

۱۵۹۳

پیل‌های سوختی با غشاء مبادله‌کننده پروتون (نظری و عملی)

پدیدآورنده

فرانو باربیر

استاد مهندسی مکانیک
دانشگاه ایلینوی، کربواسی

برگردانندگان

محمد ژبانی

دانشیار شیمی دانشگاه صنعتی اصفهان

جلال جلیلی
دکتری شیمی

سمیه مجیدی
دکتری شیمی

علی جعفریان
دکتری مکانیک



انشارات دانشگاه صنعتی اصفهان

گروه فنی و مهندسی ۶۳

شماره کتاب ۱۵۲

پیل های سوختی با غشاء مبادله کننده پرتون (نظری و عملی)

پدیدآورنده	فرانو باریبر
برگردانندگان	محمد ژبانی، سمیه مجیدی، علی جعفریان، جلال جلیلی
ویراستار علمی	معصومه جواهری
ویراستار ادبی	سروش نبوی
صفحه آرا	منا مرتضایی
طراح جلد	مرضیه خردمند
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
ناشر	انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ دوم	زمستان ۱۳۹۷
شمارگان	جلد ۵۰۰
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۸۲۵۷-۱۳-
قیمت	۲۵۰۰۰ ریال

سرشناسه	باربیر، فرانو، ۱۹۵۴ - م. Barbi, Fran
عنوان و نام پدیدآور	پیل های سوختی با غشاء مبادله کننده پرتون (نظری و عملی) / پدیدآورنده فرانو باریبر؛ برگردانندگان محمد ژبانی ... [و دیگران]؛ ویراستار علمی معصومه جواهری.
مشخصات نشر	اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، انتشارات ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	هفته، ۴۴۵ ص: مصور، جدول، ۱۵۲ کی. م. و مهندسی؛ ۶۳.
فروست	دانشگاه صنعتی اصفهان، انتشارات؛ ۱۵۲ کی. م. و مهندسی؛ ۶۳.
شابک	۲۷۰۰۰۰ ریال 4-13-8257-600-978
وضعیت فهرست نویسی	فیا
یادداشت	عنوان اصلی: PEA fuel cells : theory and practice, 2005
یادداشت	برگردانندگان محمد ژبانی، علی جعفریان، سمیه مجیدی، جلال جلیلی.
یادداشت	کتاب حاضر تحت عنوان "پیل های سوختی پلیمری: اصول و کاربردها" در مجموعه مجسم شاکری، امید غلامی و سیدجواد ایمن توسط انتشارات نوروزی در سال ۱۳۹۴ فیا دریافت کرده است.
یادداشت	واژه نامه.
یادداشت	کتابنامه.
موضوع	Fuel cells : پیل های سوختی
موضوع	Polyelectrolytes : پلی الکترولیت ها
موضوع	Proton magnetic resonance spectroscopy : طیف نمایی تشدید مغناطیسی پروتونی
شناسه افزوده	ژبانی، محمد، ۱۳۵۴ - مترجم
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی اصفهان. انتشارات
رده بندی کنگره	۱۳۹۵ ۹ب۲/TK2۹۳۱
رده بندی دیویی	۶۲۱/۳۱۲۴۲۹
شماره کتابشناسی ملی	۴۶۲۸۴۳۹

حق چاپ برای انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان - انتشارات - کدپستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، تلفن: ۳۳۹۱۲۹۵۲ (۰۳۱) ۳۳۹۱۲۵۵۲، برای خرید اینترنتی کلیه کتاب های منتشره انتشارات می توانید به وبگاه <http://publication.iut.ac.ir> مراجعه و یا مستقیماً از کتابفروشی انتشارات واقع در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان (تلفن ۳۳۹۱۳۹۵۲) خریداری فرمایید.

پیشگفتار

سوخت‌های فسیلی بالغ بر ۸۰٪ انرژی مورد نیاز جهانی را تأمین می‌کنند که ادامه روند استفاده از آنها به در مشکل کلیدی منتهی می‌شود. مشکل اول محدود بودن آنهاست که دیر یا زود به اتمام می‌رسد. بر اساس تخمین شرکت‌های نفتی، تولید سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قدیمی، نفت و گاز ابعی در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به بیشینه مقدار خود خواهد رسید و سپس کاهش پیدا خواهد کرد. این بدان معنی است که بین عرضه و تقاضا سوخت‌های مایع شکافی ایجاد خواهد شد که در حدود سال ۲۰۱۵ آغاز می‌شود. مشکل دوم این است که سوخت‌های فسیلی مسئول زیست‌محیطی جدی را موجب می‌شوند مانند گرم شدن جهانی، تغییرهای آب و هوایی، ذوب شدن یخ‌ها، بالا آمدن سطح آب دریاها، باران‌های اسیدی، آلودگی هوا، تخلیه گاز اوزن، آلودگی ناشی از نفت، تخریب زمین‌های کشاورزی و جنگل‌ها توسط استخراج سطحی زغال سنگ. برآورد شده است که هزینه تخریب‌های زیست‌محیطی جهانی در هر سال به حدود پنج تر یارد دلار برسد.

در اوایل دهه ۱۹۷۰ سیستم انرژی هیدروژنی به عنوان راه‌حلی برای این دو مشکل به هم پیوسته جهانی ارایه گردید. از آن به بعد، در ربع پایانی قرن ۲۰ به کمک کارهای تحقیق و توسعه در دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی در اقصی نقاط جهان پایه‌های سیستم انرژی هیدروژنی گذارده شد. از اوایل قرن حاضر، انتقال به اقتصاد هیدروژن آغاز شده است.

هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی مهم از ویژگی‌های بی نظیر برخوردار است. هیدروژن سبک‌ترین، پربازده‌ترین و پاک‌ترین سوخت‌ها است. یکی از خواص بی‌بدیل آن تولید الکتریسته به وسیله پیل‌های سوختی از طریق فرآیند الکتروشیمیایی است که بازده چنین تبدیلی بیشتر از بازده تولید انرژی مکانیکی از سوخت‌های فسیلی در موتورهای احتراق داخلی یا تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های حرارتی است. این ویژگی هیدروژن، پیل‌های سوختی هیدروژنی را به نیروی محرکه برگزیده برای شرکت‌های اتومبیل‌سازی تبدیل کرده است. به همین دلیل پیل سوختی به عنوان مولد برق در شرکت‌های تولید برق در آینده به کار گرفته خواهد شد. علت بیشتر بودن بازده پیل‌های سوختی هیدروژنی این است که آنها موتورهای

الکتروشیمیایی هستند، نه موتورهای حرارتی و به این ترتیب شامل محدودیت‌های چرخه کارنو نمی‌شوند. بنابراین، انتظار می‌رود در قرن حاضر، موتورهای حرارتی (یعنی موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های بخار و توربین‌های گازی) به وسیله پیل‌های سوختی و سوخت‌های فسیلی به وسیله هیدروژن جایگزین شوند.

پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده و هم‌اکنون نیز درباره انواع پیل‌های سوختی مانند پیل‌های سوختی قلیایی، پیل‌های سوختی با غشا تبادل پروتون (PEM)، پیل‌های سوختی اسید فسفریک، پیل‌های سوختی کربنات مذاب و پیل‌های سوختی اکسید جامد در حال انجام است. برخی از پیل‌های سوختی تجاری‌سازی شده‌اند، در حالی که برخی دیگر در حال تجاری شدن هستند. انتظار می‌رود که آنها تقریباً در هر وسیله یا دستگاه مصرف‌کننده انرژی از نیروگاه برق تا ماشین، خانه‌ها، رایانه‌های لپ‌تاب و گوشی‌های همراه به کار گرفته شوند. پیل‌های سوختی PEM ویژگی‌های مناسبی دارند. دمای عملکرد آنها پایین است و بنابراین اتلاف حرارتی، کاهش می‌یابد. همچنین، ابعاد کوچک و وزن کمی دارند که آنها را برای کاربردهای خودرویی و قابل حمل مناسب می‌سازد. به همین علت پیل‌های سوختی PEM، نیروی محرکه تمام اتوبوس‌ها و اتومبیل‌های هیدروژن تجاری شرکت‌های بزرگ را تأمین می‌کنند و هم اینکه در حدود ۹۰٪ از کارهای تحقیقاتی، توسعه‌ای پیل‌های سوختی در زمینه پیل سوختی PEM صورت می‌گیرد. بنابراین، مهندسان انرژی امروز و آینده، باید به طور کامل پیل‌های سوختی PEM را بشناسند، درست مانند مهندسان انرژی دیروز که اطلاعات کاملی از موتورهای حرارتی داشتند.

نویسنده این کتاب، پیل‌های سوختی PEM: تئوری و کاربرد، دکتر فرانو باربیر^۱، دانشمندی توانا در زمینه انرژی هیدروژنی است. او پس از دریافت مدرک دکترای در زمینه انرژی هیدروژنی، در کارهای تحقیق و توسعه‌ای در کارخانه‌های پیل سوختی حضور مؤثری داشته است. او همچنین، به نیاز برای آموزش مهندسان در زمینه فن‌آوری‌های پیل سوختی واقف بوده است. بنابراین، در دو دانشگاه در سطح آموزش عالی به توسعه و آموزش دروس درباره پیل سوختی پرداخته است. بنابراین، او واجد شرایط نوشتن کتابی ارزشمند درباره پیل‌های سوختی PEM است. کتاب، از مبانی پیل‌های سوختی PEM آغاز می‌شود و سپس مواد، عملیات، مدلسازی، طراحی و کاربردها را در برمی‌گیرد. این کتاب، کتابی جامع بوده، خوب نگاشته شده و نگاه گسترده‌ای به پیل‌های سوختی PEM دارد. بنابراین، من این کتاب را درباره

^۱—Dr. Frano Barbir

پیل های سوختی PEM به همه دانشجویان مهندسی مکانیک، برق، شیمی، صنعتی، محیطی و انرژی که تبدیل انرژی و کاربرد انرژی را مطالعه می کنند، توصیه می کنم. با وجود چنین کتابی، کتابخانه هر مهندس و محقق که در زمینه تولید توان، مولدهای تولید برق وسیله نقلیه و واحدهای برق سیستم های قابل حمل، اشتغال دارد، کامل تر خواهد شد.

دکتر ت. نجات وزیرافلو^۱

رئیس انیدو^۲-مرکز بین المللی فن آوری های انرژی هیدروژنی

استانبول، ترکیه

(فوریه ۲۰۰۵)

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۱-۱	پیل سوختی چیست؟
۵	۲-۱ تاریخچه مناسبری از پیل سوختی
۹	۳-۱ انواع پیل های سوختی
۱۱	۴-۱ پیل سوختی هیدروژن کار می کند؟
۱۳	۵-۱ چرا به پیل های سوختی نیاز داریم؟
۱۵	۶-۱ کاربردهای پیل های سوختی
۱۹	منابع مورد استفاده
۲۱	۲: اصول شیمیایی و ترمودینامیک پیل سوختی
۲۱	۱-۲ واکنش های اصلی
۲۱	۲-۲ گرمای واکنش
۲۲	۳-۲ ارزش حرارتی بالا و پایین سوخت هیدروژن
۲۳	۴-۲ کار الکتریکی تئوری
۲۴	۵-۲ پتانسیل تئوری پیل سوختی
۲۵	۶-۲ اثر دما
۲۸	۷-۲ بازده تئوری پیل سوختی
۳۰	۸-۲ افسانه بازده کارنو
۳۲	۹-۲ اثر فشار
۳۳	۱۰-۲ خلاصه
۳۵	مسائل
۳۵	پرسش ها
۳۷	منابع مورد استفاده

۳۹	۳. الکتروشیمی پیل سوختی
۳۹	۱-۳ سیستیک الکتروود
۳۹	۱-۱-۳ سرعت واکنش
۴۰	۲-۱-۳ ثابت‌های واکنش: ضریب انتقال
۴۱	۳-۱-۳ رابطه جریان و پتانسیل - معادله باتلر-ولمر
۴۳	۴-۱-۳ دانسیته جریان مبادله
۴۴	۲-۳ افت ولتاژ
۴۶	۱-۲-۳ پلاریزاسیون فعال‌سازی
۴۸	۲-۳ افت ولتاژ ناشی از جریان‌های داخلی و عبور واکنش‌دهنده‌ها از غشا
۵۰	۳-۲-۳ افت ولتاژ (مقاومتی) اهمی
۵۱	۴-۲-۳ پلاریزاسیون اکتی
۵۳	۳-۳ منحنی پتانسیل پلاریزاسیون پیل
۵۵	۴-۳ توزیع پتانسیل در طول سل سوختی
۵۶	۵-۳ حساسیت پارامترها در نسبتی پلاریزاسیون
۵۸	۱-۵-۳ اثر ضریب انتقال / شیب تاف
۵۹	۲-۵-۳ اثر دانسیته جریان مبادله
۶۰	۳-۵-۳ اثر عبور هیدروژن از غشا و جریان‌های داخلی
۶۱	۴-۵-۳ اثر مقاومت داخلی
۶۱	۵-۵-۳ اثر دانسیته جریان حدی
۶۱	۶-۵-۳ فشار عملیاتی پیل
۶۲	۷-۵-۳ هوا در مقابل اکسیژن
۶۳	۸-۵-۳ اثر دمای عملیاتی
۶۴	۶-۳ بازده پیل سوختی
۶۵	۷-۳ مفهوم و کاربرد منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی
۶۶	۱-۷-۳ سایر منحنی‌های به دست‌آمده از منحنی پلاریزاسیون
۶۸	۲-۷-۳ تقریب خطی منحنی پلاریزاسیون
۷۳	مسائل
۷۴	پرسش‌ها
۷۶	منابع مورد استفاده

۴: اجزا، ویژگی‌های مواد و فرایندهای اصلی پیل سوختی ۷۷

۱-۴ شرحی بر پیل سوختی ۷۷

۲-۴ غشا ۷۹

۱-۲-۴ جذب آب ۸۱

۲-۲-۴ خواص فیزیکی ۸۲

۳-۲-۴ هدایت پروتونی ۸۳

۴-۲-۴ انتقال آب ۸۶

۵-۲-۴ تراوایی گاز ۹۰

۳-۴ الکتروود ۹۳

۴-۴ لایه نفوذ گاز ۹۸

۱-۴-۴ فراوایی‌ها و پخش‌ها ۱۰۰

۲-۴-۴ تخلخل ۱۰۱

۳-۴-۴ رسانایی الکتریکی ۱۰۲

۴-۴-۴ قابلیت تراکم‌پذیری ۱۰۳

۵-۴-۴ تراوایی ۱۰۳

۵-۴ صفحه‌های دوقطبی ۱۰۴

۱-۵-۴ مواد ۱۰۶

۲-۵-۴ ویژگی‌ها ۱۰۸

مسائل ۱۱۴

پرسش‌ها ۱۱۵

منابع مورد استفاده ۱۱۷

۵: شرایط عملیاتی پیل سوختی ۱۲۱

۱-۵ فشار عملیاتی ۱۲۱

۲-۵ دمای عملیاتی ۱۲۲

۳-۵ سرعت جریان واکنش‌گرها ۱۲۴

۴-۵ رطوبت واکنش‌گرها ۱۳۰

۵-۵ موازنه جرم در پیل سوختی ۱۳۸

۱-۵-۵ سرعت جریان‌های ورودی ۱۳۸

۲-۵-۵ سرعت جریان‌های خروجی ۱۳۹

۱۴۲.....	۵-۶ موازنه انرژی پیل سوختی.....
۱۴۷.....	مسائل.....
۱۴۸.....	پرسش‌ها.....
۱۵۰.....	منابع مورد استفاده.....
۱۵۱.....	۶: طراحی توده پیل سوختی.....
۱۵۱.....	۱-۶ تعیین اندازه توده پیل سوختی.....
۱۵۵.....	۲-۶ پیکربندی توده پیل سوختی.....
۱۶۰.....	۳-۶ توزیع کنواخت واکنش‌دهنده‌ها در هر یک از پیل‌ها.....
۱۶۵.....	۴-۶ توزیع کنواخت واکنش‌دهنده‌ها در پیل‌ها.....
۱۶۵.....	۱-۴-۶ شکل میدان جریان.....
۱۶۶.....	۲-۴-۶ جهت میدان جریان.....
۱۶۷.....	۳-۴-۶ پیکربندی کانال‌ها.....
۱۷۱.....	۴-۴-۶ شکل، ابعاد و اشیاء کانال‌ها.....
۱۷۵.....	۵-۴-۶ افت فشار در میدان جریان.....
۱۸۲.....	۵-۶ حذف گرما از توده پیل سوختی.....
۱۸۳.....	۱-۵-۶ تعادل حرارتی توده پیل سوختی.....
۱۸۵.....	۲-۵-۶ هدایت حرارتی.....
۱۸۹.....	۳-۵-۶ حذف گرما به صورت فعال.....
۱۹۳.....	۴-۵-۶ گرمای دفع‌شده از توده پیل سوختی توسط فرآیندهای تابش و همرفت طبیعی.....
۱۹۵.....	۵-۵-۶ روش‌های دیگر در سیستم خنک‌کاری توده پیل سوختی.....
۲۰۰.....	۶-۶ بست‌ها در توده پیل سوختی.....
۲۰۴.....	مسائل.....
۲۰۵.....	پرسش‌ها.....
۲۰۷.....	منابع مورد استفاده.....
۲۱۱.....	۷: مدل‌سازی پیل سوختی.....
۲۱۳.....	۱-۷ تئوری و معادله‌های ساختاری.....
۲۱۳.....	۱-۱-۷ بقای جرم.....
۲۱۴.....	۲-۱-۷ بقای مومنتوم.....
۲۱۴.....	۳-۱-۷ بقای انرژی.....

۲۱۷.....	۴-۱-۷ بقای اجزا
۲۱۹.....	۵-۱-۷ بقای بار الکتریکی
۲۲۱.....	۲-۷ دامنه مدل سازی
۲۲۳.....	۳-۷ نمونه هایی از مدل سازی
۲۲۴.....	۱-۳-۷ مدل یک بعدی داخل غشا (برناردی - وریاگ)
۲۳۰.....	۲-۳-۷ مدل یک بعدی لایه کاتالیست (یولیو)
۲۳۳.....	۳-۳-۷ مدل دوبعدی فوق کانالی (جنگ و همکاران)
۲۳۶.....	۴-۳-۷ مدل دوبعدی در طول کانال (گورو و همکاران)
۲۴۳.....	۵-۳-۷ مدل ای سه بعدی
۲۴۵.....	۴-۷ نتیجه گیری
۲۴۷.....	مسائل
۲۴۷.....	پرسش ها
۲۵۰.....	منابع مورد استفاده
۲۵۳.....	۸: ابزارهای تشخیصی در پیل سوختی
۲۵۴.....	۱-۸ نمودار پلاریزاسیون
۲۵۷.....	۲-۸ تداخل جریان
۲۵۸.....	۳-۸ طیف بینی امپدانس AC
۲۶۲.....	۴-۸ افت فشار به عنوان یک ابزار تشخیصی
۲۶۶.....	۵-۸ نقشه برداری از دانسیته جریان
۲۶۹.....	۶-۸ عکس برداری نوترونی
۲۷۱.....	مسائل
۲۷۱.....	پرسش ها
۲۷۳.....	منابع مورد استفاده
۲۷۵.....	۹: طراحی سیستم پیل سوختی
۲۷۵.....	۱-۹ سیستم های هیدروژن-اکسیژن
۲۷۶.....	۱-۱-۹ منبع اکسیژن
۲۷۹.....	۲-۱-۹ منبع هیدروژن
۲۸۳.....	۳-۱-۹ مدیریت آب و گرما- یکپارچه سازی سیستم
۲۸۴.....	۲-۹ سیستم های هوا-هیدروژن

۲۸۵.....	۱-۲-۹ مخزن هوا.....
۲۹۳.....	۲-۲-۹ منبع منفعل هوا.....
۲۹۴.....	۳-۲-۹ منبع هیدروژن.....
۲۹۷.....	۴-۲-۹ طرح‌های مرطوب‌سازی.....
۳۰۰.....	۵-۲-۹ مدیریت آب و گرما- یکپارچه‌سازی سیستم.....
۳۰۵.....	۳-۹ سیستم‌های پیل سوختی با مبدل سوخت.....
۳۰۶.....	۱-۳-۹ فرآیندهای اولیه و واکنش‌ها.....
۳۰۷.....	۲-۳-۹ تبدیل با بخار آب.....
۳۱۰.....	۳-۳-۹ سایش جزئی و تبدیل اتوترمال.....
۳۱۷.....	۴-۳-۹ اثر تبدیل سوخت بر کارایی پیل سوختی.....
۳۲۲.....	۵-۳-۹ یکپارچه‌سازی سیستم.....
۳۲۸.....	۴-۹ زیرسیستم انرژی.....
۳۳۵.....	۵-۹ بازده سیستم.....
۳۴۰.....	مسائل.....
۳۴۱.....	پرسش‌ها.....
۳۴۳.....	منابع مورد استفاده.....
۳۴۵.....	۱۰: کاربردهای پیل سوختی.....
۳۴۵.....	۱-۱۰ وسایل حمل و نقل.....
۳۴۵.....	۱-۱-۱۰ اتومبیل‌ها.....
۳۵۹.....	۲-۱-۱۰ اتوبوس‌ها.....
۳۶۱.....	۳-۱-۱۰ وسایل نقلیه کاربردی.....
۳۶۱.....	۴-۱-۱۰ دوچرخه‌ها و اسکوترها.....
۳۶۲.....	۲-۱۰ نیرو محرکه ایستا.....
۳۶۳.....	۱-۲-۱۰ تقسیم‌بندی سیستم‌های پیل سوختی ایستا.....
۳۶۶.....	۲-۲-۱۰ پیکربندی سیستم.....
۳۶۸.....	۳-۲-۱۰ بازده کل پیل سوختی.....
۳۷۰.....	۴-۲-۱۰ جنبه‌های اقتصادی سیستم پیل سوختی.....
۳۸۱.....	۳-۱۰ توان پشتیبان.....
۳۸۸.....	۴-۱۰ پیل‌های سوختی برای توان قابل جابه‌جایی.....

۳۹۰	۵-۱۰ پیل های سوختی احیاکننده و کاربردها
۳۹۰	۱-۵-۱۰ ملاحظه های طراحی
۳۹۳	۱۰-۵-۲ کاربرد پیل سوختی احیاکننده
۳۹۸	مسائل
۳۹۹	پرسش ها
۴۰۱	منابع مورد استفاده
۴۰۵	۱۱: پیل های سوختی و اقتصاد هیدروژنی
۴۰۵	۱-۱۱ مقدمه
۴۰۵	۱۱-۲ تغییرات در منبع انرژی
۴۱۰	۱۱-۳ تاریخچه هیدروژن به عنوان سوخت
۴۱۲	۱۱-۴ سیستم انرژی هیدروژن
۴۱۴	۱۱-۵ فناوری های انرژی هیدروژنی
۴۱۴	۱۱-۵-۱ فناوری هایی برای تولید هیدروژن
۴۱۵	۱۱-۵-۲ فناوری های ذخیره ساز هیدروژن
۴۱۷	۱۱-۵-۳ فناوری های به کارگیری هیدروژن
۴۲۰	۱۱-۵-۴ جنبه های ایمنی هیدروژن به عنوان یک سوخت
۴۲۶	۱۱-۶ پیش بینی آینده
۴۳۰	۱۱-۷ گذر به اقتصاد هیدروژنی
۴۳۱	۱۱-۸ آیا انقلابی در انرژی در حال ظهور است؟
۴۳۳	۱۱-۹ نتیجه گیری
۴۳۴	منابع مورد استفاده
۴۳۷	واژه نامه