



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

هیدروژن تولید، ذخیره سازی و ایمنی

تألیف:

دکتر رسول عبدالله میرزاوی

(استادیار گروه شیمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی)

محمد حسین مجدد

(کارشناس صنایع شیمیابی)

زمستان ۱۳۸۷

سر شناسه : عبدالله میرزائی، رسول، ۱۳۵۲ -
 عنوان و نام پدید آور : هیدروژن: تولید، ذخیره سازی و اینمنی / مؤلفان رسول عبدالله میرزائی،
 محمد حسین مجده
 مشخصات نشر : تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۸۷.
 مشخصات ظاهری : XXI، ۲۰۷، صون: مصور، جدول، نمودار.
 شابک : ۹۷۸ - ۹۶۴ - ۲۶۵۱ - ۱۱ - ۵
 وضعیت فهرست نویسی : فیبا.
 یاداشت : نمایه.
 موضوع : هیدروژن بمنزله سوخت.
 موضوع : بیل های سوختی.
 شناسنامه افزوده : مجدد، محمدحسین، ۱۳۶۱،
 شناسنامه افزوده : دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.
 TP ۲۵۹ / ۵ ۹۲۱۸۷ ع ۹ : ۶۶۵/۸۱
 رده بندی کنگره : رده بندی دیوبی
 شماره کتابشناسی ملی : ۱۵۳۷۵۳۶



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	: هیدروژن: تولید، ذخیره سازی و اینمنی
تألیف	: رسول عبدالله میرزائی، محمد حسین مجده
چاپ اول	: زمستان ۱۳۸۷
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	: نگین سبز
چاپ	: برهان
نظرفی	: شهرام طهماسبی
طرح جلد	: آرش عبدالله میرزائی
ویراستار	: محمد رضا مجده
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۳۲۰۰ تومان
شابک	: ۹۷۸ - ۹۶۴ - ۲۶۵۱ - ۱۱ - ۵

ISBN: 978 - 964 - 2651 - 11 - 5

۹۷۸ - ۹۶۴ - ۲۶۵۱ - ۱۱ - ۵

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفین و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان - کد پستی ۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - تلفن: ۰۲۹۶۰۰۰۱-۹

نماهنگ: ۰۳۹۷۰۰۰۳ پست الکترونیکی: sru@srttu.edu

پیشگفتار

علی‌رغم تأمین انرژی کشور از سوخت‌های فسیلی، در سال‌های اخیر به انرژی‌های نو نیز توجه زیادی شده، تا آنجا که برای تحقق این منظور، برخی اوقات نیروگاه‌هایی حتی با توان کمتر راهاندازی شده است. آن‌چه که در این میان مهم و قابل توجه است، تأکید بر هیدروژن به عنوان راهکار تأمین و مصرف انرژی در قرن حاضر است، که از آن به عنوان اقتصاد هیدروژن نام برده می‌شود. یکی از مصارف عمدۀ هیدروژن در این اقتصاد، پیل‌های سوختی است، که در آن انرژی شیمیایی هیدروژن به عنوان سوخت به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در حال حاضر سند ملی پیل سوختی کشور به تصویب رسیده و تلاش‌هایی در جهت نهادینه کردن استفاده از این نوع فناوری در حال شکل‌گیری است. لذا با توجه به این که هیدروژن به عنوان شاخص‌ترین سوخت به کار رفته در این فناوری دارای اهمیت است، ما را بر آن داشت تا در کتاب حاضر نگاهی مختصر به اینمی، ذخیره‌سازی و تولید این ماده گهیار در این صنعت جدید داشته باشیم. بی‌گمان مطالب تهیه شده همه آن چیزی که بایستی ارائه شود نیست، ولی فضایی را برای بحث و کندوکاو در این زمینه فراهم می‌کند که حضور سایر محققان می‌تواند تکمیل کننده آن باشد.

مؤلفان مجموعه حاضر، صمیمانه نکته نظرات شما را در مورد مطالب طرح شده پذیرا هستند، تا بتوانند در چاپ یا تألیفات بعدی در بهبود راهی که پیش گرفته‌اند این نظرات را بکار ببرند.

شایسته است از جناب آقای دکتر حسین غریبی به خاطر راهنمایی‌های ارزنده شان در تنظیم مطالب و آقای محمد رضا مجدد در ویرایش این کتاب، کمال تشکر را بنماییم.
همچنین لازم می‌دانیم که از خانواده‌های خود که با صبوری ما را در این مسیر همراهی نمودند و امید بخش تلاش ما بودند، تشکر نماییم.

رسول عبدالله میرزا

محمد حسین مجدد

فهرست عناوین

عنوان	شماره صفحه
مقدمه	۱
فصل اول خواص هیدروژن و مقایسه آن با سوخت‌های دیگر	۱۰
۱-۱- ساختار اتمی	۱۱
۱-۱-۱- ترکیب دیگر سوخت‌ها	۱۳
۱-۲- خواص فیزیکی	۱۴
۱-۲-۱- حالت	۱۴
۱-۲-۲- بو، رنگ، مزه	۱۶
۱-۲-۳- سمیت	۱۶
۱-۳- خفگی	۱۶
۱-۳-۲- ۱- گازهای دیگر همراه با هیدروژن	۱۷
۱-۴- دانسیته و کمیت‌های وابسته	۱۷
۱-۴-۲- دانسیته	۱۷
۱-۴-۳- حجم مخصوص	۱۸
۱-۴-۴- وزن مخصوص	۱۸
۱-۴-۵- ضریب انبساط	۱۹
۱-۵- محتوای هیدروژن	۲۰

۲۰	-۱-۲-۵	- نشت
۲۱	-۱-۳	- خواص شیمیایی
۲۱	-۱-۳-۱	- واکنش پذیری
۲۴	-۱-۳-۲	- محصولات جانبی حاصل از واکنش سوختها
۲۵	-۱-۳-۳	- انرژی
۲۵	-۱-۳-۳-۱	- محتوای انرژی
۲۷	-۱-۳-۳-۲	- دانسیتۀ انرژی
۲۸	-۱-۳-۴	- اشتعال پذیری
۲۹	-۱-۴-۳	- نقطۀ اشتعال
۳۰	-۱-۴-۳-۲	- محدوده اشتعال پذیری
۳۲	-۱-۴-۳-۳	- دمای احتراق خودبخودی
۳۳	-۱-۴-۴	- عدد اکتان
۳۳	-۱-۴-۴-۵	- انرژی احتراق
۳۴	-۱-۴-۴-۶	- سرعت احتراق
۳۵	-۱-۴-۴-۷	- حد فاصل سرد شدن
۳۵	-۱-۴-۴-۸	- مشخصات شعله

فصل دوم روش‌های تولید هیدروژن

۳۹	۱-۲	- تولید هیدروژن به وسیله سوخت‌های فسیلی و زیست توده
۳۹	۱-۱-۱	- فرآیند تبدیل بخار آب به وسیله متان (SMR)
۴۱	۱-۱-۱-۱-۲	- تحقیقات جدید در این زمینه
۴۲	۱-۱-۱-۲-۲	- وضعیت کنونی
۴۳	۱-۱-۱-۳	- بررسی اقتصادی
۴۳	۱-۱-۱-۴	- نتیجه گیری
۴۴	۱-۱-۲-۲	- اکسیداسیون جزئی / تبدیل اتوترمال متان
۴۵	۱-۱-۲-۱-۲	- تحقیقات جدید در این زمینه
۴۶	۱-۱-۲-۲-۲	- وضعیت کنونی
۴۶	۱-۱-۲-۲-۳	- بررسی اقتصادی
۴۷	۱-۱-۲-۲-۴	- نتیجه گیری

۴۷	۳-۱-۲- گازسازی از زغال سنگ
۴۹	۱-۳-۱-۲- تحقیقات جدید در این زمینه
۴۹	۲-۳-۱-۲- وضعیت کنونی
۴۹	۳-۳-۱-۲- بررسی اقتصادی
۵۰	۴-۳-۱-۲- نتیجه گیری
۵۰	۴-۱-۲- گازسازی / پیرولیز زیست توده
۵۲	۱-۴-۱-۲- تحقیقات جدید در این زمینه
۵۲	۲-۴-۱-۲- بررسی اقتصادی
۵۲	۲-۲- تولید هیدروژن از طریق حرارت هسته‌ای و منابع گوناگون انرژی
۵۳	۱-۲-۲- الکترولیز
۵۷	۱-۱-۲-۲- تحقیقات جدید در این زمینه
۵۹	۲-۱-۲-۲- وضعیت کنونی
۶۰	۳-۱-۲-۲- بررسی اقتصادی
۶۱	۴-۱-۲-۲- نتیجه گیری
۶۱	۲-۲-۲- چرخه سولفور ید
۶۵	۱-۲-۲-۲- تحقیقات جدید در این زمینه
۶۶	۲-۲-۲-۲- وضعیت کنونی
۶۶	۳-۲-۲-۲- بررسی اقتصادی
۶۶	۴-۲-۲-۲- نتیجه گیری
۶۷	۳-۲-۲- روش فوتوبیولوژیک / فوتوسینتیک
۶۹	۱-۳-۲-۲- وضعیت کنونی
۶۹	۲-۳-۲-۲- بررسی اقتصادی
۶۹	۳-۳-۲-۲- نتیجه گیری
۷۰	۴-۲-۲- شکافت فوتوكاتالیتیکی آب
۷۲	۱-۴-۲-۲- وضعیت کنونی
۷۳	۲-۴-۲-۲- بررسی اقتصادی
۷۳	۳-۴-۲-۲- نتیجه گیری
۷۴	۳-۲- جمع بندی

۷۹	فصل سوم ذخیره سازی هیدروژن
۸۳	۱-۳- سیلندرهای گاز با فشار بالا
۸۷	۲-۳- هیدروژن مایع
۹۱	۳-۳- جذب سطحی فیزیکی هیدروژن
۱۰۰	۴-۳- هیدریدهای فلزی
۱۰۹	۵-۳- هیدریدهای کمپلکس
۱۱۲	۶-۳- واکنش شیمیایی با آب
۱۱۳	۷-۳- خلاصه‌ای از ذخیره‌سازی هیدروژن
۱۱۵	فصل چهارم - ایمنی هیدروژن
۱۱۷	۱-۴- بررسی تاریخی حوادث هیدروژن
۱۱۷	۱-۱-۴- حادثه هیندنبرگ
۱۱۸	۲-۱-۴- آزاد شدن هیدروژن در حین تعمیر وسایل صنعتی
	۳-۱-۴- افزایش بیش از حد فشار مخزن هیدروژن
۱۱۹	و تخریب آن
۱۲۱	۲-۴- اجزاء سیستم‌های عرضه شده
۱۲۱	۱-۲-۴- دستگاه فشارشکن
۱۲۱	۲-۲-۴- شیرها
۱۲۳	۳-۲-۴- وسایل تنظیم کننده فشار
۱۲۳	۴-۲-۴- تجهیزات الکتریکی
۱۲۴	۳-۴- سیلندرهای گاز هیدروژن
۱۲۴	۱-۳-۴- استفاده از سیلندرهای گاز هیدروژن
۱۲۵	۲-۳-۴- حرکت دادن سیلندرهای گاز هیدروژن
۱۲۵	۳-۳-۴- انبار کردن سیلندرهای گاز هیدروژن
۱۲۶	۴-۳-۴- سیستم تهویه و اعلام خطر
۱۲۶	۵-۳-۴- روش کار در شرایط اضطراری
۱۲۶	۶-۳-۴- در صورت بروز نشت گاز
۱۲۷	۷-۳-۴- در شرایط آتش سوزی
۱۲۷	۸-۳-۴- راهنمای ایمنی هیدروژن به عنوان گاز حامل

۱۲۸	۱-۸-۳-۴- بررسی مکانیسم‌ها
۱۲۹	۴-۴- نشت هیدروژن از وسایل نقلیه
۱۳۱	۴-۱- آنالیز نشت هیدروژن
	۴-۲- محاسبه افزایش دمای هیدروژن در حال آزاد شدن
۱۳۲	در فضای بسته یا باز
۱۳۳	۵-۴- تشخیص خطرات
۱۳۳	۴-۱- خطرات حرارتی
۱۳۵	۴-۲- شرایط ذخیره‌سازی به واسطه سرما
۱۳۶	۴-۶- ارزیابی خطر
۱۳۶	۴-۱- توصیف روش
۱۳۷	۴-۲- کاربرد روش ETA
۱۳۹	۴-۷- برآورد انتشار به وسیله کامپیووتر
	فصل پنجم استاندارد NFPA (برای سیستم‌های هیدروژن)
۱۴۱	گازی و مایع، ویرایش (۱۹۹۹)
	۵-۱- استاندارد برای سیستم هیدروژن گازی در مکان‌های
۱۴۲	۵-۱-۱- مورد استفاده
۱۴۳	۵-۱-۱-۱- اطلاعات عمومی
۱۴۳	۵-۱-۱-۱-۱- طرح نهایی
۱۴۳	۵-۱-۱-۱-۲- طبقه‌بندی
۱۴۳	۵-۱-۱-۳- محدوده کاربرد این استاندارد
۱۴۴	۵-۱-۱-۴- مورد خارج از استاندارد
۱۴۴	۵-۱-۱-۵- تعاریف
۱۴۶	۵-۱-۲-۱-۵- طراحی سیستم‌های هیدروژن گازی
۱۴۶	۵-۱-۲-۱-۶- مخازن
۱۴۷	۵-۱-۲-۱-۷- تجهیزات کاهش فشار
۱۴۷	۵-۱-۲-۱-۸- لوله کشی، ساخت لوله و نصب آن
۱۴۸	۵-۱-۲-۱-۹- اجزای تشکیل دهنده تجهیزات
۱۴۹	۵-۱-۳- مکان سیستم‌های هیدروژن گازی

۱۴۹	- الزامات عمومی	۱-۳-۱-۵
۱۴۹	- نیازهای ویژه	۲-۳-۱-۵
۱۵۴	- ملاحظات طراحی در مکان‌های ویژه	۴-۱-۵
۱۵۴	- مکان‌های بیرونی	۱-۴-۱-۵
۱۵۵	- ساختمان‌های مجزا	۲-۴-۱-۵
۱۵۵	- اتاق‌های ویژه	۳-۴-۱-۵
۱۵۶	- مدیریت و نگهداری	۵-۱-۵
۱۵۶	- دستور کار عملیاتی	۱-۵-۱-۵
۱۵۶	- نگهداری	۲-۵-۱-۵
۱۵۷	- خطر مواد قابل اشتعال	۳-۵-۱-۵
۱۵۷	- حفاظت در برابر آتش	۶-۱-۵
۱۵۷	- استاندارد برای سیستم هیدروژن مایع در مکان‌های مورد استفاده	۲-۵
۱۵۷	- اطلاعات عمومی	۱-۲-۵
۱۵۷	- طرح نهایی	۱-۱-۲-۵
۱۵۸	- مورد خارج از استاندارد	۲-۱-۲-۵
۱۵۸	- تعاریف	۳-۱-۲-۵
۱۵۸	- طراحی سیستم‌های هیدروژن مایع	۲-۲-۵
۱۵۸	- مخازن	۱-۲-۲-۵
۱۵۹	- تجهیزات کاهش فشار	۲-۲-۲-۵
۱۶۰	- لوله کشی، ساخت لوله و نصب آن	۳-۲-۲-۵
۱۶۱	- نصب تجهیزات	۴-۲-۲-۵
۱۶۲	- آرمودن	۵-۲-۲-۵
۱۶۲	- بخارسازهای هیدروژن مایع	۶-۲-۲-۵
۱۶۲	- سیستم‌های الکتریکی	۷-۲-۲-۵
۱۶۳	- اتصالات بین دستگاه و اتصال به زمین	۸-۲-۲-۵
۱۶۳	- مکان سیستم‌های هیدروژن مایع	۳-۲-۵
۱۶۳	- نیازهای عمومی	۱-۳-۲-۵
۱۶۴	- نیازهای ویژه	۲-۳-۲-۵

	-۳-۲-۵ نگهداری هیدروژن مایع درون
	ساختمان‌هایی به‌غیر از ساختمان‌های مجزا و
۱۶۵	اتاق‌های ویژه
۱۶۹	-۴-۲-۵ ملاحظات طراحی در مکان‌های ویژه
۱۶۹	-۱-۴-۲-۵ مکان‌های بیرونی
۱۶۹	-۲-۴-۲-۵ ساختمان‌های مجزا
۱۷۰	-۳-۴-۲-۵ اتاق‌های ویژه
۱۷۱	-۵-۲-۵ عملکرد
۱۷۱	-۱-۵-۲-۵ دستورات عملی
۱۷۱	-۲-۵-۲-۵ صلاحیت پرسنل
۱۷۱	-۳-۵-۲-۵ تجهیزات ایمنی
۱۷۱	-۶-۲-۵ نگهداری
۱۷۱	-۱-۶-۲-۵ بازررسی
۱۷۲	-۲-۶-۲-۵ مواد قابل احتراق
۱۷۲	-۷-۲-۵ حفاظت در برابر آتش

فهرست منابع

۱۸۱	ضمیمه‌ها
۱۸۲	ضمیمه ۱ - راهنمای عمومی سیلندرهای گاز فشرده
۱۸۹	ضمیمه ۲ - فهرست علائم اختصاری
۱۹۱	ضمیمه ۳ - فهرست کوتاه نوشته
۱۹۳	ضمیمه ۴ - فهرست راهنمای فارسی و انگلیسی

فهرست شکل‌ها

شماره صفحه

۲	شکل ۱- پیشرفت مصرف انرژی جهان
۳	شکل ۲- چرخه کربن بر روی زمین
۴	شکل ۳- میانگین تغییر دمای زمین در ۱۰۰۰ سال اخیر
۷	شکل ۴- نمایی از کره زمین با عالمتی در صحرا که نیاز است سطح آن با سلول‌های فتوولتاویک برای تولید $10^3 \text{ kWh/year} \times 6$ انرژی در جهان پوشیده شود. در سمت راست نمایی از زمین در طی شب که نشان‌دهنده مصرف انرژی تولید شده است، نشان داده شده است
۸	شکل ۵- چرخه هیدروژن
۱۲	شکل ۱-۱- ساختار اتمی یک مولکول هیدروژن
۱۴	شکل ۲-۱- ساختار شیمیایی سوخت‌های رایج
۱۹	شکل ۳-۱- نسبت انسباط هیدروژن مایع و گاز
۲۲	شکل ۴-۱- شبیه‌سازی نشت سوخت‌ها
۲۳	شکل ۵-۱- حالات انرژی شیمیایی در واکنش هیدروژن با اکسیژن
۳۱	شکل ۶-۱- تغییر محدوده اشتعال پذیری هیدروژن با دما
۳۱	شکل ۷-۱- مقایسه محدوده اشتعال پذیری سوخت‌های مختلف در دمای انمسفریک
۳۶	شکل ۸-۱- شعله‌های نامرئی هیدروژن باعث احتراق جارو شده است
۳۶	شکل ۹-۱- آتش‌سوزی هیدروژن ناشی از تخریب سیلندر سوخت

۴۱	شکل ۲-۱-۲- نمودار تولید هیدروژن به روش SMR
۴۲	شکل ۲-۲- فرآیند SMR
۴۵	شکل ۲-۳- تولید هیدروژن به روش اکسیداسیون جزیی
۴۹	شکل ۲-۴- نمودار تولید هیدروژن به روش گازسازی از زغال سنگ
۵۱	شکل ۲-۵- فرآیند تولید هیدروژن به روش گازسازی از زیست توده
۵۴	شکل ۲-۶- طرح تانک تک قطبی
۵۵	شکل ۲-۷- طرح فیلتر فشاری دو قطبی
۵۶	شکل ۲-۸- پیل الکترولیتی با الکترولیت پلیمر جامد SPE
۵۶	شکل ۲-۹- الکترولیز به وسیله غشای مبادله کننده پروتون PEM
۵۷	شکل ۲-۱۰- نمودار مفهومی واحد الکترولیز با دمای بالا
۵۸	شکل ۲-۱۱- نحوه مونتاژ شدن پیل
۶۰	شکل ۲-۱۲- واحد الکترولیز با فشار کم، شرکت Norsk Hydro
۶۲	شکل ۲-۱۳- چرخه سولفور - ید
۶۳	شکل ۲-۱۴- راکتور نمک ذوب شده
۶۴	شکل ۲-۱۵- راکتور Pebble-bed
۶۴	شکل ۲-۱۶- نمودار فرآیند سولفور - ید با استفاده از He-Cooled راکتور
۶۵	شکل ۲-۱۷- نمونه‌ای از واحد تولید هیدروژن با استفاده از He-cooled راکتور
۶۸	شکل ۲-۱۸- سلول Chlamydomonas reinhardtii
۶۸	شکل ۲-۱۹- فرآیند تولید هیدروژن به وسیله سلول‌های Chlamydomonas reinhardtii
۷۰	شکل ۲-۲۰- فرآیند تولید هیدروژن به روش فتوسینتیک
۷۱	شکل ۲-۲۱- فرآیند شکافت فوتوكاتالیکی آب
۷۲	شکل ۲-۲۲- تبدیل یک فوتون به یک جفت الکترون به وسیله یک فوتوكاتالیست. این جفت الکترون می‌تواند برای واکنش‌های اکسایش-کاهش مثل شکافت آب استفاده شود
۷۸	شکل ۲-۲۳- کاربرد تکنولوژی‌های هیدروژن در آینده

۸۱	شکل ۱-۳- نمودار فازی برای هیدروژن
۸۵	شکل ۲-۳- نسبت ضخامت دیواره به قطر بیرونی سیلندرهای فشاری
۸۶	شکل ۳-۳- کمپرسور پیستونی استاندارد
۸۹	شکل ۴-۳- چرخه ژول - تامسون (چرخه Linde)
۹۳	شکل ۵-۳- نانوتیوب تک دیواره
۹۴	شکل ۶-۳- نانوتیوب زیگزاگی
۹۸	شکل ۷-۳- مقدار قابل برگشت هیدروژن (اندازه‌گیری الکتروشیمیایی در K ۲۹۸) در مقایسه با مساحت سطح B.E.T
۱۰۳	شکل ۸-۳- تغییرات پتانسیل لنارد-جونز هیدروژن نزدیک به سطح فلزی
۱۰۵	شکل ۹-۳- مفهوم ترمودینامیکی تشکیل هیدرید
۱۰۷	شکل ۱۰-۳- مدل ساختار نوواری. مدل نیمه تجربی برای حالت پایدار
۱۰۸	شکل ۱۱-۳- طرح وانت‌هوف برای برخی از هیدریدهای انتخابی
۱۱۴	شکل ۱۲-۳- دانسیتۀ حجمی و وزنی هیدروژن در برخی از هیدریدهای انتخاب شده
۱۱۸	شکل ۱-۴- کشتی هوایی هیندنبرگ
۱۲۰	شکل ۲-۴- حادثه در دانشگاه تربیت مدرس
۱۲۲	شکل ۳-۴- نمونه‌ای از شیر جریان اضافی
۱۲۲	شکل ۴-۴- نمونه‌ای از شیر یک طرفه
۱۳۴	شکل ۵-۴- اثر تشعشعی حرارت در مخزن هیدروژنی تحت فشار
۱۳۵	شکل ۶-۴- اثر تشعشعی حرارت در مخزن هیدروژن مایع شده
۱۳۸	شکل ۷-۴- ETA منطبق با حوادث ناشی از آزاد شدن هیدروژن
۹.6 s (c), 6.2 s (b), 2.4 s (a)	شکل ۸-۴- شبیه سازی کامپیوتوری انتشار هیدروژن تحت فشار آزاد شده در زمان‌های
۱۴۰	و (d) 12.4 s بعد از آغاز انتشار
۱۴۰	شکل ۹-۴- شبیه سازی کامپیوتوری انتشار هیدروژن مایع آزاد شده در زمان‌های 13 s (c), 3.5 s (a), 10 s (b)
۱۴۰	و (d) 18.5 s بعد از آغاز انتشار

فهرست جدول‌ها

شماره صفحه

جدول ۱-۱- ویژگی‌های سوخت‌های هیدروژن، متان و بنزین	۵
جدول ۱-۲- مقایسه دانسیتۀ بخار و مایع مواد	۱۷
جدول ۱-۳- ارزش‌های گرمایی سوخت‌های مختلف	۲۶
جدول ۱-۴- دانسیتۀ انرژی سوخت‌های مختلف	۲۸
جدول ۱-۵- نقطۀ اشتعال برای سوخت‌های مختلف	۲۹
جدول ۱-۶- دمای احتراق خودبخودی برخی از سوخت‌ها	۳۲
جدول ۱-۷- عدد اکтан سوخت‌های مختلف	۳۳
جدول ۱-۸- قیمت هیدروژن تولید شده به روش SMR	۴۳
جدول ۱-۹- قیمت هیدروژن تولید شده به روش اکسیداسیون	۴۷
جزیی / تبدیل انوترمال متان	۴۷
جدول ۲-۱- قیمت هیدروژن تولید شده به روش گازسازی از زغال‌سنگ	۵۰
جدول ۲-۲- قیمت هیدروژن تولید شده به روش گازسازی مستقیم / پیرولیز زیست توده	۵۲
جدول ۲-۳- قیمت هیدروژن تولید شده به روش الکترولیز با دمای بالا	۵۹
جدول ۲-۴- بازده و ظرفیت تکنولوژی‌های الکترولیز جاری	۶۰
جدول ۲-۵- درصد مؤثر الکتریسیتۀ تولیدی در قیمت هیدروژن	۶۱
جدول ۲-۶- قیمت هیدروژن با استفاده از چرخۀ سولفور - ید	۶۶
جدول ۲-۷- پیش‌بینی قیمت هیدروژن تولید شده به روش بیولوژیکی	۶۹

جدول ۱۰-۲ - پیش‌بینی قیمت هیدروژن تولید شده به وسیله فوتوکاتالیست‌ها	۷۳
جدول ۱۱-۲ - خلاصه روش‌های تولید هیدروژن	۷۴
جدول ۱-۳ - شش روش ذخیره‌سازی هیدروژن	۸۳
جدول ۲-۳ - گروهی مهم از ترکیبات هیدریدی بین فلزی به همراه ساختمان و نوع عناصر تشکیل دهنده	۱۰۱
جدول ۱-۵ - مکان‌های بسیار مناسب سیستم‌های هیدروژن گازی	۱۵۰
جدول ۵-۲ - حداق فاصله در معرض قرار گرفتن محیط پیرامون، توسط سیستم‌های هیدروژن گازی در فضای آزاد	۱۵۱
جدول ۳-۵ - دسته‌بندی نواحی الکتریکی	۱۶۳
جدول ۴-۵ - مکان‌های مناسب سیستم هیدروژن مایع	۱۶۶
جدول ۵-۵ - حداقل فاصله سیستم‌های هیدروژن مایع از عواملی که در معرض آن هستند	۱۶۷

مقدمه

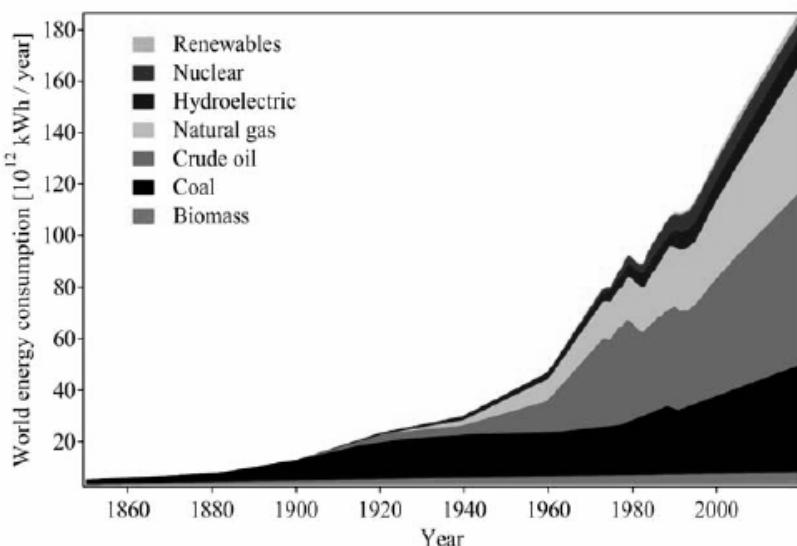
در زمینه طرح‌هایی مثل استفاده از زیست توده^۱ به عنوان منبع انرژی پیشرفت چشمگیری حاصل شده است. میانگین نیروی مصرف شده توسط بدن انسان در حالت استراحت $W/0.1$ و در حالت فعالیت بدنی سخت $W/0.4$ است. از آنجا که دی‌اکسیدکربن آزاد شده توسط انسان‌ها و حیوانات مجدداً توسط گیاهان در فرآیند فتوسنتر جذب می‌شوند، در نتیجه مصرف گیاهان تغییراتی را در محیط پیرامون ایجاد نمی‌کنند. در سال ۱۷۹۲، زمانی که توماس نیوکامن^۲ ماشین بخار را احیا کرد،[۱] نخستین بار ماشینی غیر زنده به عنوان یک عامل بنیادی در جامعه نوپای صنعتی آن زمان شروع به کار کرد. انرژی ماشین بخار به وسیله زغال سنگی که توسط انرژی خورشید برای بیش از میلیون‌ها سال در پوسته سخت زمین ایجاد شده بود، تأمین می‌شد.

اگرچه انرژی به وفور و با قیمت ارزان وجود داشت، ولی بشر توان سنگینی را برای کاهش ذخایر انرژی می‌بایست پرداخت نماید. زغال سنگ به عنوان یک منبع انرژی جامد، بعداً توسط نفت خام مایع و گاز طبیعی تکمیل شد. نه تنها حالت منابع انرژی با گذشت زمان تغییر کرد بلکه مقدار هیدروژن در سوخت‌ها نیز افزایش یافت.

¹ - Biomass

² - Thomas Newcomen

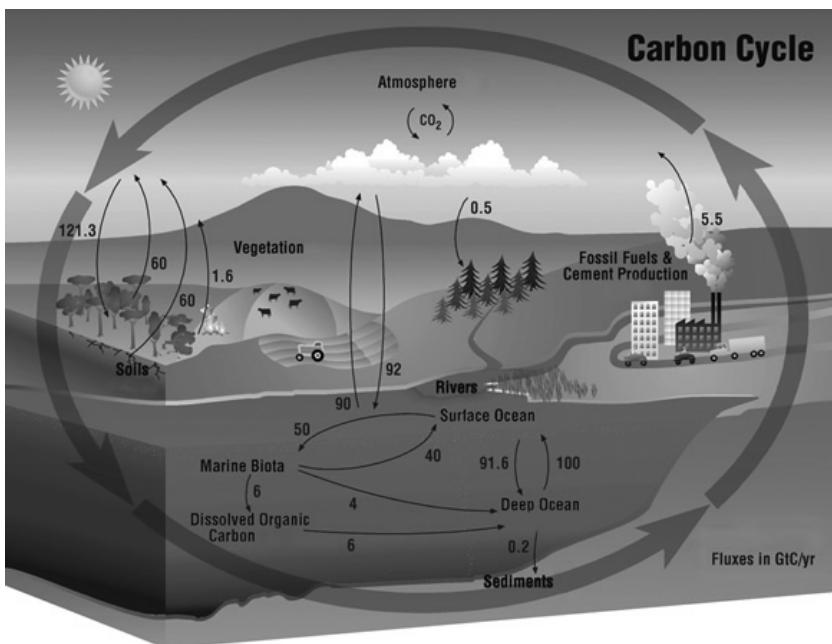
صرف انرژی جهانی از $1/4 \times 10^{14}$ kWh/year در سال ۱۸۶۰ به 5×10^{12} kWh/year در سال ۲۰۰۸ افزایش یافته است. که بیشتر از $1/2 \times 10^{14}$ آن از سوخت‌های فسیلی (زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) به کار گرفته می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- پیشرفت مصرف انرژی جهان

اکنون جمعیت بشر نسبت به قرن گذشته ۶ برابر شده و در نتیجه مصرف انرژی ۸۰ برابر افزایش یافته است[1]. میانگین جهانی مصرف انرژی برای هر شخص ۲ است. میانگین مصرف انرژی در آمریکا 10 kW و در اروپا 5 kW/day است. دو میلیون نفر بر روی کره زمین از هیچ گونه سوخت فسیلی استفاده نمی‌کنند. ذخایر سوخت‌های فسیلی روی کره زمین محدود است و پیش‌بینی‌ها بر اساس تداوم و پیشرفت مصرف انرژی نشان می‌دهد که تقاضا برای انرژی به زودی نسبت به ذخایر آن پیشی خواهد گرفت. به علاوه، مصرف سوخت‌های فسیلی باعث افزایش دی‌اکسیدکربن در جو تا حدود تقریباً $3 \times 10^{12}\text{ kg/year}$ است[2].

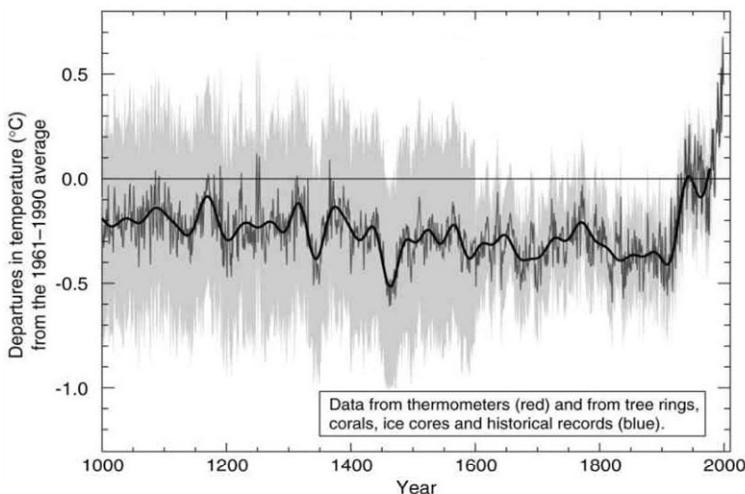
دی اکسید کربن یک گلخانه‌ای است که موجب افزایش میانگین دمای کره زمین می‌شود. این یک واقعیت است که مقدار زیادی از دی اکسید کربن کره زمین در آب اقیانوس‌ها (10^{14} kg در جو و 10^{16} kg در اقیانوس‌ها) حل می‌گردد. قابلیت حل دی اکسید کربن با افزایش درجه حرارت آب تا حدود ۰.۳٪ در هر کلوین کاهش می‌یابد. چنانچه اگر میانگین درجه حرارت اقیانوس‌ها افزایش یابد، تعادل قابلیت حل دی اکسید کربن بین جو و اقیانوس به سمت جو حرکت می‌کند و این امر موجب افزایش بیشتر گاز گلخانه‌ای در جو می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲- چرخه کربن بر روی زمین

با توجه به تاریخچه پیشرفت منابع انرژی به سمت سوخت‌های غنی از هیدروژن و لزوم اجتناب از تولید دی اکسید کربن، هیدروژن باید منبع انرژی در آینده باشد: $\text{C} \rightarrow \text{H}_2 \rightarrow (\text{گاز طبیعی}) \rightarrow \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_2 - \text{(CH}_4\text{)} \rightarrow \text{NFT}$ (نفت) \rightarrow (زغال سنگ)

تغییرات استفاده از سوخت که در بالا اشاره شد نشانگر پیشرفت از یک حالت جامد به مایع و سپس در نهایت به حالت گاز در منابع انرژی است. با این‌که هیدروژن بیشترین عنصر روی کره زمین را تشکیل می‌دهد، در هر حال کمتر از یک درصد آن به صورت مولکول گاز هیدروژن H_2 است. مشکل، در تشکیل پیوندهای شیمیایی به صورت H_2O در آب و برخی دیگر به صورت هیدروکربن‌های گازی یا مایع است. با توجه به محدودیت‌های چرخه کارنو، تنها در حدود تقریبی یک سوم انرژی می‌تواند، به کار تبدیل شود. اکنون پرسش این است که چرا انرژی ذخیره شده در هیدروژن حدود سه برابر گرانتر از نفت است؟ [3]



شکل ۳- میانگین تغییر دمای زمین در ۱۰۰۰ سال اخیر

انرژی شیمیایی بر اساس انرژی الکترون‌های جفت نشده در لایه ظرفیت است که توسط الکترون‌هایی (برای خنثی کردن) از اتم‌های دیگر تثبیت می‌شوند. در این میان اتم هیدروژن پرجاذبه‌ترین است زیرا الکترون آن تنها به وسیله یک پروتون همراهی می‌شود، هیدروژن بالاترین نسبت تعداد الکترون‌های ظرفیت دار به پروتون‌ها (و نوترون‌ها) را در جدول تناوبی دارد. انرژی به دست آمده از هر الکترون بسیار زیاد است. انرژی شیمیایی هر حجم هیدروژن (kg^{-1}) $39/4 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ سه برابر بیشتر از

سوخت‌های دیگر شیمیایی نظیر هیدروکربن‌های مایع ($\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$) است (۱/۳/۱) (جدول ۱) [4].

جدول ۱- ویژگی‌های سوخت‌های هیدروژن، متان (گاز طبیعی) و بنزین

$(-\text{CH}_2 -)_n$	بنزین	CH_4	متان	هیدروژن H_2	واحد	خواص
۱۲/۴		۱۳/۹		۳۳/۳۳	$[\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}]$	ارزش گرمایی پایین ^۱
۲۳۰ - ۴۸۰		۵۴۰		۵۸۵	$[^{\circ}\text{C}]$	دمای احتراق خودبخودی
۱/۰ - ۷/۶		۵/۳ - ۱۵		۴ - ۷۵	$[\text{Vol}\%]$	محدوده اشتعال پذیری در هوای
۰/۲۴		۰/۲۹		۰/۰۲	$[\text{mWs}]$	حداقل انرژی احتراق
۰/۴		۰/۴		۲/۶۵	$[\text{m.s}^{-1}]$	انتشار شعله در هوای
۱/۴ - ۱/۷		۱/۳۹ - ۱/۶۴		۱/۴۸ - ۲/۱۵	$[\text{km.s}^{-1}]$	سرعت انفجار
۴۴/۲۲		۷/۰۳		۲/۰۲	$[\text{kg TNT.m}^3]$	انرژی انفجار
۰/۰۵		۰/۱۶		۰/۶۱	$[\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	ضریب نفوذ در هوای

به بیان دیگر مقدار انرژی موجود در kg هیدروژن با مقدار انرژی kg نفت خام مطابقت دارد. مقدار انرژی یک سوخت معمولاً تحت عنوان ارزش گرمایی بیان می‌شود. تفاوت بین ارزش گرمایی بالاتر و پایین‌تر، آنتالپی تبخیر است، که با توجه به حالت آب در فرآیند سوختن آن تعریف می‌شود. برای هیدروژن پایین‌ترین ارزش گرمایی $\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ۳۳/۳ و ارزش گرمایی بالا $\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ۳۹/۴ است. هیدروژن فراوان‌ترین عنصر در جهان بوده و این تفکر وجود دارد که عناصر سنگین، از هیدروژن و هلیوم از گذشته تا به حال ساخته شده‌اند. تخمین زده می‌شود که هیدروژن بیش از ۹٪ همه مولکول‌ها را می‌سازد یا ۷۵٪ حجم جهان را تشکیل می‌دهد [4].

قبل از این‌که مصرف انرژی هیدروژن به حقیقت بپیوندد، باید بر مشکلات و مسائل تکنیکی، اقتصادی و ایمنی در زمینه استفاده از انرژی این عنصر ارزشمند غلبه

^۱ - Lower Heating Value

کرد. مسائل تکنیکی عبارت از: تولید، ذخیره‌سازی ایمن و احتراق کارآمد هیدروژن هستند.

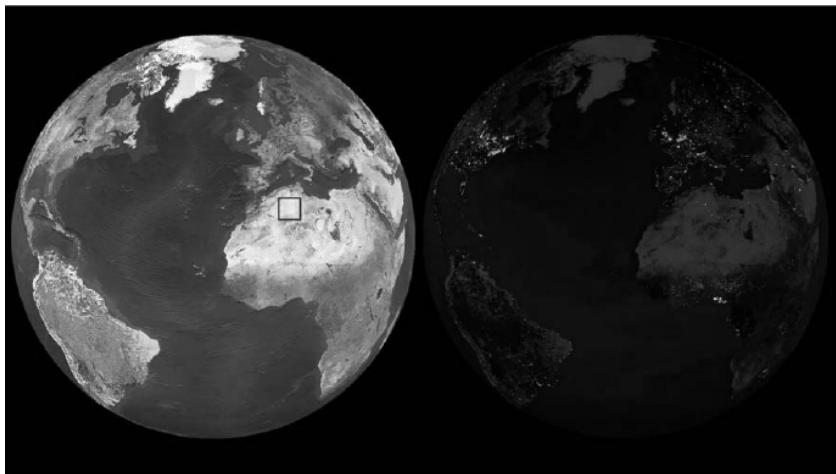
به منظور جایگزینی سوخت‌های فسیلی مورد نیاز در جهان، بیشتر از 10^{12} kg هیدروژن در سال می‌باشد تولید شود، که این مقدار حدود صد برابر بیشتر از تولید آن در حال حاضر است. مقدار تابش خورشید برابر با 1362 kW.m^{-2} فتوولتائیک راندمانی در حدود ۱۰٪ دارد، که مشابه با سیستم‌های بیولوژیکی بر اساس فتوسنتر عمل می‌نمایند. بنابراین تحت شرایط مطلوب در حدود 541000 km^2 فضای پوشیده شده با سلول‌های فتوولتائیک به منظور تولید انرژی قابل مصرف جهانی در حال حاضر نیاز داریم، که مربعی به طول تقریبی 740 km است [1].

دیگر مشکل پیش روی، مسائل اقتصادی هزینه تولید هیدروژن است. از آن جایی که انرژی برای بیشتر از میلیون‌ها سال به صورت طبیعی ذخیره شده بود، اقتصاد جهانی در حال حاضر بر اساس انرژی رایگان شکل گرفته است. هزینه‌ای را که برای سوخت‌های فسیلی می‌پردازیم تنها در برگیرنده هزینه‌های استخراج آن‌ها است. به منظور سنتز سوخت، نظیر هیدروژن و قبولاندن آن به عنوان انرژی جدید به جهان می‌باشد اقتصاد جهانی هزینه‌های لازم را برای آن پرداخت کند. تولید انرژی تجدیدپذیر هیدروژن سرمایه‌گذاری ۵ ساله‌ای را می‌طلبد که این سرمایه‌گذاری بالغ بر $10^{14} - 10^{13} \text{ €} \approx 1 \text{ US \$}$ (۱۰۰ تریلیون یورو) است. این مبلغ برابر با هزینه پرداخت شده برای سایر انرژی‌های قابل تجدید در عرض ۵ سال خواهد بود [1]. امروزه، مصرف جهانی هیدروژن به عنوان یک ماده خام شیمیایی در حدود 10^{10} kg/year است که به مقدار خیلی زیاد با استفاده از سوخت‌های فسیلی و از طریق واکنش:



و در درجه حرارت بالا ($>850^\circ\text{C}$) تولید می‌شود. این واکنش گرمایگیر بوده و بنابراین، $8/9 \text{ kWh.kg}^{-1}$ انرژی هیدروژن را مصرف می‌کند. در هر حال، تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی، قابل تجدید نیست و فقط مقداری دی‌اکسیدکربن ناشی از سوختن

مستقیم سوخت فسیلی را تولید می‌کند. چنانچه اگر هیدروژن به طور مستقیم از نور خورشید (شکل ۴) یا به طور غیر مستقیم از طریق الکتریسیته از یک منبع تجدید شدنی نظیر انرژی باد یا آب تولید شود، یک سوخت تجدید شدنی خواهد بود. برخی از تحقیقات اخیر در زمینه واکنش شیمیایی تجزیه آب $[H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2]$ بر اثر حرارت انجام شده است [5].

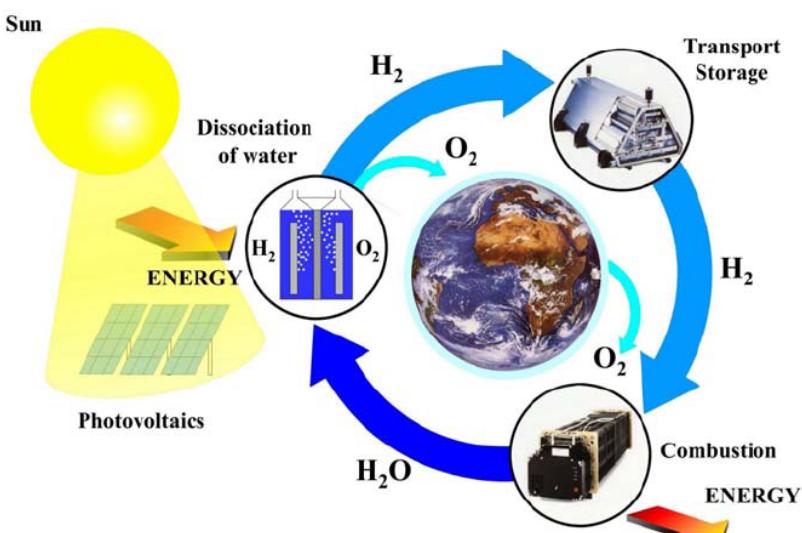


شکل ۴- نمایی از کره زمین با علامتی در صحراء که نیاز است سطح آن با سلول‌های فوتوفولتائیک برای تولید 6×10^{14} kWh/year انرژی در جهان پوشیده شود. در سمت راست نمایی از زمین در طی شب که نشان دهنده مصرف انرژی تولید شده است، نشان داده شده است.

تولیدات گازی که در نتیجه تجزیه شیمیایی آب بر اثر حرارت ایجاد می‌شوند، می‌باید در درجه حرارت بالا به منظور جلوگیری از ترکیب مجدد و جلوگیری از تولید یک مخلوط انفجاری نهائی، جدا شوند. جداسازی در درجه حرارت پایین ساده‌تر و عملیاتی‌تر است که این مهم به وسیله سرد کردن سریع توسط تزریق یک گاز سرد یا بر اثر انبساط در یک نازل ایجاد می‌شود. اما سرد کردن یک افت عمدی در بازده خروجی فرآیند ایجاد می‌کند. به علاوه درجه حرارت‌های خیلی بالا مورد نیاز در فرآیندهای ترمودینامیکی

مشکلات عمده‌ای را به دنبال دارد، بنابراین کاهش کارآیی جذب و در نهایت کاهش بیشتر کارآیی انرژی را در پی خواهد داشت.

الکتریسیته از یک منبع انرژی تجدیدپذیر، نظیر انرژی باد، سلول‌های فتوولتائیک، انرژی آب و... به منظور الکترولیز آب مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۵). الکترولیز در فشار و درجه حرارت محیط به یک ولتاژ حداقل در حدود $1/48\text{ V}$ نیاز دارد.



شکل ۵ - چرخه هیدروژن

هیدروژن می‌تواند مشابه گاز طبیعی توسط لوله منتقل شود. در حال حاضر شبکه‌هایی به این منظور وجود دارند، یک شبکه 1500 km در اروپا و یک شبکه 720 km در ایالات متحده از قبل راهاندازی شده بودند. قدیمی‌ترین شبکه انتقال هیدروژن در منطقه روهه^۱ آلمان وجود دارد که بیش از 50 سال فعال است. لوله‌ها از جنس فولاد با قطر $25-30\text{ cm}$ ساخته شده‌اند و در فشار $10-20\text{ bar}$ فعالیت می‌کنند. دانسیتۀ حجمی گاز هیدروژن 36% درصد دانسیتۀ حجمی گاز طبیعی در فشار

^۱ - Ruhr

یکسان است. به منظور انتقال مقدار مساوی از گاز هیدروژن و گاز طبیعی می‌بایست سرعت جريان هیدروژن $2/8$ برابر بیشتر از سرعت جريان گاز طبیعی باشد. در هر حال، ويسيكوزيته هيدروژن Pa.s^{-1} است که به صورت معنی داری کمتر از ويسيكوزيته گاز طبیعی Pa.s^{-1} است. حداقل توان لازم برای پمپ یک گاز از طریق لوله توسط فرمول زیر به دست می‌آید:

$$P = 8\pi l v^2 \eta$$

که l طول لوله، v سرعت، η ويسيكوزيته دینامیکی گاز است. بنابراین توان انتقال هر واحد انرژی هیدروژن $2/2$ برابر بزرگتر از گاز طبیعی است. کل انرژی تلف شده در طی نقل و انتقال هیدروژن در حدود 4% کل انرژی است. به علت وجود طول زیاد لوله و بنابراین حجم بزرگ سیستم‌هایی که توسط لوله هیدروژن را منتقل می‌کنند، تغییری مختصر در فشار سیستم می‌تواند منجر به تغییرات عمده‌ای در مقدار گاز هیدروژن در داخل شبکه شود. بنابراین، خطوط لوله می‌توانند به منظور کنترل تغییرات در تهیئة هیدروژن به موازات اجتناب از هزینه‌های ذخیره‌سازی آن مورد استفاده قرار گیرند.

مسئله دیگر بحث مصارف عمومی و استفاده ایمن از تجهیزات هیدروژن (واحدهای تولید و ذخیره سازی آن) است، به علاوه کاربرد ایمن آن (مثالاً به عنوان سوخت وسایل نقلیه یا استفاده در خانه) و مقایسه بین هیدروژن و دیگر سوخت‌ها از نظر تئوری و عملی نشان می‌دهد که هیدروژن همچنان نیاز به ایمنی بیشتری دارد. در واقع بحث مهم بر روی هیدروژن بیشتر به ایمنی و اقتصاد آن متمرکز شده است. آگاهی داشتن از خطرات بالقوه هیدروژن و خطرات احتمالی ناشی از تجهیزات هیدروژن بسیار مهم است. هیدروژن می‌تواند مسبب یک سری از حوادث شود که بستگی به زمان احتراق و فضای اطراف آن دارد.

فصل اول

خواص هیدروژن و مقایسه آن با سوخت‌های دیگر

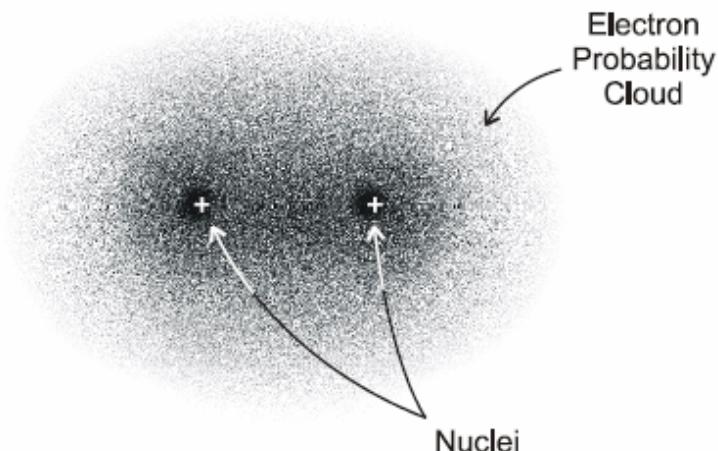
۱-۱- ساختار اتمی

هیدروژن با تشکیل ۷۵٪ از حجم ستاره‌ها و کهکشان‌ها فراوان‌ترین و ساده‌ترین عنصر در جهان است. می‌توان تصور کرد که اتم هیدروژن از یک هسته مرکزی تشکیل شده است که یک الکترون به دور این هسته همانند چرخش یک سیاره به به دور خورشید می‌چرخد. دانشمندان بر این عقیده‌اند که یک ابر الکترونی همانند یک قشر کروی اطراف هسته را اشغال کرده است (شکل ۱-۱).

اتم‌های هیدروژن از یک پروتون منفرد تشکیل شده‌اند، مگر در شکل کمیاب آن (ایزوتوپ هیدروژن) که از یک پروتون و یک نوترون تشکیل شده است. به این ایزوتوپ دوتریم یا هیدروژن سنگین گفته می‌شود. هیدروژن دارای ایزوتوپ دیگری به نام تریتیم که دارای دو نوترون و یک پروتون می‌باشد نیز است، اما این ایزوتوپ ناپایدار بوده و از بین می‌رود.

بیشتر جرم اتم هیدروژن در هسته آن است. در حقیقت، پروتون، ۱۸۰۰ برابر سنگین‌تر از الکترون می‌باشد. نوترون‌ها تقریباً جرم یکسانی با پروتون‌ها دارند. به هر حال شعاع الکترونی که اندازه اتم را شامل می‌شود تقریباً ۱۰۰۰۰۰ برابر بزرگتر از شعاع هسته آن است. به وضوح مشخص است که اتم‌های هیدروژن دارای فضای خالی بسیار بزرگی هستند. اتم‌های همه عناصر دارای فضای خالی زیادی بوده، اما همه آن‌ها سنگین‌ترند و دارای الکترون‌های بیشتری می‌باشند.

Hydrogen Molecule (H_2)



شکل ۱-۱- ساختار اتمی یک مولکول هیدروژن

پروتون دارای بار الکتریکی مثبت، الکترون دارای بار الکتریکی منفی بوده و نوترون نیز بدون بار است. بارهای همراه پروتون و الکترون در هر اتم هیدروژن هم‌دیگر را خنثی کرده و به همین دلیل اتم‌های منفرد هیدروژن از نظر الکتریکی خنثی هستند. از نظر شیمیایی، آرایش اتمی یک الکترون منفرد در اطراف هسته بسیار واکنش‌پذیر است. به همین دلیل اتم‌های هیدروژن با هم ترکیب شده و به صورت مولکول‌های جفت شده (دو تایی، H_2 به جای H) وجود دارند. هر پروتون در مولکول هیدروژن جفت شده دارای میدانی است که می‌توان از نظر ریاضی تصور کرد که دارای یک اسپین است. مولکول‌هایی که هر جفت پروتون آن‌ها دارای اسپین یکسان هستند را اورتو هیدروژن و مولکول‌هایی که پروتون‌های آن‌ها دارای اسپین مخالف هستند را پارا هیدروژن می‌نامند.

بیش از ۷۵٪ از هیدروژن‌های معمولی موجود در دمای اتاق اورتو هیدروژن هستند. این مهم است که در دمای خیلی کم اورتو هیدروژن بسیار ناپایدار بوده و به آرایش پایدار پارا هیدروژن، تبدیل می‌شود، که فرآیندی گرمایی هست. این حرارت آزاد

شده می‌تواند برای فرآیندهای هیدروژن در دمای پایین، به خصوص در حالت مایع مشکل ایجاد کند.

۱-۱-۱- ترکیب دیگر سوخت‌ها

مقایسه هیدروژن با دیگر سوخت‌های هیدروکربنی شناخته شده می‌تواند مفید باشد. تمامی سوخت‌های هیدروکربنی دارای ساختمان مولکولی متشکل از اتم‌های هیدروژن و کربن هستند.

متان ساده‌ترین هیدروکربن است، که جزء مهمی از گاز طبیعی هست. دیگر مواد موجود در گاز طبیعی عبارت از: اتان، پروپان، بوتان، پنتان و به علاوه ناخالصی‌های دیگر هستند. متان دارای فرمول شیمیایی CH_4 بوده، به این معنی که این مولکول از چهار اتم هیدروژن و یک اتم کربن تشکیل شده است.

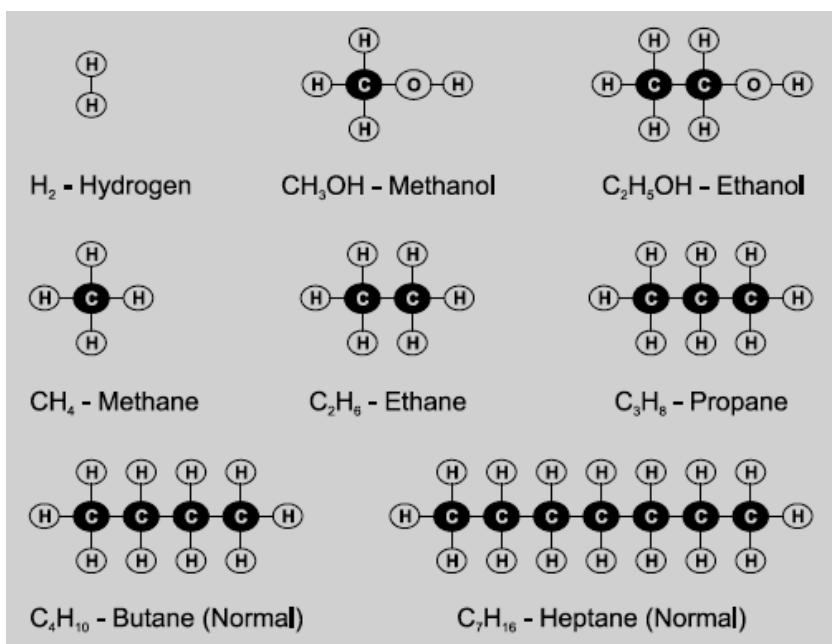
دیگر هیدروکربن‌های معمولی اتان (C_2H_6), پروپان (C_3H_8) و بوتان (C_4H_{10}) هستند. تمامی این هیدروکربن‌ها به دلیل آن که کمتر از ۵ اتم کربن دارند، دارای وزن مولکولی پایینی بوده و هیدروکربن‌های سبک را تشکیل می‌دهند (یک اتم کربن ۱۲ برابر سنگین‌تر از یک اتم هیدروژن است).

بنزین مخلوطی از مواد هیدروکربنی مختلف می‌باشد که مهمترین جزء آن هپتان (C_7H_{16}) است. بنزین، گازوئیل، نفت سفید، و مواد موجود در آسفالت، نفت سنگین و واکس‌ها چون از تعداد زیادی اتم کربن تشکیل شده و دارای وزن مولکولی زیادی می‌باشند هیدروکربن‌های سنگین نامیده می‌شوند.

هیدروکربن‌های سبک در شرایط معمولی فشار اتمسفریک و دما در حالت گاز هستند. هیدروکربن‌های سنگین با داشتن ۵ تا ۱۸ اتم کربن در ترکیب‌شان، در شرایط محیط به حالت مایع بوده و ویسکوزیتی آن‌ها با وزن مولکولی شان افزایش می‌یابد.

دیگر سوخت‌های شیمیایی شامل الکل‌ها می‌شوند که در مولکول‌های آن‌ها اتم‌های هیدروژن و اکسیژن (OH) با هم جفت شده و از یک یا چند گروه (OH) تشکیل شده‌اند. سوخت‌های الکلی معمولی مثل متانول (CH_3OH) و اتانول ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ، می‌توانند با هیدروکربن‌ها برای استفاده در موتورهای احتراق درونی

ترکیب شوند (شکل ۱-۲) [6].



شکل ۱-۲- ساختار شیمیایی سوخت‌های رایج

۱-۲- خواص فیزیکی

۱-۲-۱- حالت

تمامی مواد موجود در زمین دارای حالت‌های گاز، مایع و یا جامد هستند. مواد از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شوند که به دما و فشار محیط وابسته است. در واقع، یک گاز با کاهش دما می‌تواند به یک مایع تبدیل شود و به همین صورت با کاهش زیاد دما، مایع نیز به جامد تبدیل می‌شود.

تبدیل از حالت مایع به گاز را جوشیدن، و تبدیل از مایع به جامد را انجماد می‌گویند. بنابراین، هر ماده‌ای می‌تواند دارای یک مشخصه نقطه جوش و نقطه انجماد (در فشار معین) باشد. به علاوه این تبدیل‌ها، تبدیل از گاز به مایع و جامد به مایع را به ترتیب میان و ذوب می‌گویند. نقطه میان شبیه نقطه جوش و نقطه ذوب شبیه نقطه انجماد است.