



دانشگاه پشاور  
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در (مهندسی شیمی گرایش پدیده انتقال)

عنوان:

# شبیه‌سازی و کنترل پیل سوختی هیدروژنی توسط نرم افزار MATLAB

استاد راهنما:

دکتر جعفر صادقی

استاد مشاور:

دکتر رهبر رحیمی

تحقیق و نگارش:

علی جمالی نوذری

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است)

شهریور ۱۳۹۰

## بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان شبیه‌سازی و کنترل پیل‌سوختی هیدروژنی قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی شیمی توسط دانشجو علی جمالی نوذری با راهنمایی استاد پایان نامه دکتر جعفر صادقی تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

(نام و امضاء دانشجو)

علی جمالی نوذری

این پایان نامه ۸ واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ ..... توسط هیئت داوران بررسی و درجه ..... به آن تعلق گرفت.

تاریخ

امضاء

نام و نام خانوادگی

دکتر جعفر صادقی

استاد راهنما:

دکتر رهبر رحیمی

استاد مشاور:

دکتر عبدالرضا صمیمی

داور ۱:

دکتر سید سعید توکلی

داور ۲:

نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر رودینی



## تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب علی جمالی نوذری تعهد می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: علی جمالی نوذری

امضاء

تقدیم به:

پدر بزرگوار، مادر مهربان  
و همسر عزیزم

## سپاسگزاری

در ابتدا از زحمات بی‌دریغ استاد گرانقدرم دکتر جعفر صادقی تشکر می‌کنم که مطمئناً بدون راهنمایی‌های ارزشمند، زحمات بی‌دریغ، تشویق و صبوری پدران ایشان این کار صورت نمی‌گرفت. همچنین از پدر و مادر مهربان و فداکارم که در هر شرایطی حامی و پشتیبانم بودند و در هر زمانی مهر و محبتشان مایه دلگرمی و دعای خیرشان بدرقه‌ی راهم بوده، از صمیم قلب سپاسگذارم. از همسر عزیزم که در این مدت صبورانه مرا یاری نمود و کمک بی‌دریغش در تنظیم و ویرایش متن، موجب ارائه هرچه بهتر پایان‌نامه گردید، صمیمانه سپاسگذارم.

از دکتر توکلی برای همفکری و از همه‌ی اساتید محترم و دوستان گرانقدر که کمک‌شان موجب پیش‌برد این پایان‌نامه شد تشکر فراوان می‌کنم.

## چکیده:

سیستم‌های پیل سوختی کلید تامین انرژی پاک و مطمئن بر پایه هیدروژن و الکتریسته است. در این میان پیل سوختی هیدروژنی به دلیل کار در دمای پایین عملیاتی، دانسیته توان بالا و حجم محدود بیشتر از انواع پیل‌های سوختی مورد توجه قرار گرفته است. در این پایان‌نامه مدل دینامیکی پیل سوختی هیدروژنی براساس معادلات تئوری و تجربی برای پیش‌بینی هر دو حالت آرام و گذرا شبیه‌سازی شده است و در ادامه به کنترل پیل سوختی برای بدست آوردن پاسخی سریع و آرام پرداخته است.

سه مسئله مهم کنترلی در مورد پیل سوختی هیدروژنی مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا کنترل تامین اکسیژن با هدف مینیمم کردن اختلاف فشار دو طرف غشا انجام شد. توجه بیشتر به کنترل تامین اکسیژن با طراحی الگوریتم‌های متفاوت کنترلی با هدف پرهیز از کمبود اکسیژن، تضمین سطح ایمنی  $H_2$  و پاسخ‌گذاری سریع برای تامین اکسیژن در برابر تغییرات بار ناگهانی صورت گرفت. در قسمت سوم به کنترل دما با هدف تنظیم سیستم در دمای مشخص توسط کنترل‌کننده با اختتام انتگرال‌گیر انجام شد.

سیستم کنترلی براساس مدل خطی کنترلی طراحی شد. پارامترهای کنترل‌کننده برپایه معیار ITAE توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم شد. حساسیت سیستم نیز توسط معیار  $M_s$  به‌عنوان یکی از پارامترهای بررسی تنظیم مناسب سیستم برای هر یک از پارامترهای کنترل‌کننده محاسبه شد.

**کلمات کلیدی:** پیل سوختی، شبیه‌سازی، کنترل، تنظیم، ITAE،  $M_s$

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه.....
۲	۱-۱ نیاز به سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر.....
۵	۲-۱ اهداف پایان نامه.....
۶	۳-۱ سازمان‌دهی فصل‌ها.....
۸	فصل دوم: مروری بر سیستم‌های پیل سوختی.....
۹	۱-۲ سیستم پیل سوختی هیدروژنی.....
۹	۱-۱-۲ ساختار پیل سوختی هیدروژنی.....
۱۱	۲-۱-۲ مزیت‌ها و معایب پیل سوختی هیدروژنی.....
۱۳	۳-۱-۲ تاریخچه پیل سوختی.....
۱۵	۴-۱-۲ ولتاژ پیل سوختی.....
۱۶	۵-۱-۲ زیر سیستم‌های پیل سوختی.....
۱۸	۲-۲ کنترل پیل سوختی هیدروژنی.....
۱۸	۱-۲-۲ توان خروجی.....
۱۸	۲-۲-۲ کنترل تامین هیدروژن.....
۱۹	۳-۲-۲ کنترل ضریب دسترسی به اکسیژن.....
۲۰	۴-۲-۲ کنترل پذیری سیستم.....
۲۰	۵-۲-۲ بهبود بازدهی سیستم.....
۲۱	۳-۲ کنترل فرآیند.....
۲۱	۱-۳-۲ مختصری از تاریخچه کنترل PID.....
۲۲	۲-۳-۲ تنظیم کنترل PID.....

۳۳	..... فصل سوم: مدل سازی پیل سوختی هیدروژنی
۳۴	..... ۱-۳ ولتاژ پیل سوختی
۳۴	..... ۱-۱-۳ ولتاژ مدار باز پیل سوختی
۳۷	..... ۲-۱-۳ افت اکتیواسیون
۳۹	..... ۳-۱-۳ افت اهمی
۴۱	..... ۴-۱-۳ افت غلظت
۴۳	..... ۲-۳ موازنه جرم
۴۳	..... ۱-۲-۳ موازنه جرم سمت کاتد
۴۶	..... ۲-۲-۳ موازنه جرم سمت آند
۴۹	..... ۳-۳ موازنه حرارتی کل پیل سوختی
۵۱	..... ۴-۳ کمپرسور
۵۱	..... ۵-۳ فن خنک کن
۵۳	..... ۶-۳ تاثیر شرایط عملیاتی بر نمودار پلاریزاسیون
۵۳	..... ۱-۶-۳ فشار عملیاتی سیستم
۵۵	..... ۲-۶-۳ دما عملیاتی سیستم
۵۸	..... ۳-۶-۳ استوکیومتری هوای ورودی
۶۰	..... فصل چهارم: کنترل و آنالیز پیل سوختی هیدروژنی
۶۱	..... ۱-۴ کنترل تامین هیدروژن
۶۴	..... ۲-۴ کنترل تامین اکسیژن
۶۶	..... ۱-۲-۴ کنترل PID با فیدبک منفی
۷۰	..... ۲-۲-۴ وزن دهی با ورودی مرجع
۷۲	..... ۳-۲-۴ سیستم با دو درجه آزادی
۷۴	..... ۴-۲-۴ کنترل کننده مربع خطا
۷۶	..... ۳-۴ کنترل دما



۸۴	..... فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات برای کارهای آینده.....
۸۵	..... ۱-۵ نتایج کلی.....
۸۶	..... ۲-۵ پیشنهادات برای کارهای آینده.....
	..... مراجع.....
	..... پیوست‌ها.....
	..... پیوست (الف) - شبیه‌سازی پیل سوختی هیدروژنی در محیط سیمولینک MATLAB.....
	..... پیوست (ب) - تنظیم کنترل‌کننده‌ها براساس معیار ITAE توسط الگوریتم ژنتیک.....
	..... پیوست (ج) - محاسبه حساسیت سیستم حلقه بسته در حوزه زمان.....

## فهرست جدول ها

صفحه	عنوان جدول
۴	جدول ۱-۱ تخمین هزینه سیستم‌های متفاوت پیل سوختی در بلند مدت
۳۷	جدول شماره ۱-۳ آنالیز و آنالیز تشکیلی استاندارد برای واکنش‌دهنده‌ها و محصول پیل سوختی
۵۲	جدول ۲-۳ مقادیر در نظر گرفته در مدل ارائه شده
۷۶	جدول ۱-۴ پارامترهای ارزیابی پاسخ گذرا و پاسخ به ورودی مرجع کنترل‌کننده‌های متفاوت
۷۶	جدول ۲-۴ معیار ITAE و حساسیت کنترل‌کننده‌های متفاوت

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان شکل
۲	شکل ۱-۱ انرژی اولیه کل جهان از ۱۹۷۱-۲۰۰۶ بوسیله سوخت (دیگر سوخت شامل: زمین گرمایی، خورشید، باد، حرارت و غیره)
۳	شکل ۱-۲ نفت کشف شده در طی دوره ۱۹۳۰-۲۰۰۰
۴	شکل ۱-۳ آلودگی جهانی CO <sub>2</sub> بوسیله سوخت از ۱۹۷۱-۲۰۰۶
۱۰	شکل ۱-۲ شماتیک پیل سوختی
۱۱	شکل ۲-۲ اجزای متفاوت پیل سوختی
۱۴	شکل ۲-۳ شماتیک باتری Grove
۲۳	شکل ۲-۴ سازمان دهی روش های تنظیم کنترل کننده های PID
۲۳	شکل ۲-۵ طبقه بندی قانون های تنظیم کنترل کننده های PID براساس رویکرد محاسباتی
۲۵	شکل ۲-۶ تاثیر پارامترهای کنترل کننده PID در نمودار ناپکوئیست
۲۶	شکل ۲-۷ بلوک دیاگرام یک فرآیند تحت فیدبک رله
۲۹	شکل ۲-۸ تعیین مشخصات پاسخ پله در روش پاسخ پله ای زیگلر-نیکولز
۳۰	شکل ۲-۹ ساختار ساده قطب-صفر برای یک سیستم فیدبک ساده
۳۱	شکل ۲-۱۰ تعریف حساسیت ( $M_s$ )، حاشیه بهره ( $A_m$ ) و حاشیه فاز ( $\phi_m$ ) بر روی نمودار ناپکوئیست
۳۸	شکل ۳-۱ نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی با در نظر گرفتن سه منطقه افت ولتاژ در آن
۳۹	شکل ۳-۲ تاثیر تغییرات چگالی تبادل کننده یونی
۳۹	شکل ۳-۳ تاثیر ضریب بار انتقالی در افت اکتیواسیون
۴۲	شکل ۳-۴ تاثیر عدد شروود در نمودار پلاریزاسیون
۵۲	

۳-۵ نمودار پلاریزاسیون مدل ارائه شده در فشار عملیاتی ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۳۰۸ درجه

کلوین

- ۵۴ شکل ۳-۶ تاثیر فشار بر روی نمودار پلاریزاسیون
- ۵۴ شکل ۳-۷ تاثیر فشار بر روی ولتاژ مدار باز
- ۵۵ شکل ۳-۸ تاثیر فشار بر روی افت غلظت
- ۵۶ شکل ۳-۹ تاثیر دما بر روی نمودار پلاریزاسیون
- ۵۶ شکل ۳-۱۰ تاثیر دما بر روی ولتاژ مدار باز
- ۵۷ شکل ۳-۱۱ تاثیر دما بر روی افت اکتیواسیون
- ۵۷ شکل ۳-۱۲ تاثیر دما برافت اهمی
- ۵۸ شکل ۳-۱۳ تاثیر دما بر روی افت غلظت
- ۵۹ شکل ۳-۱۴ تاثیر استوکیومتری هوای ورودی بر نمودار پلاریزاسیون
- ۵۹ شکل ۳-۱۵ تاثیر استوکیومتری هوا بر افت غلظت
- ۶۱ شکل ۴-۱ کنترل نسبی بر پایه اختلاف فشار سمت کاتد و آند
- ۶۲ شکل ۴-۲ نمودار تغییرات فشار نسبت به ورودی مرجع سمت کاتد
- ۶۲ شکل ۴-۲ دنبال کنندگی فشار سمت آند نسبت به فشار سمت کاتد
- ۶۳ شکل ۴-۳ به ترتیب تغییر ضریب  $K$  شیر خروجی آند و تاثیر آن بر فشار سمت آند
- ۶۴ شکل ۴-۴ نمودار بلوکی سیستم کنترل جریان هوای ورودی به پیل سوختی
- ۶۶ شکل ۴-۵ نمودار مکان هندسی کمپرسور
- ۶۷ شکل ۴-۶ نمودار بود تابع تبدیل کمپرسور ارائه شده
- ۶۸ شکل ۴-۷ نمودار نایکوئیست تابع تبدیل کمپرسور ارائه شده
- ۶۸ شکل ۴-۸ نمودار مکان هندسی ریشه های سیستم حلقه بسته
- ۶۹ شکل ۴-۹ نمودار بود سیستم حلقه بسته
- ۶۹ شکل ۴-۱۰ نمودار نایکوئیست سیستم حلقه بسته
- ۷۰ شکل ۴-۱۱ پاسخ گذرا و ورودی مرجع با کنترل کننده PID
- ۷۱ شکل ۴-۱۲ پاسخ گذرا و پاسخ به ورودی مرجع به وزن دهی ورودی مرجع

- شکل ۴-۱۳ پاسخ گذرا پاسخ به ورودی مرجع کنترل کننده PID با وزن‌دهی ورودی مرجع با  $c=0$  ۷۲
- شکل ۴-۱۴-۱ پاسخ گذرا و ورودی مرجع با کنترل کننده با دو درجه آزادی ۷۳
- شکل ۴-۱۴-۲ پاسخ گذرا و ورودی مرجع با کنترل کننده با دو درجه آزادی به همراه وزن‌دهی ورودی مرجع ۷۳
- شکل ۴-۱۵ پاسخ گذرا و پاسخ به ورودی مرجع به کنترل کننده PID به همراه مربع خطا ۷۴
- شکل ۴-۱۶ پاسخ گذرا و پاسخ به ورودی مرجع به کنترل کننده PID به همراه مربع خطا و وزن‌دهی به ورودی مرجع ۷۵
- شکل ۴-۱۷ به ترتیب سیگنال کنترلی فن و پاسخ سیستم به کنترل کننده PI ۷۷
- شکل ۴-۱۸ سیگنال جزء انتگرالی با کنترل کننده PI ۷۹
- شکل ۴-۱۹ نمودار بلوکی کنترل کننده با اختتام انتگرال گیر ۷۹
- شکل ۴-۲۰ به ترتیب سیگنال کنترلی و پاسخ سیستم با روش محاسبه معکوس ۸۰
- شکل ۴-۲۱ به ترتیب از بالا بار الکتریکی به پیل سوختی، ضریب دسترسی به اکسیژن براساس بار الکتریکی، تغییرات فشار در سمت آند و کاتد، تغییر ولتاژ پیل سوختی، جریان هوای ورودی به پیل سوختی و سیگنال کنترلی کمپرسور ۸۳

## فهرست علائم

نشانه	علامت
ثابت جهانی گازها	$R(J.(Kg.K)^{-1})$
دما	$T(K)$
عدد فارادی	$F(coulombs/gmol$ $electron)$
پتانسیل	$E(V)$
ولتاژ	$V$
انرژی گیبس	$\Delta G(J.mol^{-1})$
فشار	$P(KPa)$
اختلاف آنتالپی	$\Delta H(J.mol^{-1})$
اختلاف انتروپی	$\Delta S(J.(mol.K)^{-1})$
ظرفیت حرارتی	$C_p(J.(mol.k)^{-1})$
آنتالپی	$h(J.mol^{-1})$
آنتروپی	$s(J.(mol.K)^{-1})$
چگالی جریان	$i(A.cm^{-2})$
چگالی جریان تبادل کننده	$i_o(A.cm^{-2})$
ضخامت	$t(m)$
ضریب فعالیت	$A$
چگالی جریان محدود	$i_L(A.cm^{-2})$
غلظت	$C(mol.m^{-3})$
ضخامت	$\delta(m)$

ضریب تاثیر	$D(m^2.s^{-1})$
عدد شروود	Sh
جرم	m(gr)
سرعت جرمی	$m^0(gr.s^{-1})$
جرم ملکولی	$M(kg.mol^{-1})$
حجم	$V(m^3)$
دبی	$Q(mol.min^{-1})$
ضریب مولی	R
رطوبت نسبی	RH(%)
اسنوکیومتری	S
تعداد	N
ضریب باز وبسته شدن شیر	$K(kg.(KPa.s)^{-1})$
توان	P(W)
زمان	t(sec)
آمپر	I(A)
سطح	$A(m^2)$
خطا	E
خروجی	Y
ضریب بار الکتریکی	$\alpha$
هدایت الکتریکی	$\sigma$
ضریب دسترسی	$\lambda$
تخلخل	$\phi$
ضریب تشعش	$\epsilon$
ثابت استفان بولتزمن	$\sigma(w.m^{-2}.k^{-4})$

زیرنویس ها و بالا نویس ها

گاز	g
مایع	l
مرجع	o
هیدروژن	H <sub>2</sub>
اکسیژن	O <sub>2</sub>
آب	H <sub>2</sub> O
نیتروژن	N <sub>2</sub>
اکتیواسیون	act
اهمی	ohm
غلظت	conc
تعداد الکترون	n
غشاء	m
آب	w
اشباع	sat
نفوذ	eff
دوتایی	ij
کاتد	ca
آند	an
ورودی	in
خروجی	out
توده	fc
تولید	gen
سل	cell
اشباع آب	vs
واکنش	reac



تشعش	rad
طبیعی	nat
اجباری	forc
جابجایی	conv
نقطه مرجع	sp

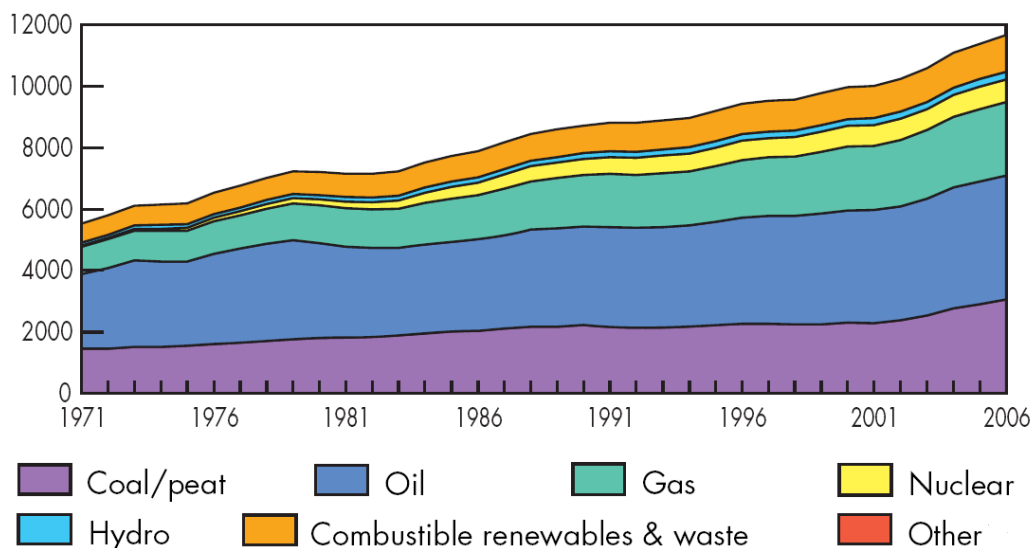
## فصل اول

### مقدمه

### ۱-۱ نیاز به سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر

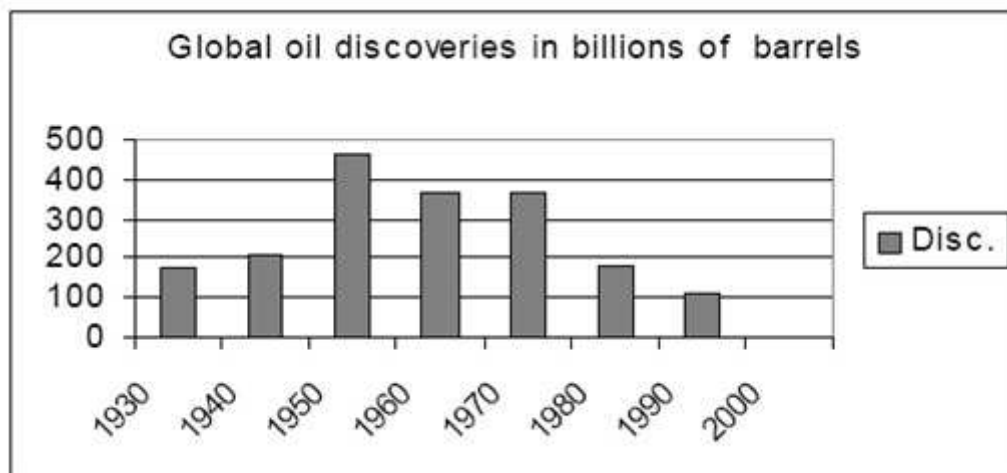
محیط زیست و انرژی از مسائل مهم کشورها در قرن ۲۱ می‌باشد. در حال حاضر با در نظر گرفتن سطح برداشت جهانی از ذخایر نفت، ذخیره نفت تنها برای ۴۰ سال آینده کافی است [1]. به دلیل رشد سریع اقتصاد جهانی و افزایش مصرف نفت به طوری که کل مصرف انرژی اولیه از 6115Mton در سال ۱۹۷۳ به 11741Mton در سال ۲۰۰۶ افزایش یافته‌است (شکل ۱-۱) [2]. و کاهش مقدار کشف نفت در طی دهه ۱۹۹۰ نسبت به دهه ۱۹۵۰ (شکل ۱-۲) [1] می‌توان گفت ذخایر نفت در زمانی کوتاه‌تری به اتمام خواهد رسید. علاوه بر این میزان آلودگی CO<sub>2</sub> در سال ۱۹۷۳ از 15640Mton به 28003Mton در سال ۲۰۰۶ رسیده‌است (شکل ۱-۳).

مهم‌ترین سوخت جایگزین نفت، گاز طبیعی و ذغال سنگ می‌باشد. در مقایسه با نفت، زغال سنگ ارزان‌تر و دارای منابع بسیار متنوع است. همچنین ذخایر جهانی ذغال سنگ با احتساب میزان مصرف فعلی برای ۱۵۶ سال آینده کافی است. اما مقدار آلودگی CO<sub>2</sub> به ازای هر میلی‌ژول، دو برابر بیشتر از گاز طبیعی و هزینه کاهش این آلودگی پرهزینه و گران است. این موضوعات (کمبود سوخت و آلودگی محیط زیست) دلایل مهمی برای استفاده از منابع جدید (انرژی تجدیدپذیر) است. پیل‌های سوختی کلید تامین انرژی پاک و مطمئن بر پایه هیدروژن و الکتروسیته‌اند [1]. با در نظر گرفتن این دلایل تکنولوژی پیل سوختی برای تولید جریان



شکل ۱-۱ انرژی اولیه کل جهان از سال ۱۹۷۱-۲۰۰۶ بوسیله سوخت (دیگر سوخت شامل: زمین گرمایی،

خورشید، باد، حرارت و غیره) [2]



شکل ۱-۲ نفت کشف شده در طی دوره ۱۹۳۰-۲۰۰۰ [1]

الکتریسیته در بسیاری عرصه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌است. این کاربردها به سه بخش بزرگ زیر تقسیم می‌شوند [3]:

- بخش قابل حمل

- بازار حمل‌ونقل

- بخش ساکن

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش قیمت سوخت و قوانین سخت‌گیرانه درباره کنترل آلودگی هوا مطالعه در مورد پیل سوختی در زمینه کاربرد در بازار حمل‌ونقل بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است [3]. زیرا یکی از مزیت‌های مهم وسایل نقلیه پیل سوختی در مقابل وسایل نقلیه با موتور احتراق داخلی، تولید بازدهی بیشتر و کاهش آلودگی است [4].

پیل‌های سوختی را می‌توان براساس سوخت و اکسیدکننده، نوع الکترولیت و دمای عملیاتی طبقه‌بندی کرد. رایج‌ترین طبقه‌بندی پیل‌های سوختی براساس نوع الکترولیت می‌باشد که شامل [5]: پیل سوختی غشای پلیمری (PEMFC)، پیل سوختی آلکلین (AFC)، پیل سوختی فسفریک اسید (PAFC)، پیل سوختی مولتن کربنات (MCFC)، پیل سوختی اکسید جامد دمای میانی (ITSOFC) و پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای (TSOFC) است. این پیل‌های سوختی دارای دمای عملیاتی