحصال گردید.



شکل ۵-۸ نمودار دبی گازهای اگزوز موتور در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف



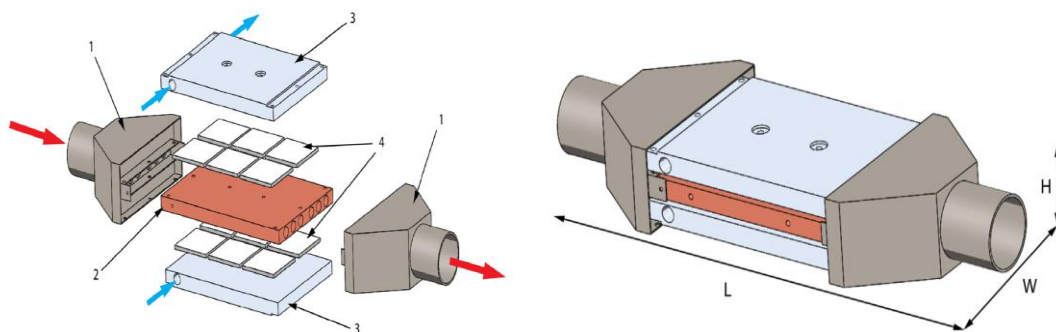
شکل ۵-۹ نمودار مقدار دمای گازهای اگزوز موتور در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف



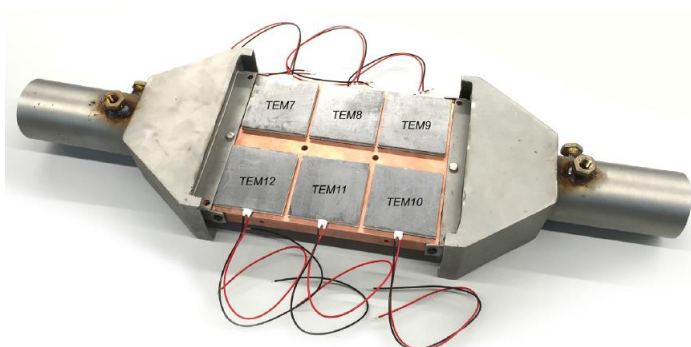
شکل ۵-۱۰ نمودار مقدار فشار گازهای اگزوز موتور در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف

۵-۲-۲ طراحی سیستم بازیافت ترموالکتریک

به منظور شبیه سازی ماژول ترموالکتریک و تخمین میزان انرژی تولیدی توسط آن، از داده‌های منبع [۵۹] استفاده گردیده و با کمک رگرسیون خطی، مقادیر خروجی ماژول ترموالکتریک، برحسب دما و دبی اگزوز محاسبه گردیده است. طول (L)، عرض (W) و ارتفاع (H) ماژول ترموالکتریک مورد نظر به ترتیب برابر ۴۴۴، ۱۶۰ و ۶۴ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۵-۱۰). ماژول ترموالکتریک به کار برده شده مطابق شکل ۵-۱۱ دارای اجزای (۱) مجاری ورودی و خروجی، (۲) مبدل حرارتی، (۳) صفحات خنک کاری، (۴) ماژولهای ترموالکتریک می‌باشد. وزن کل مبدل ترموالکتریک نشان داده شده برابر ۷ کیلوگرم می‌باشد. در مدلسازی صورت گرفته فرض بر این است که این مبدل در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از خروجی پنجه اگزوز قرار گرفته است. جدول ۵-۳ نشان دهنده خروجی مبدل ترموالکتریک ذکر شده، در حالت‌های مختلف می‌باشد که از این داده‌های تجربی برای رگرسیون خطی استفاده گردید.



شکل ۵-۱۱ ابعاد و اجزای مبدل ترموالکتریک



شکل ۵-۱۲ نمونه ساخته شده مازول ترموالکتریک

جدول ۵-۳. داده های تجربی حاصل از آزمایش مبدل ترموالکتریک [۵۹]

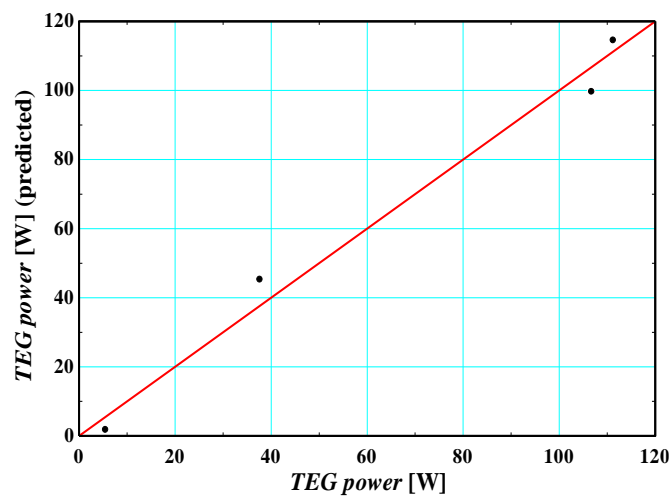
پارامتر	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴
دبی گازهای اگزوز (g/s)	۵/۹۵	۱۷/۶۳	۳۷/۰۷	۳۲/۶۱
دمای گازهای اگزوز (°C)	۴۰۷/۹	۵۶۹/۴	۶۹۰/۸	۷۰۹/۳
دبی مایع خنک کننده (l/s)	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲
دمای ورودی مایع خنک کننده (°C)	۳۸/۴	۴۸/۵	۶۵/۷	۷۴/۷
دمای خروجی مایع خنک کننده (°C)	۳۹/۶	۵۱/۲	۷۰/۷	۸۰/۸
توان تولیدی توسط مبدل ترموالکتریک (W)	۵/۵۲	۳۷/۶۸	۱۱۱/۲۷	۱۰۶/۷۶
فشار برگشتی تولیدی (mbar)	۰/۷۲	۵/۹	۳۶/۵۳	۲۴/۱۲

پس از انجام رگرسیون خطی، نتایج زیر حاصل گردید:

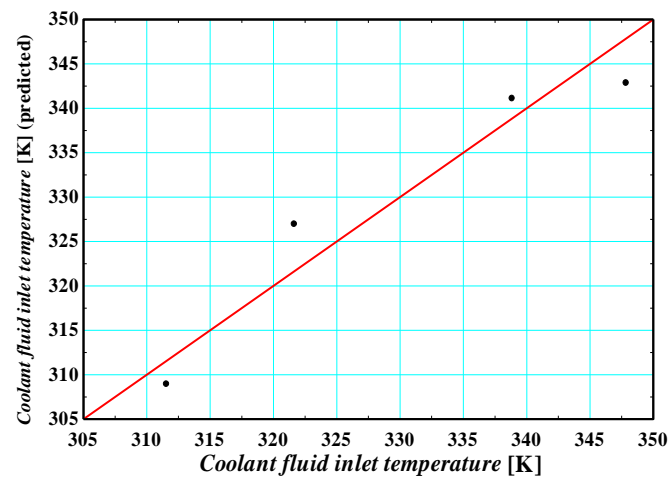
$$P = -33.22 + 0.02147T_{EXi} + 3.427\dot{m}_{EX} \quad (۱-۵)$$

$$T_{Ci} = 235.3 + 0.1076T_{EXi} + 0.05616\dot{m}_{EX} \quad (۲-۵)$$

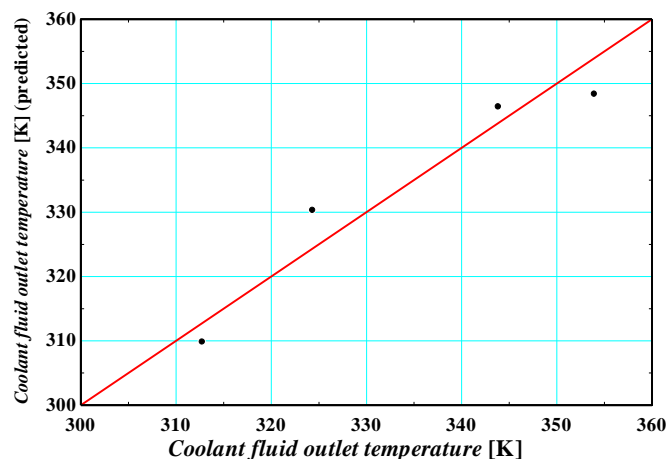
$$T_{Co} = 226.2666 + 0.1221T_{EXi} + 0.06488\dot{m}_{EX} \quad (۳-۵)$$



شکل ۱۳-۵ آزمون برازش نیکویی پارامتر تولید توان مبدل ترموالکتریک



شکل ۱۴-۵ آزمون برازش پارامتر دمای سیال خنک کننده در ورودی ترموالکتریک

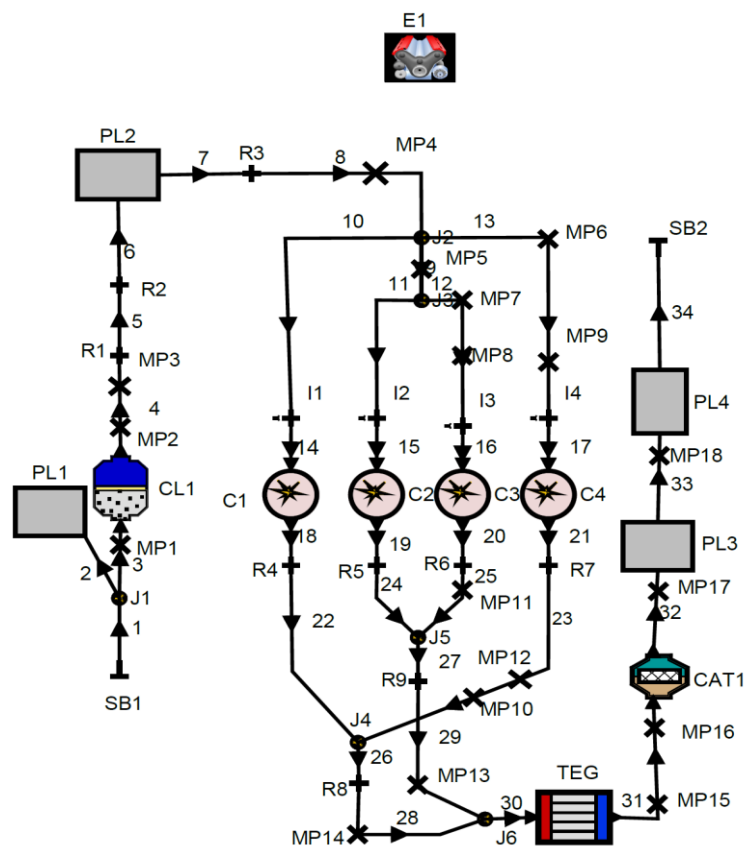


شکل ۵-۱۵ آزمون برازش پارامتر دمای سیال خنک کننده در مجرای خروجی ترموالکتریک

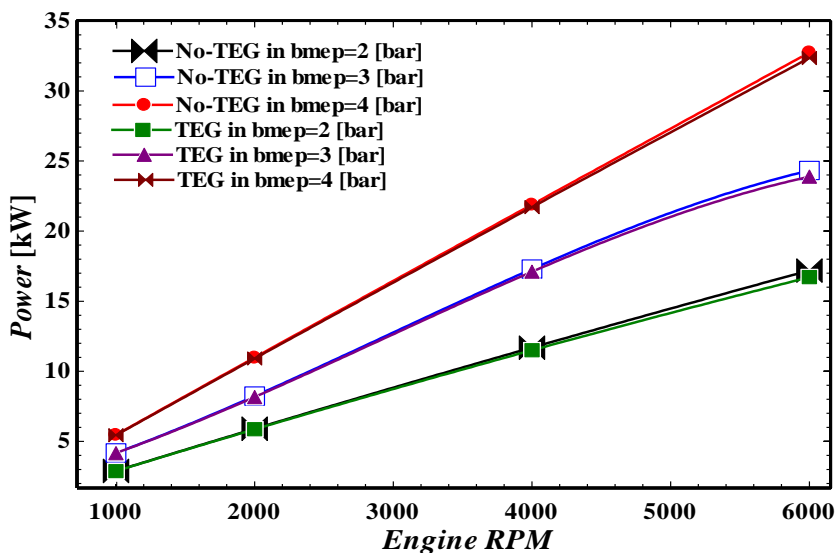
مقدار پارامتر R2 برای روابط ۱-۵ تا ۳-۵، به ترتیب برابر ۰.۹۸، ۰.۹۳، و ۰.۹۲ می باشد که نشان دهنده دقت مناسب برازش است.

۵-۲-۳-۱ آنالیز فشار برگشتی ایجاد شده توسط مبدل ترموالکتریک

به منظور محاسبه افت توان ناشی از فشار برگشتی ایجاد شده توسط مبدل ترموالکتریک، مبدل ترموالکتریک بصورت سری با موتور کوپل شده و در نرم افزار AVL boost به عنوان یک مبدل حرارتی در نظر گرفته شده است.



شکل ۵-۱۶ بلوک دیاگرام اجزای موتور در حالت کوپل با مبدل ترموالکتریک (TEG)

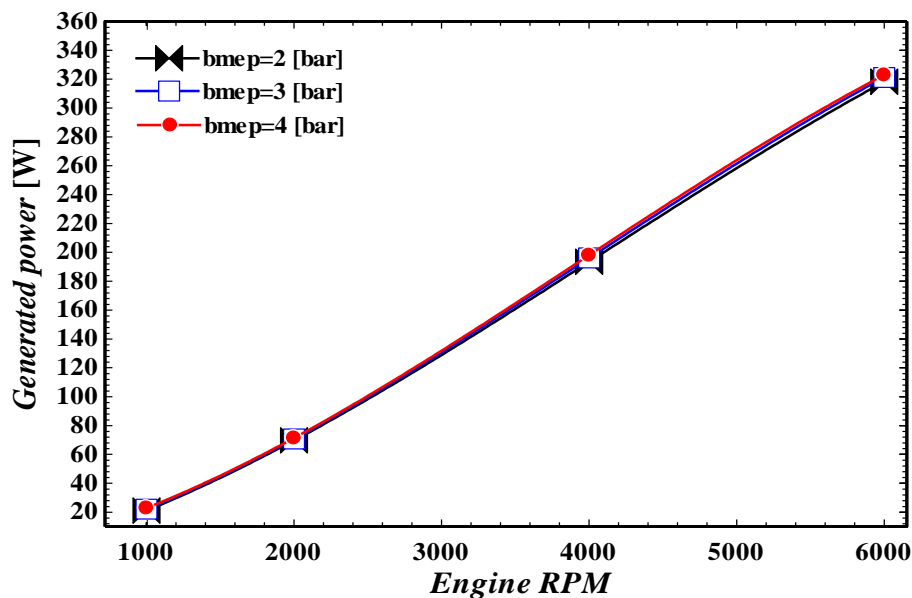


شکل ۵-۱۷ میزان توان خروجی موتور در دورهای مختلف در حالت های بدون ترموالکتریک و با ترموالکتریک

همانطور که در شکل ۵-۱۷ مشخص است، در بازه ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ دور بر دقیقه (بازه دور موتور در رانندگی شهری)، افت توان ایجاد شده توسط مبدل ترموالکتریک نصب شده بسیار ناچیز بوده (کمتر از ۵ درصد) و قابل اغماض می‌باشد.

۵-۲-۳ ارزیابی تولید توان توسط سیستم ترموالکتریک

برحسب نتایج حاصل شده، مبدل ترموالکتریک مورد نظر قادر به تولید توان در بازه ۲۰ تا ۳۲۰ وات در دورهای مختلف موتور می‌باشد که در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.



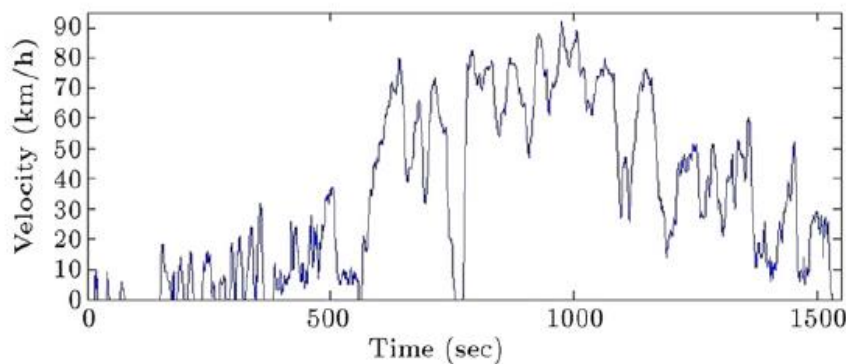
شکل ۵-۱۸ میزان توان تولیدی توسط سیستم بازیافت ترموالکتریک در دورها و فشارهای کاری ترمزی مختلف

با توجه به اینکه در این تحلیل، شرایط کاری موتور در حالت رانندگی شهری در شهر تهران در نظر گرفته شده است، خروجی مبدل در بازه ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ دور برای انجام مابقی محاسبات، مدنظر قرار گرفته است. برحسب تحلیل سیکل رانندگی تهران، هر خودرو حدوداً ۱۵/۲۶ درصد زمان یک سفر شهری خود را در حالت متوقف^۱ (دور آرام) سپری می‌کند [۶۷]. همچنین، در این سیکل، متوسط سرعت

^۱ Idling

حرکت خودرو، حدود ۳۴/۱ کیلومتر بر ساعت بوده، که در این سرعت دور موتور حدودا بین ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. این بدین معنی است که توان خروجی مبدل ترموالکتریک در رانندگی شهری، در بازه ۷۰ تا ۱۳۰ وات می‌باشد. از طرفی دیگر، مقدار زمان توقف خودرو در سیکل تهران در یک سفر شهری حدود ۲۳۳/۹۴ ثانیه محاسبه شده است. با توجه به اینکه مصرف انرژی الکترولایزر در حالت درجا، ۹۶ وات برآورد شده است، انرژی مصرفی توسط آن در بازه توقف سیکل تهران، با به‌کارگیری جریان DC حدود ۶/۲۵ وات ساعت خواهد شد.

میزان تولید انرژی توسط مبدل ترموالکتریک، با توجه به اینکه خودرو در سیکل تهران حدودا ۱۲۹۹ ثانیه در حال حرکت با سرعت ثابت تقریبا ۳۴/۱ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است، حدودا ۲۵/۲۵ تا ۴۶/۹۱ وات ساعت، برآورد گردیده است که کاملا مصرف انرژی الکترولایزر و متعلقات سیستم خنک کاری مبدل ترموالکتریک را تامین خواهد کرد.



شکل ۵-۱۹ سیکل رانندگی تهران [۶۷]

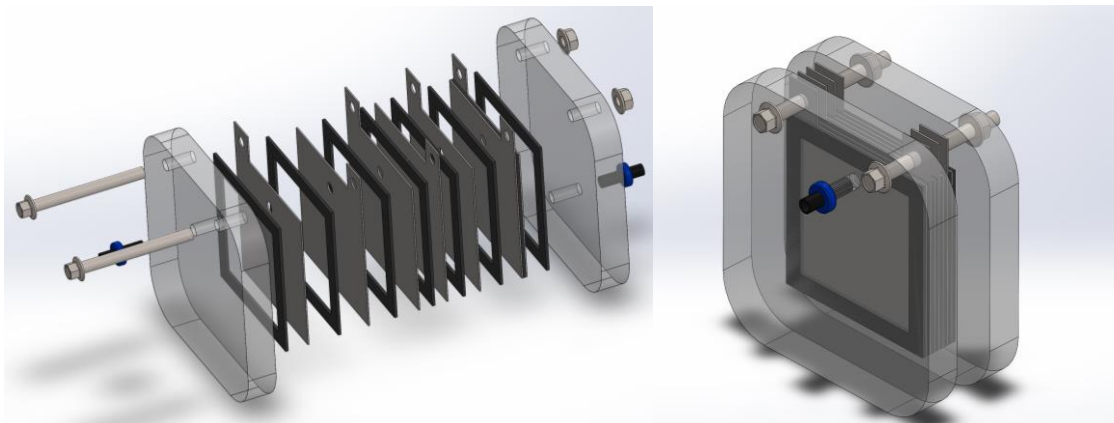
۳-۵ طراحی الکترولایزر اصلاح شده و ارزیابی اقتصادی کل سیستم

در بخش اول این فصل، از الکترولایزر نوع جریان DC جهت تولید ۰/۱۲۶ لیتر بر دقیقه گاز هیدروکسی استفاده گردیده است. مقدار توان مصرفی الکترولایزر و انرژی مصرفی آن در سیکل رانندگی در تهران و سطح مورد نیاز آن در صورت استفاده از روشهای به‌سازی ذکر شده در فصول قبل، در جدول ۴-۵ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول، الکترولایزر مجهز به روش پالسی

به دلیل مصرف انرژی کمتر نسبت به بقیه روش‌ها و اختلاف ناچیز هزینه ساخت با آنها، انتخاب گردید. سپس در نرم افزار سالیدورزک، الکترو لایزر مورد نظر طراحی شد. وزن الکترو لایزر طراحی شده، حدود ۱ کیلوگرم توسط نرم افزار تخمین زده شده است.

جدول ۴-۵. توان و انرژی مصرفی، سطح مورد نیاز و هزینه ساخت الکترو لایزر با بکارگیری روش‌های مختلف

نوع الکترو لایزر	توان مصرفی [W]	انرژی مصرفی [J]	سطح مورد نیاز [m ²]	هزینه ساخت (تومان)
DC	۹۶/۱۶	۶/۲۵	۰/۰۴۱	۱۴۲۰۰
DC مجهز به آلترا سونیک	۹۲	۵/۹۹	۰/۰۳۹	۱۳۶۰۰
DC مجهز به روش پالسی	۵۲/۱۱۹	۳/۳۹	۰/۲۲۲۴	۷۷۵۰۰



شکل ۵-۲۰ نمای ایزومتریک و انفجاری الکترو لایزر طراحی شده در نرم افزار سالیدورک

قیمت و وزن تقریبی هر کدام از اجزا در جدول ۵-۵ ارائه شده است. بر حسب نتایج بدست آمده از جدول ۵-۵، هزینه ساخت کل سیستم حدود ۲/۹۲۰/۰۰۰ تومان برآورد شده است.

جدول ۵-۵. قیمت اجزای مختلف سیستم طراحی شده

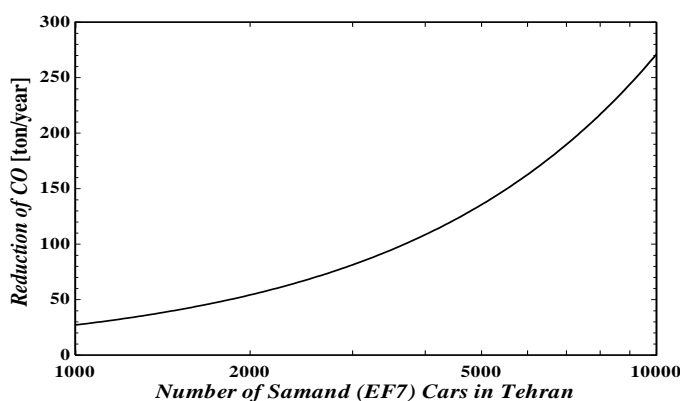
قطعات	قیمت (تومان)	وزن (کیلوگرم)
مبدل ترموالکتریک	۱/۵۰۰/۰۰۰	۷
پمپ آب	۵۰۰/۰۰۰	۰/۱۵
کندانسور	۲۰۰/۰۰۰	۲
باتری	۳۰۰/۰۰۰	۲
بورد تولید پالس	۶۰۰/۰۰۰	۰/۴
منبع آب	۵۰/۰۰۰	۲/۵
الکترولایزر	۲۰۰/۰۰۰	۱
بابلر	۲۰/۰۰۰	۰/۲
جمع کل	۲/۹۲۰/۰۰۰	۱۵/۲۵

۴-۵ تحلیل زیست محیطی

به گزارش گروه رسانه های خبرگزاری تسنیم، ایران نخستین کشور و تهران نهمین کلانشهر دنیا در زمینه اتلاف وقت شهروندان در ترافیک شناخته شده است [۶۸]. بر اساس این گزارش که مربوط به تیرماه سال ۱۳۹۸ است، مردم ایران به طور متوسط برای هر مسیر خود از مبدأ تا مقصد، بیش از ۵۰ دقیقه زمان در ترافیک هدر می دهند و از این بابت در جایگاه نخست جهان قرار گرفته اند. بر اساس آخرین گزارش مؤسسه نامیبو^۱ [۶۹]، از میان ۵۸ کشور مورد بررسی، ایران بدترین وضعیت را از منظر ترافیکی دارد. بطور میانگین، ۵۵ دقیقه از وقت هر خودرو در طی روز در تهران، در ترافیک به سر برده می شود.

^۱ Numbeo Institute

از طرفی دیگر، دبی گازهای آگروز موتور سمند EF7 در دور آرام در نرم افزار AVL حدود ۱۰ گرم بر ثانیه بدست آمده است. اگر خودروی سمند حدود ۵۵ دقیقه در روز در حالت درجا کار کند، ۷۵/۹۹ گرم در روز گاز مونوکسید کربن تولید خواهد کرد. با نصب سیستم ترکیبی تولید و تزریق آبی گاز هیدروکسی در خودرو، نرخ تولید آلاینده‌گی آن در روز به میزان ۱/۷۱۶ گرم خواهد رسید و بدین معنی است که میزان تولید گاز مونوکسید کربن به میزان ۷۴/۲۷۴ گرم در روز به ازای هر خودرو سمند EF7 بنزین سوز کاهش خواهد یافت.



شکل ۵-۲۱ نرخ کاهش تولید گاز مونوکسید کربن به ازای تعداد خودروهای سمند EF7 موجود در تهران با نصب

سیستم ترکیبی طراحی شده

نرخ کاهش تولید گاز CO به ازای تعداد خودروهای سمند موجود در شهر تهران در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است. از آنجا که آمار دقیقی از تعداد خودروهای سمند EF7 بنزین سوز در تهران در دسترس نبود، این شکل جهت انجام تحلیل زیست محیطی با حدس امکان وجود ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دستگاه از این نوع خودرو در تهران ارائه گردیده است. شکل (۵-۲۱) نشان می‌دهد که اگر تنها ۱۰۰۰ دستگاه از این خودرو در تهران در طی روزهای سال فعال باشند، با نصب سیستم ترکیبی طراحی شده، نرخ تولید گاز مونوکسید آنها به میزان تقریبی ۲۲ تن در سال کاهش خواهد یافت.

فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه گیری

مصرف سوخت‌های فسیلی، باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی زیادی در سراسر دنیا شده است. یکی از آلاینده‌های خطرناک تولیدی توسط موتورهای احتراقی، مونوکسید کربن می‌باشد. انتشار این گاز در هوای کلان شهرها باعث افزایش نرخ ابتلا به سرطان و مرگ و میر شهروندان شده است. یکی از راه‌های کاهش نرخ تولید آلاینده‌گی تولیدی توسط موتور، پاشش سوخت هیدروژن به عنوان سوخت کمکی در موتور می‌باشد. یکی از راه‌های تولید سوخت هیدروژن، الکترولیز آب می‌باشد. در این روش، آب و انرژی الکتریکی وارد الکترولیزر شده و در خروجی آن هیدروژن تولید می‌شود. یکی از انواع الکترولیزرها که در خودرو به منظور اصلاح عملکرد احتراق استفاده می‌شود، الکترولیزر نوع تولید کننده گاز هیدروکسی می‌باشد. این نوع الکترولیزر فاقد غشای نیمه تراوایی جداکننده هیدروژن و اکسیژن بوده و این موضوع باعث کاهش قیمت تمام شده و سادگی ساخت آن شده است. بازده انرژی این نوع الکترولیزر در برابر انواع دیگر پایین می‌باشد. این الکترولیزر در خودرو نصب شده و در مواقع مورد نیاز با دریافت انرژی الکتریکی و آب، گاز هیدروکسی (هیدروژن و اکسیژن) تولید و مستقیماً به موتور تزریق می‌گردد.

در این پژوهش، ابتدا الکترولیزر با بررسی پارامترهای مختلف هندسی و اثرات پارامترهای خارجی نظیر امواج آلتراسونیک، جریان پالسی و میدان مغناطیسی به‌سازی گردیده است. سپس مصرف انرژی الکترولیزر به‌سازی شده با کاربرد پارامترهای خارجی، با الکترولیزر معمولی نوع DC از دیدگاه انرژی و اقتصادی مقایسه شده است. الکترولیزر با الکترودهای نوع صفحه‌ای دارای بازده بیشتری نسبت به الکترودهای نوع لوله‌ای می‌باشد. سلول در فاصله‌ی بین الکترودها کاتد و آند ۲ میلی‌متر بیشترین تولید را داشته است. کاربرد روش پالسی در الکترولیزر باعث افزایش بازده ۴۵/۸ درصدی و افزایش سطح آن به میزان حدودی ۴/۵ برابر شده است. برحسب نتایج بدست آمده، استفاده از آهنربا با قدرت میدان حدود ۳۲ میلی‌تسلا در الکترولیزر افزایش بازده بسیار ناچیزی ایجاد کرده و دارای صرفه اقتصادی

نمی‌باشد. امواج آلتراسونیک باعث کاهش ۵ درصدی سطح الکترودها و افزایش ۴/۳ درصدی بازده انرژی الکترولایزر خواهد شد.

پاشش هیدروکسی بصورت تجربی در موتور EF7 به منظور کاهش آلاینده‌گی تولیدی توسط این موتور در حالت کار درجا، مورد آزمایش قرار گرفته است. برحسب نتایج بدست آمده، پاشش گاز هیدروکسی به میزان ۱ درصد جرمی هوای ورودی موتور، باعث کاهش حدود ۹۰ درصدی گاز مونوکسید تولیدی توسط موتور در دور آرام گردیده است. در مقایسه‌ی اقتصادی-انرژی انجام شده بین انواع الکترولایزرهای به‌سازی شده، الکترولایزر مجهز به روش پالسی با فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز از لحاظ بازده انرژی و اقتصادی (نسبت به قیمت کل) به عنوان الکترولایزر منتخب انتخاب گردید.

به منظور تامین انرژی مصرفی الکترولایزر، از سیستم بازیافت انرژی‌های تلفاتی موتور بوسیله مبدل ترموالکتریک استفاده شده است. جهت شبیه سازی مبدل ترموالکتریک از داده‌های تجربی مراجع و رگرسیون استفاده گردیده است. به منظور شبیه سازی میزان تولید انرژی توسط مبدل در شرایط رانندگی شهری توسط خودرو سمند، موتور EF7 در نرم افزار AVL boost مدل‌سازی و تحلیل شده است. بر حسب نتایج بدست آمده، کاربرد مبدل باعث تامین کامل انرژی مصرفی الکترولایزر برای پاشش در حالت درجا خواهد شد. قیمت نهایی سیستم تزریق آبی طراحی شده جهت کاهش آلاینده مونوکسید کربن در خودرو سمند EF7، حدود ۲/۹۲۰/۰۰۰ تومان تخمین زده شده است. طبق آنالیز زیست محیطی انجام گرفته، نصب این سیستم در خودرو سمند EF7، برحسب تعداد این نوع خودرو در تهران (در بازه ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰) دستگاه، باعث کاهش حدود ۲۵ تا ۲۸۰ تن مونوکسید کربن در سال در هوای شهر تهران خواهد شد.

۲-۶ پیشنهادات

۱- با توجه با آزمایشها صورت گرفته بر روی الکترولایزر مجهز به روش پالسی، با افزایش فرکانس جریان الکتریکی ورودی به سلول‌ها، بازده انرژی آن افزایش و سطح الکتروود مورد نیاز آن کاهش

یافته است. بورد الکترونیکی استفاده شده در آزمایشها توانایی ایجاد جریان پالسی با فرکانس بیشینه ۳۰۰ کیلوهرتز را دارا بوده است. بدین ترتیب، ایجاد فرکانس‌های بالا (در مقیاس مگاهرتز و گیگاهرتز) ممکن است بازده انرژی الکترولایزر را بهینه کند.

۲- بررسی اثر میدان‌های مغناطیسی با قدرت بالاتر و یا با میدان متغیر ممکن می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳- بررسی تاثیر هرکدام از پارامترهای فیزیکی ذکر شده در پژوهش در کیفیت هیدروژن تولیدی

۴- بررسی الکترولیز پلاسمایی (ولتاژ بالا) با دیدگاه انرژی و مقایسه با روش پالسی

پیوست

پیوست الف-معادلات احتراق در AVL [۶۵]

در این مدل Vibe two zone، محفظه احتراق به دو منطقه‌ی گازهای محترق و غیر محترق تقسیم شده است. همچنین، دو منطقه‌ی مورد نظر دارای دماهای یکسانی نبوده و از قانون اول ترمودینامیک برای تحلیل هر منطقه استفاده شده است.

$$\frac{dm_b u_b}{d\alpha} = -p_c \frac{dV_b}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_{Wb}}{d\alpha} + h_u \frac{dm_b}{d\alpha} - h_{BB,b} \frac{dm_{BB,b}}{d\alpha} \quad (\text{الف-۱})$$

$$\frac{dm_u u_u}{d\alpha} = -p_c \frac{dV_u}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_{Wu}}{d\alpha} - h_u \frac{dm_b}{d\alpha} - h_{BB,u} \frac{dm_{BB,u}}{d\alpha} \quad (۲-۶)$$

در نهایت، مجموع تغییرات حجم در داخل سیلندر باید برابر تغییر حجم سیلندر و مجموع حجمهای هر منطقه (منطقه گازهای محترق و غیرمحترق) باید برابر حجم سیلندر باشد. پس در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{dV_b}{d\alpha} + \frac{dV_u}{d\alpha} = \frac{dV}{d\alpha} \quad (۳-۶)$$

$$V_b + V_u = V \quad (۴-۶)$$

نرخ احتراق مخلوط گازی موجود در محفظه احتراق بوسیله Vibe function بدست می آید. کسر جرمی گازهای محترق شده در محفظه احتراق در طول زمان احتراق، توسط رابطه ۵، قابل محاسبه می‌باشد.

$$x = 1 - \exp\left[-a \left(\frac{\alpha - SOC}{BDUR}\right)^{m+1}\right] \quad (۵-۶)$$

که در این رابطه SOC، BDUR، α ، m و a به ترتیب، زمان شروع احتراق، طول زمان احتراق، زاویه میل لنگ، Vibe shape و Vibe parameters می‌باشند. این پارامترها در موتورهای مختلف دارای مقادیر بهینه متعددی می‌باشند. در موتور مورد نظر، مقدار این مقادیر در جدول ۳-۵ در حالت فول بار در دوره‌های مختلف ارائه گردیده است.

جدول ۳-۶. مقادیر پارامترهای مختلف برای شبیه سازی موتور EF7

پارامتر	واحد	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۶۰۰۰
		دور بر دقیقه	دور بر دقیقه	دور بر دقیقه	دور بر دقیقه
<i>m</i>		۲/۴	۲/۲۸	۱/۶۲	۱/۲۶
<i>SOC</i>	درجه	-۱۹	-۲۸	-۴	۲۰
<i>BDUR</i>	درجه	۴۰	۴۲	۴۶	۵۰
<i>a</i>		۱۲	۱۲	۱۲	۱۲

مرجع

1. Bari S, Esmail MM. Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*. 2010;89(2):378-83.
2. Rimkus A, Matijošius J, Bogdevičius M, Bereczky Á, Török Á. An investigation of the efficiency of using O₂ and H₂ (hydroxile gas-HHO) gas additives in a CI engine operating on diesel fuel and biodiesel. *Energy*. 2018;152:640-51.
3. Saravanan N, Nagarajan G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008;33(6):1769-75.
4. Yilmaz AC, Uludamar E, Aydin K. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *international journal of hydrogen energy*. 2010;35(20):11366-72.
5. Arat HT, Baltacioglu MK, Özcanli M, Aydin K. Effect of using Hydroxy-CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel. *International journal of hydrogen energy*. 2016;41(19):8354-63.
6. .
7. Edwards PP, Kuznetsov VL, David WI, Brandon NP. Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future. *Energy policy*. 2008;36(12):4356-62.
8. Momirlan M, Veziroglu TN. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International journal of hydrogen energy*. 2005;30(7):795-802.
9. Offer G, Howey D, Contestabile M, Clague R, Brandon N. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy policy*. 2010;38(1):24-9.
10. Singh S, Jain S, Venkateswaran P, Tiwari AK, Nouni MR, Pandey JK, et al. Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;51:623-33.
11. Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International journal of hydrogen energy*. 2013;38(12):4901-34.
12. Zeng K, Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010;36(3):307-26.
13. Ursua A, Gandia LM, Sanchis P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*. 2011;100(2):410-26.
14. Kothari R, Buddhi D, Sawhney R. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12(2):553-63.
15. Dincer I, Acar C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International journal of hydrogen energy*. 2015;40(34):11094-111.
16. Acar C, Dincer I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International journal of hydrogen energy*. 2014;39(1):1-12.

17. Spath PL, Mann MK. Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US); 2000.
18. Oertel M, Schmitz J, Weirich W, Jendrysek-Neumann D, Schulten R. Steam reforming of natural gas with intergrated hydrogen separation for hydrogen production. *Chemical engineering & technology*. 1987;10(1):248-55.
19. Barelli L, Bidini G, Gallorini F, Servili S. Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: a review. *Energy*. 2008;33(4):554-70.
20. Haryanto A, Fernando S, Murali N, Adhikari S. Current status of hydrogen production techniques by steam reforming of ethanol: a review. *Energy & Fuels*. 2005;19(5):2098-106.
21. LeValley TL, Richard AR, Fan M. The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies—a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014;39(30):16983-7000.
22. Jones JE, Hansen LD, Jones SE, Shelton DS, Thorne JM. Faradaic Efficiencies Less Than 100% during Electrolysis of Water Can Account for Reports of Excess Heat in "Cold Fusion" Cells. *The Journal of Physical Chemistry*. 1995;99(18):6973-9.
23. Drogui P, Elmaleh S, Rumeau M, Bernard C, Rambaud A. Hydrogen peroxide production by water electrolysis: application to disinfection. *Journal of applied electrochemistry*. 2001;31(8):877-82.
24. Baltacioglu MK, Arat HT, Özcanli M, Aydin K. Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(19):8347-53.
25. Özcanli M, Akar MA, Calik A, Serin H. Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(36):23366-72.
26. De Silva T, Senevirathne L, Warnasooriya T. HHO generator—an approach to increase fuel efficiency in spark ignition engines. *European journal of Advances in Engineering and Technology*. 2015;2(4):1-7.
27. Sudarmanta B, Darsopuspito S, Sungkono D. Application of dry cell HHO gas generator with pulse width modulation on sinjai spark ignition engine performance. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2016;5(2):105-12.
28. Houseman J, Cerini DJ. On-board hydrogen generator for a partial hydrogen injection internal combustion engine. *SAE Technical Paper*; 1974. Report No.: 0148-7191.
29. Sjöström K, Eriksson S, Landqvist G. Onboard hydrogen generation for hydrogen injection into internal combustion engines. *SAE Technical Paper*; 1981. Report No.: 0148-7191.
30. Das L. On-board hydrogen storage systems for automotive application. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996;21(9):789-800.
31. Fraser N, Blaxill H, Lumsden G, Bassett M. Challenges for increased efficiency through gasoline engine downsizing. *SAE International Journal of Engines*. 2009;2(1):991-1008.
32. Manente V, Zander C-G, Johansson B, Tunestal P, Cannella W. An advanced internal combustion engine concept for low emissions and high efficiency from idle to max load using gasoline partially premixed combustion. *SAE Technical Paper*; 2010. Report No.: 0148-7191.

33. Wang E, Zhang H, Fan B, Ouyang M, Zhao Y, Mu Q. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy*. 2011;36(5):3406-18.
34. Bell LE. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*. 2008;321(5895):1457-61.
35. Ringler J, Seifert M, Guyotot V, Hübner W. Rankine cycle for waste heat recovery of IC engines. *SAE International Journal of Engines*. 2009;2(1):67-76.
36. Saidur R, Rezaei M, Muzammil WK, Hassan M, Paria S, Hasanuzzaman M. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012;16(8):5649-59.
37. Wang M, Wang Z, Gong X, Guo Z. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;29:573-88.
38. Yeager E, Bugosh J, Hovorka F, McCarthy J. The Application of Ultrasonic Waves to the Study of Electrolytic Solutions II. The Detection of the Debye Effect. *The Journal of Chemical Physics*. 1949;17(4):411-5.
39. Lin M-Y, Hsu W-N, Hourng L-W, Shih T-S, Hung C-M. Effect of Lorentz force on hydrogen production in water electrolysis employing multielectrodes. *Journal of Marine Science and Technology*. 2016.
40. Mandal B, Sirkar A, Shau A, De P, Ray PS. Effects of geometry of electrodes and pulsating DC input on water splitting for production of hydrogen. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. 2012;2(1):99-102.
41. Papagiannakis R, Hountalas D. Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23(3):353-65.
42. Cameron R. Effects of on-board HHO and water injection in a diesel generator. 2012.
43. Chambers SB. Apparatus for producing orthohydrogen and/or parahydrogen. *Google Patents*; 2000.
44. Kelly P. A Practical Guide to 'Free-Energy' Devices. *Automotive Systems*; 2008.
45. King MB. Water electrolyzers and the zero-point energy. *Physics Procedia*. 2011;20:435-45.
46. Monk N, Watson S. Review of pulsed power for efficient hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(19):7782-91.
47. Demir N, Kaya MF, Albawabiji MS. Effect of pulse potential on alkaline water electrolysis performance. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(36):17013-20.
48. Shimizu N, Hotta S, Sekiya T, Oda O. A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply. *Journal of applied electrochemistry*. 2006;36(4):419-23.
49. Meyer SA. Method for the Production of a Fuel Gas. *Google Patents*; 1990.
50. Lin M-Y, Hourng L-W. Ultrasonic wave field effects on hydrogen production by water electrolysis. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2014;37(8):1080-9.
51. Wang C-C, Chen C-Y. Water electrolysis in the presence of an ultrasonic field. *Electrochimica Acta*. 2009;54(15):3877-83.
52. Zadeh SH. Hydrogen Production via Ultrasound-Aided Alkaline Water Electrolysis. *J. Automation and Control Engineering*. 2014;2.

53. Lin M-Y, Hourng L-W, Wu C-H. The effectiveness of a magnetic field in increasing hydrogen production by water electrolysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2017;39(2):140-7.
54. Lin M-Y, Hourng L-W, Kuo C-W. The effect of magnetic force on hydrogen production efficiency in water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(2):1311-20.
55. EL-Kassaby MM, Eldrainy YA, Khidr ME, Khidr KI. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*. 2016;55(1):243-51.
56. Karagöz Y, Balcı Ö, Orak E, Habib MS. Effect of hydrogen addition using on-board alkaline electrolyser on SI engine emissions and combustion. *International journal of hydrogen energy*. 2018;43(24):11275-85.
57. Musmar SeA, Al-Rousan AA. Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines. *fuel*. 2011;90(10):3066-70.
58. Al-Rousan AA. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. *International journal of hydrogen energy*. 2010;35(23):12930-5.
59. Massaguer A, Massaguer E, Comamala M, Pujol T, González J, Cardenas M, et al. A method to assess the fuel economy of automotive thermoelectric generators. *Applied energy*. 2018;222:42-58.
60. Fernández-Yañez P, Armas O, Capetillo A, Martínez-Martínez S. Thermal analysis of a thermoelectric generator for light-duty diesel engines. *Applied energy*. 2018;226:690-702.
61. Eddine AN, Chalet D, Faure X, Aixala L, Chessé P. Effect of engine exhaust gas pulsations on the performance of a thermoelectric generator for wasted heat recovery: An experimental and analytical investigation. *Energy*. 2018;162:715-27.
62. Shu G, Ma X, Tian H, Yang H, Chen T, Li X. Configuration optimization of the segmented modules in an exhaust-based thermoelectric generator for engine waste heat recovery. *Energy*. 2018;160:612-24.
63. Mazloomi K, Sulaiman N, Ahmad SA, Yunus N. Analysis of the frequency response of a water electrolysis cell. *Int J Electrochem Sci*. 2013;8(3):3731-9.
64. Kandah MI. Enhancement of Water Electrolyzer Efficiency. *Journal of Energy Technologies and Policy*. 2014;4(11).
65. Iliev SP, editor *Developing of a 1-D combustion model and study of engine characteristics using ethanol-gasoline blends*. Proceedings of the World Congress on Engineering; 2014.
66. www.dinamotors.com
67. Fotouhi A, Montazeri-Gh M. Tehran driving cycle development using the k-means clustering method. *Scientia Iranica*. 2013 Apr 1;20(2):286-93.
68. www.tasnimnews.com
69. www.damavand.news

Abstract

The consumption of fossil fuels around the world has caused many problems such as the release of many pollutants. The transportation system, which is one of the major consumers of fossil fuels in the country, plays a keyrole in the discussion of pollutant production and fuel consumption. The carbon monoxide pollutants produced by automobiles that result from the process of incomplete combustion in the engine are one of the most dangerous pollutants in the earth. One way to improve combustion quality in combustion engines is to inject hydrogen gas as an auxiliary fuel into the engine. In this research, we have used and studied hydroxy electrolyzer to produce and inject gas into the engine. Initially, the effect of parameters such as geometry and distance of electrodes and other physical parameters such as ultrasonic waves, magnetic field and pulsed current on water electrolysis process have been evaluated. According to the results, plate electrodes with a distance of 1 mm have the highest efficiency among other geometrical modes. Also, the effect of pulsed current on increasing electrolysis efficiency is more than other.

In order to evaluate the effect of hydroxy gas injection to the combustion engine, first, the effects of hydroxy gas injection to the EF7 engine was investigated. According to the results, injection of this gas reduced carbon monoxide gas by about 90%. Then, the electrolyzer energy consumption was calculated by considering different physical parameters. According to the results, applying pulsed current to the electrolyzer increased the efficiency of the electrolysis process more than the other parameters. Also, a hybrid system consisting of engine, electrolyzer and thermoelectric modules (for recovering

the engine waste heat) was designed and analyzed. Finally, an economic and environmental analysis of the designed hybrid system is presented.

Keywords (5 to 7 keywords): Hydroxy gas, Thermoelectric generator, Carbon monoxide, Electrolyser, Engine



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

**Experimental Study of Effects of
Different Parameters on the
Performance of Electrolyzer Producer
of Hydroxy Gas and Evaluation of its
on-board injection in the Internal
Combustion Engine**

By: Farhad Salek

Supervisor:
Dr. Mohammad Zamen

Advisor:
Dr. Vahid Hosseini

September, 2019