

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

فناوری‌های ذخیره هیدروژن

نویسندگان:

دکتر سید حیدر محمودی نجفی

دکتر شهره صفارزاده متین

اعضای هیأت علمی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

سرشناسه: محمودی نجفی، سیدحیدر، ۱۳۴۹ -
 عنوان و نام پدیدآور: فناوری‌های ذخیره هیدروژن/ نویسندگان سیدحیدر محمودی‌نجفی، شهره صفارزاده متین.
 مشخصات نشر: تهران: نشر ایده‌نگار، ۱۳۹۴.
 مشخصات ظاهری: ۳۸۶ ص: مصور، جدول، نمودار.
 شابک: ۷-۵-۹۵۴۶۶-۶۰۰-۹۷۸
 موضوع: هیدروژن -- ذخیره
 شناسه افزوده: صفارزاده متین، شهره، ۱۳۴۳ -
 رده‌بندی دیویی: ۶۶۵/۸۱
 رده‌بندی کنگره: ۳ ۱۳۹۴ م ۹ هـ / TP ۲۴۵
 وضعیت فهرست‌نویسی: فیبا
 شمار کتابشناسی ملی: ۴۱۴۹۰۲۲



..... نشر ایده‌نگار www.iNegar.ir

با همکاری سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

فناوری‌های ذخیره هیدروژن

نویسندگان: دکتر سید حیدر محمودی‌نجفی، دکتر شهره صفارزاده متین

ناظر چاپ: منیر غریبی

صفحه‌آرایی: نشر ایده‌نگار

طراح جلد: منیر غریبی

نوبت چاپ: اول، اسفند ۱۳۹۴

شمارگان: ۵۰۰

شابک: ۷-۵-۹۵۴۶۶-۶۰۰-۹۷۸

تکثیر تمام یا قسمتی از این اثر به هر شکل ممنوع است.

متخلفان به موجب قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

نشانی مرکز پخش: تهران، میدان فردوسی، خیابان ایرانشهر، پلاک ۱۶، طبقه سوم، واحد ۵

تلفن: ۲۱ و ۸۸۵۳۵۸۲۰ کدپستی: ۱۵۸۱۶۱۷۷۳۵ صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۷۶۴۳

۹	مقدمه ناشر
۱۱	دیباجه نویسندگان
۱۳	پیش گفتار

فصل اول : ذخیره سازی هیدروژن گازی و مایع

۱۹	۱-۱ مقدمه
۲۲	۱-۱-۱ معیارها و پارامترهای سامانه های ذخیره سازی
۴۲	۲-۱ گاز هیدروژن تحت فشار
۳۵	۱-۲-۱ مخازن ذخیره گاز هیدروژن تحت فشار
۵۴	۳-۱ هیدروژن مایع
۶۴	منابع

فصل دوم . ذخیره هیدروژن به صورت هیدرید

۶۷	۱-۲ مقدمه
۶۹	۲-۲ هیدریدهای فلزی و هیدریدهای کمپلکسی
۶۹	۱-۲-۲ بررسی مشخصه های مهم در کاربرد عملی
۷۲	۲-۲-۲ انواع هیدریدها از نظر ساختار شیمیایی
۸۱	۳-۲-۲ انواع هیدریدها از نظر کاربرد در ذخیره هیدروژن
۸۴	۴-۲-۲ کمپلکس های بوروهیدرید
۱۱۴	۳-۲ مکانیسم جذب هیدروژن
۱۱۶	۱-۳-۲ ترمودینامیک جذب
۱۲۲	۴-۲ مخازن هیدرید فلزی
۱۲۷	منابع

فصل سوم : ذخیره هیدروژن به صورت آمید و ایمید

۱۳۱	۱-۳ مقدمه
۱۳۲	۲-۳ لیتیم آمید/ایمید
۱۳۲	۱-۲-۳ روش های سنتز

۱۳۳.....	۲-۲-۳ ترمودینامیک و مکانیسم واکنش رهایش هیدروژن
۱۳۶.....	۳-۲-۳ سینتیک واکنش رهایش هیدروژن
۱۳۶.....	۳-۳ کلسیم آمید/ایمید
۱۳۸.....	۴-۳ سایر آمیدها/ایمیدها
۱۳۸.....	۱-۴-۳ لیتیم-منیزیم آمید/ایمید (Li-Mg-N-H)
۱۴۲.....	۲-۴-۳ لیتیم-کلسیم آمید/ایمید (Li-Ca-N-H)
۱۴۳.....	۳-۴-۳ لیتیم-آلومینیم آمید/ایمید (Li-Al-N-H)
۱۴۴.....	۵-۳ نتیجه‌گیری
۱۵۰.....	منابع

فصل چهارم : ذخیره هیدروژن در آمونیاک بوران و ترکیبات مرتبط

۱۵۳.....	۱-۴ مقدمه
۱۵۳.....	۲-۴ سنتز و خواص ترکیبی
۱۵۶.....	۳-۴ رهایش هیدروژن از آمونیاک بوران
۱۵۷.....	۱-۳-۴ تجزیه حرارتی در حالت جامد
۱۵۹.....	۲-۳-۴ تجزیه حرارتی در حالت محلول
۱۶۱.....	۳-۳-۴ تجزیه حرارتی با واکنش‌های کاتالیتیکی در حضور کاتالیست‌های فلزی
۱۶۲.....	۴-۳-۴ تجزیه حرارتی کاتالیتیکی با اسیدهای بورنشتند و یا لوئیس
۱۶۵.....	۵-۳-۴ تجزیه حرارتی در مایعات یونی
۱۷۳.....	۶-۳-۴ سامانه‌های ترکیبی از طریق الحاق آمونیاک بوران در مواد متخلخل
۱۷۵.....	۴-۴ ترکیبات فلز-آمیدوبوران
۱۷۹.....	۵-۴ سایر آمین بوران‌ها
۱۷۹.....	۱-۵-۴ N-متیل آمین بوران
۱۷۹.....	۲-۵-۴ آمونیاک تری‌بوران
۱۸۱.....	۳-۵-۴ هیدرازین مونوبوران و هیدرازین بیس بوران
۱۸۲.....	۴-۵-۴ گوانیدینیوم بوروهیدرید
۱۸۲.....	۵-۵-۴ آمونیوم بوروهیدرید
۱۸۳.....	۶-۵-۴ ترکیبات هتروسیکل بور-نیتروژن
۱۸۹.....	۶-۴ استفاده مستقیم از آمونیاک بوران در پیل سوختی

۷-۴	بازیابی سوخت مصرف‌شده آمونیاک بوران	۱۹۰
۸-۴	نتیجه‌گیری	۱۹۶
	منابع	۱۹۸

فصل پنجم: ذخیره هیدروژن به صورت ترکیبات آلی

۱-۵	مقدمه	۲۰۵
۲-۵	هیدریدهای آلی مایع	۲۰۵
۱-۲-۵	شرایط ذخیره هیدروژن در هیدریدهای آلی	۲۰۵
۲-۲-۵	نمونه پلی‌یک سامانه ذخیره و انتقال هیدروژن در هیدریدهای آلی	۲۲۰
۳-۲-۵	نتیجه‌گیری	۲۲۳
۳-۵	فولرین‌ها	۲۲۴
۱-۳-۵	شرایط ذخیره‌سازی هیدروژن در فولرین	۲۲۵
۲-۳-۵	نتیجه‌گیری	۲۳۴
	منابع	۲۳۵

فصل ششم: ذخیره‌سازی هیدروژن در شبکه‌های فلز-آلی

۱-۶	مقدمه	۲۴۱
۲-۶	سنتز شبکه‌های فلز-آلی	۲۴۳
۳-۶	مکانیسم جذب هیدروژن در شبکه‌های فلز-آلی	۲۵۱
۴-۶	روش‌های بهبود جذب هیدروژن در شبکه‌های فلز-آلی	۲۵۶
۵-۶	نتیجه‌گیری	۲۵۹
	منابع	۲۶۳

فصل هفتم: ذخیره‌سازی هیدروژن در ریزکره‌های شیشه‌ای

۱-۷	مقدمه	۲۶۹
۲-۷	تهیه ریزکره‌ها و ویژگی‌های آنها	۲۶۹
۳-۷	ارزیابی ذخیره‌سازی در ریزکره‌های شیشه‌ای	۲۷۴
۱-۳-۷	مدهای عملیاتی	۲۷۴
۲-۳-۷	نوآوری در تلفیق سامانه‌های ذخیره‌سازی با ریزکره‌ها	۲۸۰

۲۸۲.....	۴-۷ نتیجه‌گیری
۲۸۴.....	منابع

فصل هشتم: ذخیره‌سازی هیدروژن در نانوساختارهای کربنی

۲۸۷.....	۱-۸ مقدمه
۲۸۸.....	۲-۸ کربن فعال
۲۹۰.....	۳-۸ نانوالیاف گرافیتی
۲۹۲.....	۴-۸ گرافن
۲۹۳.....	۵-۸ نانوله‌های کربنی
۲۹۵.....	۶-۸ تهیه نانولوله‌های کربنی
۲۹۴.....	۷-۸ ذخیره‌سازی هیدروژن در نانولوله‌های کربنی
۲۹۹.....	۸-۳ ذخیره‌سازی هیدروژن در نانوساختارهای کربنی
۳۰۳.....	۶-۸ نتیجه‌گیری
۳۰۸.....	منابع

فصل نهم: ذخیره‌سازی هیدروژن در زئولیت‌ها

۳۱۳.....	۱-۹ مقدمه
۳۱۳.....	۲-۹ زئولیت
۳۱۷.....	۳-۹ جذب هیدروژن توسط زئولیت‌ها
۳۱۷.....	۴-۹ جذب سطحی هیدروژن
۳۲۲.....	۵-۹ کپسوله شدن هیدروژن در زئولیت‌ها
۳۲۶.....	۶-۹ نتیجه‌گیری
۳۲۷.....	منابع

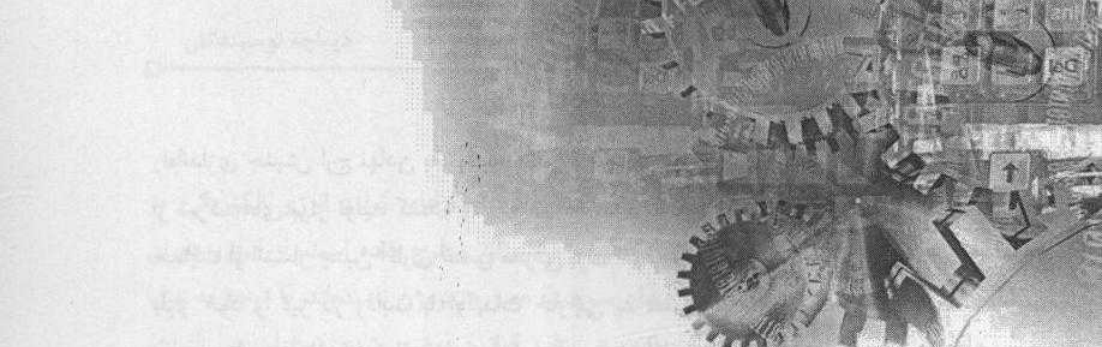
فصل دهم: اندازه‌گیری جذب/وا جذب هیدروژن

۳۳۳.....	۱-۱۰ مقدمه
۳۳۳.....	۲-۱۰ روش‌های تجربی اندازه‌گیری میزان هیدروژن ذخیره شده
۳۳۳.....	۳-۱۰ اندازه‌گیری وزنی
۳۳۶.....	۴-۱۰ اندازه‌گیری حجمی

۳۳۷.....	۳-۲-۱۰ واجذب برنامه ریزی شده دمایی
۳۳۹.....	۴-۲-۱۰ اندازه گیری های الکتروشیمیایی
۳۴۰.....	۳-۱۰ دستورالعمل عملیاتی برای اندازه گیری های ایزوترم های جذبی
۳۴۳.....	۴-۱۰ معبر سازی روش های تجربی اندازه گیری جذب هیدروژن
۳۵۰.....	۵-۱۰ سایر اندازه گیری های مهم در مورد مواد جاذب
۳۵۲.....	منابع

فصل یازدهم: مقایسه و بومی سازی فناوری های ذخیره هیدروژن

۳۵۷.....	۱-۱۱ مقدمه
۳۵۸.....	۲-۱۱ مروری بر روش های ذخیره سازی هیدروژن
۳۶۱.....	۱-۲-۱۱ عملکرد سامانه On-board
۳۷۰.....	۲-۲-۱۱ باز یابی سامه های Off-board
۳۷۵.....	۳-۱۱ ذخیره سازی هیدروژن در ایران
۳۷۹.....	۴-۱۱ نتیجه گیری
۳۸۱.....	منابع
۳۸۳.....	شکل های رنگی منتخب



به نام خدا

مقدمه ناشر

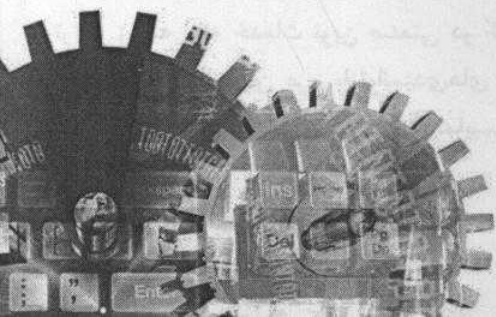
ما معتقدیم با توجه به شرایط کنونی کشور عزیزمان، باید اولویت کارهای پژوهشی و انتشار مقالات و کتاب‌های علمی با موضوعاتی باشد که بتواند بخشی از نیازهای جامعه ایرانی را برطرف سازد و حاصل آن در نهایت صورت عینی در جهت کاستن از حلقه‌های زنجیرهای کهنه و قطور وابستگی به بیگانگان باشد. در سالی که متأسفانه شاهدیم، در سال‌های اخیر بسیاری از کارهای پژوهشی انجام شده و مقالات منتشر شده در مجلات و سایت‌های خارجی به هیچ عنوان در این راستا نبوده‌اند. لذا ما و مجموعه ناشرانمان در نشر ایده‌نگار، هدف خود را انتشار و حمایت از آثاری قرار داده‌ایم که علاوه بر اینکه تلاشی در جهت بومی نمودن علوم و تکنولوژی‌های نوین باشد، با قرار گرفتن در زنجیره تولید علم، پاسخگویی را به نیازهای علمی جامعه صنعتی کشور باشد تا افق استقلال میهن عزیزمان را با پیشرفت‌های بنیادی علمی و صنعتی شاهد باشیم. در راستای این هدف بلند و با امضای توافقنامه همکاری مشترک با سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران در حوزه نشر کتب مرجع و برگزاری کارگاه‌های آموزشی مرتبط، امیدواریم با یاری متخصصین این سازمان، آثار ارزشمندی منتشر نماییم که در حوزه خود قابل ارجاع باشند. کتاب حاضر از جمله آثاری است که در این راستا تهیه و در اختیار شما سروران گرامی قرار گرفته است. در اینجا لازم می‌دانیم از آقای دکتر سید حیدر محمودی نجفی و خانم دکتر شهره صفارزاده، مترجمان و نویسندگان این کتاب که با کار مستمر پژوهشی توانستند این پروژه را به نحو شایسته‌ای به اتمام برسانند سپاسگزاری نماییم. بی‌شک اگر پشتوانه خوب علمی و تجارب بسیار گرانقدر ایشان در حوزه فناوری‌های ذخیره هیدروژن نبود امکان تولید این اثر جامع وجود نداشت.

ما از ابتدا یکی از اهداف اصلی خود را در نشر ایده‌نگار، معرفی تولیدات فاخر ایرانی و شرکت‌های برتر در زمینه ارائه خدمات نوین صنعتی در کتاب‌های مرتبط قرار دادیم تا ضمن آشنا نمودن متخصصین و دانشجویان عزیز با توانمندی‌های داخلی، جامعه صنعتی کشور را به استفاده هرچه بیشتر از خدمات و تولیدات ایرانی تشویق نماییم و در کنار سایر هم‌میهنان خود، نقشی شایسته در

راه اندازی جنبش ارج نهادن به تولید، دانش و توانمندی های بومی کشور ایفا نماییم. لذا بدین وسیله از شرکت های برتر تولید کننده و ارائه دهنده خدمات نوین علمی و صنعتی دعوت می نمایم تا با حمایت از انتشار چنین آثاری ضمن معرفی برند خود به جامعه صنعتی کشور و سازمان های دولتی، بازار خود را نیز در رقابت با تولیدات خارجی به شکل پایداری توسعه دهند. همچنین مدیران سازمان های مختلف می توانند با حمایت از این گونه آثار، نیازهای آموزشی مجموعه تحت سرپرستی خود را به شکلی مناسب تامین نمایند. نشر ایده نگار دست تمامی این عزیزان را برای همکاری می فشارد. در پایان از ریاست محترم سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران و اعضای محترم کمیته انتشارات خصوصاً سرکار خانم عشق آبادی که از نشر این اثر حمایت نمودند سپاسگزاری می نمایم. به امید سربلندی ایران و همه ایرانیان

سعید غربی - هادی غربی

نشر ایده نگار



دیباجه نویسندگان

در میان فناوری‌های نوین، پیل سوختی به عنوان یکی از راهکارهای تولید انرژی الکتریکی در اقتصاد آینده دنیا در صنایع حمل و نقل، نیروگاهی و مانند آن مطرح شده است. از این رو دوران کنونی را به دلیل بهره‌گیری از هیدروژن به عنوان سوخت، عصر هیدروژن نامیده‌اند. با توجه به مزایا و دستاوردهای مثبت زیست‌محیطی، اقتصادی و بنابر قوانین وضع شده (مالیات بر کربن، برچسب‌های آلاینده‌گی و اجباری شدن تولید خودروهای بدون نشر آلاینده‌گی) جهان امروز به سمت توسعه پایدار با استفاده از انرژی هیدروژنی سوق داده می‌شود. سامانه انرژی هیدروژنی به دلیل استقلال از منابع اولیه انرژی، سامانه‌ای دائمی، پایدار، فناناپذیر، فراگیر و تجدیدپذیر است. از این رو در آینده‌ای نه چندان دور، تولید و مصرف هیدروژن به عنوان حامل انرژی به سراسر اقتصاد جهانی سرایت کرده و اقتصاد هیدروژنی تثبیت خواهد شد.

اقتصاد ایران یک اقتصاد حتی است. هرچند ایران غنی از منابع گاز، نفت و زغال سنگ است، اما این منابع در آینده کاربرها سود بیشتری خواهند داشت و بازار انرژی‌های نو و تجدیدپذیر در جهان در قرن آینده پیش‌تاز خواهد بود. بنابراین ضروریست با هدف کاستن از هزینه‌های تمام شده سامانه‌های انرژی پاک همچون هیدروژن و پیل سوختی، بومی کردن این فناوری‌ها و در نهایت حضور در بازارهای جهانی را در ردیف اول سیاست راهبردی کشور قرار داد. در همین راستا سند راهبردی ملی توسعه فناوری پیل سوختی در میسن بنیادی هیأت دولت در سال ۱۳۸۶ به تصویب رسید. بر اساس این سند برای دستیابی به فناوری‌های مربوط به پیل سوختی، مبحث ذخیره‌سازی هیدروژن به عنوان یکی از ارکان اصلی آن مورد تأکید قرار گرفت، ولی به دلیل نبود برنامه‌ریزی اقتصادی انرژی دقیق مبتنی بر هیدروژن در کشور، یک بنای جامع و نقشه راه در این خصوص در سال ۱۳۹۰ توسط محققان سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران به سازمان انرژی‌های نو ایران پیشنهاد گردید که در بازنگری سند مذکور نیز مورد استناد قرار خواهد گرفت.

با توجه به مباحث جاری، فناوری ذخیره‌سازی هیدروژن در جهان نیز تا تجاری شدن و ورود به عرصه اقتصاد هیدروژنی راه طولانی در پیش دارد و در این راه چالش‌های بسیاری با آن روبرو خواهند شد. از این رو تحقیق و توسعه، همکاری‌های بین‌المللی و تبادل دانش فنی و اطلاعات و تجربیات، با توجه به زیرساخت‌های تحقیقاتی و عملیاتی موجود در کشور، مکمل و تسریع‌کننده فرایند تحقیقات در زمینه توسعه این فناوری در داخل کشور خواهد بود.

کتاب حاضر که به نوبه خود اولین کتاب به زبان فارسی در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن است، به عنوان مرجعی علمی و فنی برای محققان، استادان، دانشجویان و متخصصان تحقیق و توسعه در صنایع مرتبط با انرژی‌های پاک به ویژه هیدروژن و پیل سوختی قابل استفاده است.