



مروری بر مواد با قابلیت جذب و ذخیره‌سازی هیدروژن

آروین تقی‌زاده تبریزی^{۱*}، حسین آقاجانی^۲، فرهاد فرهنگ لاله^۳

^۱دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی، گروه مهندسی مواد دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز

^۲دانشیار، گروه مهندسی مواد دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز

^۳کارشناس پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

*تبریز، iarvintt@tabrizu.ac.ir

چکیده

تلاش‌های فراوانی در زمینه استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر برای جایگزینی با سوخت فسیلی و تامین انرژی مورد نیاز بشر به صورت پاک تا به امروز صورت گرفته است. یکی از جذاب‌ترین گزینه‌ها که در سال‌های اخیر توجه بسیار از پژوهشگران را به خود جلب کرده، یکی از فراوان‌ترین عنصر روی زمین، هیدروژن است. برای استفاده از هیدروژن به عنوان منبع انرژی دو نکته بسیار حائز اهمیت است، اولی مسئله تولید هیدروژن و دومی ذخیره‌سازی هیدروژن. در مقاله پیش‌رو به بررسی مواد جذب جهت ذخیره‌سازی هیدروژن پرداخته شده است. هیدریدهای فلزی، مواد پایه نیتروژنی، مواد پایه منیزیمی و مواد پایه کربنی چهار گروه عمده جهت ذخیره‌سازی هیدروژن هستند که توجه‌های بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. راندمان فارادیک پارامتری است که میزان هیدروژن ذخیره شده را به صورت تئوری بیان می‌کند. براساس مطالعات انجام شده، به لحاظ سینتیکی چگالی جریان بالا، ولتاژ پایین و نرخ جریان دشارژ بالا قابلیت ذخیره هیدروژن را در مواد پایه کربنی و علی‌الخصوص نانولوله‌های کربنی افزایش می‌دهد. افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن می‌تواند امکان دسترسی به یک سوخت پاک را برای همه مصارف انرژی فراهم کند.

کلیدواژگان: ذخیره‌سازی هیدروژن، مواد جذب هیدروژن، انرژی‌های نو و تجدیدپذیر، مواد پایه کربنی، سوخت پاک

Review on the Materials for Hydrogen Adsorption & Storage

Arvin Taghizadeh Tabrizi¹, Hossein Aghajani¹, Farhad Farhang Laleh²

¹Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz Iran

²Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran

Tabriz, Iran, iarvintt@tabrizu.ac.ir

Received: 23 May 2019 Accepted: 9 October 2019

Abstract

Many Efforts have been made in order to use new and renewable energy instead of fossil fuels and as a supply of the needed clean energy. One of the most interesting options which attracts researches' attention, is one of the most common element in the earth, Hydrogen. For using the hydrogen as a source of energy, there are two important points which should be considered carefully, first is the technology of production of hydrogen and second the storage of hydrogen. In this article the hydrogen adsorbent materials are introduced. The metallic hybrids, Nitrogen based materials, Mg-based materials and carbon based materials are four main groups of hydrogen storage materials that attracts many attentions. Faradic parameter described theoretically the capability of hydrogen storage. Based on the before investigation, high current density, lower voltage and high discharge rate in carbon based materials especially in carbon nano tubes increase the capability of hydrogen storage. Increasing the storage capacity of hydrogen will help human being to access the clean fuel for all uses in energy.

Keywords: Hydrogen Storage, Hydrogen Adsorbent, New and renewable energies, Carbon Based Materials, Clean Fuel



۱-مقدمه

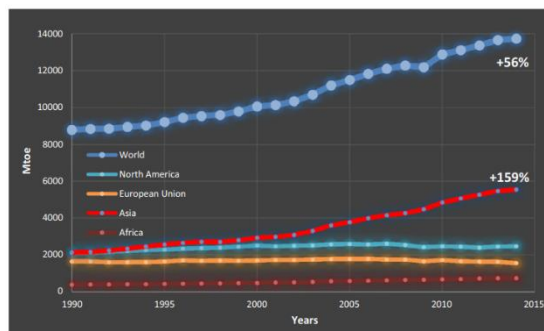
ظرفیت بالا مکانیزم ذخیره هیدروژن به روش الکتروشیمیایی است [۱۴]. همین‌طور روش‌های دیگر جهت ذخیره‌سازی هیدروژن با ذکر راندمان کاری در جدول ۱ آورده شده است. برای مثال هیدروژن جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی است. محصول ناشی از احتراق سوخت هیدروژنی بخار آب است که آن را به یکی از پاک‌ترین سوخت‌های جهان تبدیل می‌کند. با این وجود مشکلات فنی در زمینه ذخیره هیدروژن وجود دارد که بدون توجه به روش ذخیره‌سازی، باعث تلفات زیادی در مقدار هیدروژن تولید شده می‌شود. در سیستم‌های ذخیره‌سازی، ۲۵ الی ۴۵ درصد انرژی هیدروژن در حین فرایند میعان تلف شده و تنها ۹ درصد انرژی ذخیره شده قابل استفاده در سیستم‌های پر فشار است [۱۵]. با توجه به تحقیقات انجام شده، این مشکل ناشی از مواد مورد استفاده است که در ادامه به تفصیل، معرفی شده‌اند.

۲- مواد ذخیره‌سازی هیدروژن

۱- هیدریدهای فلزی

هیدریدهای فلزی به دلیل قابلیت ذخیره‌سازی وزنی، حجمی و ایمنی بالاتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بعضی از عناصر فلزات واسطه به مانند تیتانیوم، پالادیوم و وانادیوم به راحتی با هیدروژن در دما و فشار پایین واکنش می‌دهند که می‌توان از این عناصر به عنوان کاتالیزور در فرایندهای ذخیره‌سازی هیدروژن استفاده کرد [۲ و ۱۷]. تحقیقات نشان داده است که حضور نانوذرات پالادیوم باعث بهبود فرایند جذب در تکنولوژی الکتروشیمیایی می‌شود [۱۸]. همچنین استفاده از برم نیتريد نیز باعث افزایش جذب هیدروژن شده است [۱۹]. همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، اتم‌های هیدروژن به دلیل کوچک بودن به جاهای خالی شبکه نیتريد فلزی تشکیل شده نفوذ کرده و ساختار هیدریدی، از هیدروژن اشباع شده و سپس آن را برای مصارف مورد نیاز پس می‌دهد که اینکار با توجه به اساس تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی هیدروژن، از طریق افزایش دما و فشار امکان‌پذیر است.

وابستگی روز افزون بشر به انرژی، محققان و پژوهشگران را بر آن داشته تا با توسعه منابع مورد نیاز برای تامین انرژی، این نیاز را رفع کنند. روند افزایش نیاز به انرژی در شکل ۱ آورده شده است [۱]. همچنین با علم به وابستگی شدید به انرژی‌های سوختی که باعث مشکلات زیادی از جمله گرمایش جهانی شده است، سعی در به حداقل رساندن این مشکلات و حفاظت از محیط زیست و سلامت انسان‌ها نیازی ضروری است [۲]. با توسعه روزافزون صنایع و استراتژی‌های تدوین شده در زمینه تامین انرژی مورد نیاز، بحث استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان قرار گرفته است. تلاش‌های فراوانی در زمینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیری همانند انرژی بادی و انرژی خورشیدی با استفاده از توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی [۳ و ۴]، مواد تغییر فازی [۵] صورت گرفته است. علاوه بر طرح‌های تدوین شده برای استفاده از این انرژی‌ها، امکان جذب و استفاده از کربن دی اکسید تولید شده در صنایع [۶-۸] و همچنین جذب و ذخیره‌سازی هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته و پیشرفت‌های قابل توجهی در این زمینه بدست آمده است. هیدروژن به عنوان فراوان‌ترین عنصر در هستی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در صنایع مختلف با کاربردهای فراوان قرار گرفته است [۹-۱۱]. بدین منظور و برای آشنایی بیشتر با این شاخه از جذب انرژی، سعی بر این شده است که پیشرفت‌های اخیر در زمینه جذب و ذخیره‌سازی هیدروژن مورد بررسی قرار بگیرد.



شکل ۱. نمودار مقایسه نیاز به انرژی قاره‌ها و جهان در سال ۲۰۱۵ [۱]

جدول ۱. روش‌های جذب هیدروژن به همراه راندمان [۱۶]

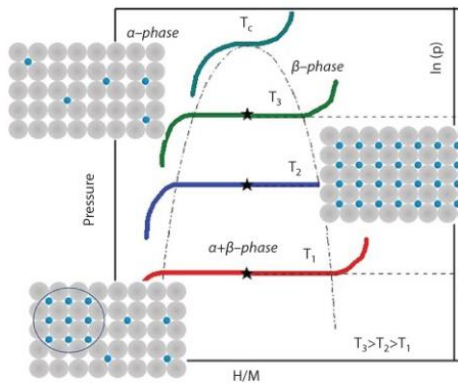
فرایند جذب هیدروژن	راندمان
دوباره شکل‌دهی بخار ^۲	۷۴-۸۵٪
اکسیداسیون جزئی	۶۰-۷۵٪
دوباره شکل‌دهی اتوترمال ^۳	۵-۶۰٪

از معروف‌ترین و رایج‌ترین روش‌های جذب هیدروژن، روش الکتروشیمیایی است [۲ و ۱۲]. در این روش هیدروژن از تجزیه آب روی الکتروود پلاریزه شده در سلول الکتروشیمیایی تولید شده و بر روی الکتروود دیگر جذب می‌شود [۱۳]. جذب هیدروژن اتمی موجود در فصل مشترک، نفوذ هیدروژن اتمی از طریق حفره‌ها و نقص‌های شبکه و نفوذ حالت جامد برای دستیابی به

^۲Auto-thermal Reforming

^۳Phase Change Materials
^۳Vapor Reforming





شکل ۳. شماتیک بررسی ترمودینامیک جذب و تخلیه هیدروژن در هیدرید فلزی [۲۰]

جدول ۲. برخی از ترکیبات فلزی مهم جاذب هیدروژن (هیدروژن کم) [۲۰]

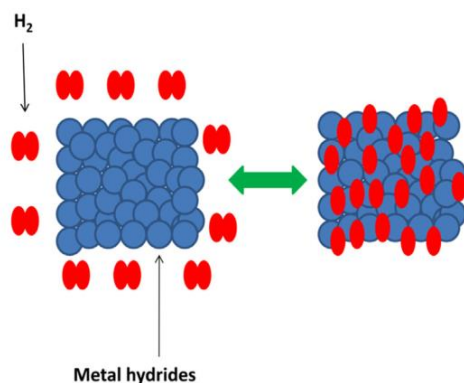
ترکیب فلزی	بین نمونه	ساختار
AB ₅	LaNi ₅	هگزاگونال
AB ₂	ZrV ₂ , ZrMn ₂ , TiMn ₂	فاز لاهه، هگزاگونال و یا مکعبی
AB ₃	CeNi ₃	هگزاگونال
A ₂ B ₇	Y ₂ Ni ₇ , Th ₂ Fe ₇	هگزاگونال
A ₆ B ₂₃	Y ₆ Fe ₂₃	مکعبی
AB	TiFe, ZrNi	مکعبی
A ₂ B	Mg ₂ Ni, Ti ₂ Ni	مکعبی

۲- سیستم‌های پایه نیتروژنی

سیستم‌های حاوی نیتروژن به عنوان یکی از برجسته‌ترین مواد برای جذب هیدروژن مطرح هستند. اندرکنش بین نیتروژن و هیدروژن، باعث بهبود و توسعه سیستم‌های فلز-نیتروژن-هیدروژن شده است. آمیدها $(M(NH_2)_x)$ و ایمیدها $(M(NH)_x)$ دو نوع از معروف‌ترین سیستم‌های ذکر شده هستند. لازم به ذکر است که این سیستم‌ها می‌توانند از یک تا سه جز فلزی (کاتیون) داشته باشند. در حال حاضر تحقیقات بسیار گسترده‌ای در زمینه مطالعه این سیستم‌ها در حال انجام است تا علاوه بر ذخیره هیدروژن در زمینه تولید آمونیاک نیز از آن استفاده گردد [۲۱].

بیوپرولیز	۳۵-۵۰٪
بیوگازدهی	۳۵-۵۰٪
بیوفوتولیز	۰٫۵٪
فرمانتاسیون سیاه	۶۰-۸۰٪
فوتو فرمانتاسیون	۰/۱٪
فوتو الکترولیز	۰/۰۶٪

جنبه‌های ترمودینامیکی استفاده از هیدریدهای فلزی را می‌توان با استفاده از نمودارهای سه تایی فشار-ترکیب شیمیایی-دما توضیح داد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ایزوترم‌های برگشت‌پذیری هیدریدی نشان داده شده است. با اندازه‌گیری تغییرات فشار هیدروژن و غلظت متناظرش در یک دمای مشخص، نمودار بدست می‌آید. بصورت ایده‌آل، نمودار دارای قسمت صافی است که ناشی از حضور همزمان محلول جامد α و هیدرید β است. همان‌طور که در شکل مشخص است در دماهای کمتر، این منطقه صاف وسیع‌تر بوده و هیدروژن بیش‌تری جذب سیستم می‌شود، که با افزایش دما، این منطقه باریک‌تر شده و در بالای دمای بویل، تمامی هیدروژن جذب شده، تخلیه می‌گردد. این موضوع با توجه به قانون فاز گیبس، کاملاً قابل توجیه است. لیست مهم‌ترین ترکیبات هیدرید فلزی جاذب هیدروژن در جدول ۲ آورده شده است.

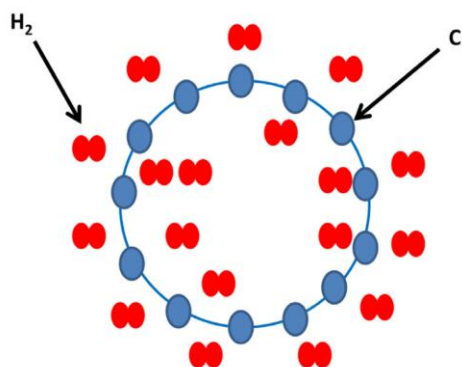


شکل ۲. شماتیک جذب هیدروژن توسط هیدرید فلزی [۱۶]



۳- مواد نانو ساختار پایه منیزیومی

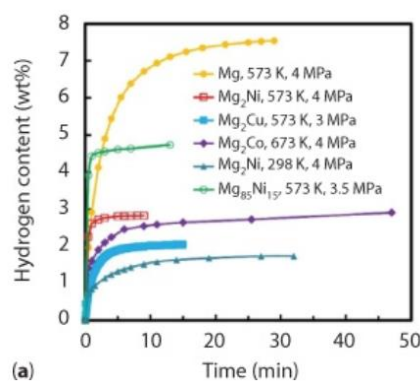
نیز باعث توزیع ناهمگن حامل‌های انرژی می‌شود. هم‌چنین ساختار لایه لایه‌ای غیرمتمقارن گرافن که با نیروی واندروالس به هم متصل هستند، باعث ایجاد گاف‌های انرژی می‌شود که قابلیت جذب هیدروژن را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [۱۳]. هم‌چنین برای افزایش این قابلیت پیشنهاد شده است که روش‌های دوپ کردن گرافن با موادی نظیر نیتروژن، عناصر قلیایی و فلزات واسطه و یا اکسید کردن گرافن استفاده شود.



شکل ۵. شماتیک جذب هیدروژن به ساختار پایه کربنی (نانولوله کربن) [۱۶]

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ریزساختار و مورفولوژی نانومواد کربنی تاثیر زیادی بر روی ذخیره هیدروژن دارد. در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است که نانولوله‌های کربنی جهت یافته قابلیت ذخیره هیدروژن بیش‌تری نسبت به نانولوله‌های ناهمسان‌گرد دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نانولوله‌های کربنی دارای خاصیت قدرت جذبی بیش‌تری نسبت به نانو فیبرهای کربنی هستند [۲۵]. هم‌چنین خلوص، چیرالیتی لوله‌ها، قطر لوله‌ها و میزان حضور عناصر فلزی به عنوان کاتالیست مرحله سنتز نانولوله‌ها در ریزساختار، تاثیر زیادی بر روی میزان جذب هیدروژن دارد [۱۵ و ۲۸]. عناصر فلزی موجود در ریزساختار می‌توانند با واکنش با هیدروژن در طول فرایند فعالسازی این قابلیت را افزایش دهند.

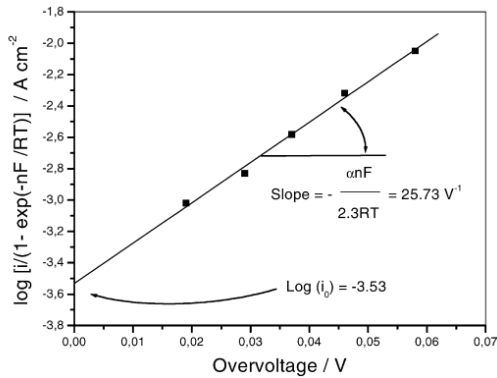
مواد پایه منیزیومی به دلیل قابلیت جذب بالای هیدروژن (در حدود ۷/۶ درصد وزنی، که در شکل ۴ نشان داده شده است)، چگالی پایین، برگشت-پذیری خوب و هزینه پایین، بسیار مورد توجه قرار گرفته است ولی به دلیل مشکلات سینتیکی و پایداری ترمودینامیکی بالا مربوط به عدم تغییر ظرفیت جذب در دماهای مختلف و عدم تغییر محسوس آنتالپی واکنش جذب، در عمل با مشکلات فراوانی مواجه است [۲۲-۲۴]. به همین منظور مطالعات فراوانی بر روی سیستم‌های پایه منیزیومی که با آلیاژسازی منیزیم با عناصر دیگر همراه بوده، انجام شده است. استفاده از عناصر فلزات واسطه به مانند نیکل و عناصر کم‌یاب به مانند لانتانید باعث بهبود این رده از مواد شده است. لین هو و همکارانش نشان دادند که با استفاده از ترکیب سه تایی منیزیم، عناصر فلزات واسطه و فلزات کم‌یاب، نتیجه‌ی بهتری در این زمینه بدست می‌آید [۲۴]. برای جذب بهتر هیدروژن، بهتر است از ذرات نانو به جای ذرات میکرو استفاده شود، زیرا میزان سطح موثر در ذرات نانو بسیار بیشتر بوده و جذب هیدروژن بیش‌تری اتفاق می‌افتد.



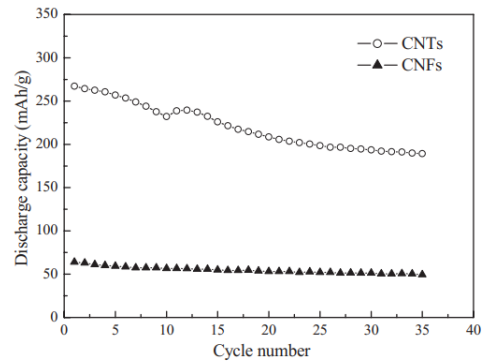
شکل ۴. میزان جذب هیدروژن در مواد پایه منیزیومی [۱۴]

۴- مواد پایه کربنی

در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به مواد پایه کربنی به دلیل هدایت الکتریکی فوق‌العاده، مساحت سطحی زیاد در حدود ۲۶۰۰ مترمربع بر گرم و پایداری شیمیایی مناسب شده است [۲۷-۲۵]. جذب مولکول‌های هیدروژنی به ساختار پایه گرافنی (نانولوله کربنی) به صورت طرحواره در شکل ۵ آورده شده است. در بین تمامی انواع کربن، کربن فعال، نانو لوله‌ها و گرافن دارای ظرفیت جذب هیدروژن بالایی هستند. گرافن در مقایسه با کربن فعال دارای سطح کمتری نسبت به کربن فعال است که بر این اساس بایستی میزان کمتری هیدروژن جذب کند ولی با توجه به عیوب ریزساختاری در ساختار گرافن و انرژی بالای آن‌ها، مکان‌های ترجیحی مناسبی برای جذب هیدروژن اتمی هستند و قابلیت جذب را بالا می‌برند. پروکیدیگی‌های ذاتی در صفحات گرافنی

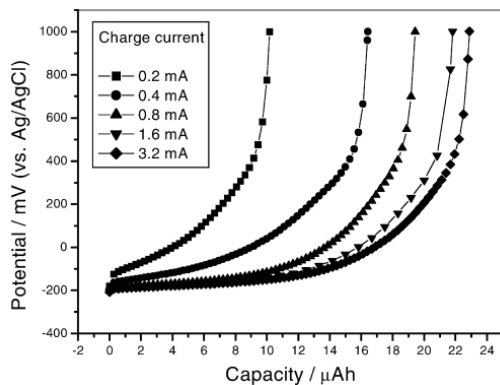


شکل ۷. منحنی تافل اصلاح شده برای جذب هیدروژنی نانولوله‌های کربنی [۲۸]



شکل ۶. عملکرد سیکلی نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانو فیبرها (CNF) در چگالی جریان ۸۰۰ میلی آمپر بر گرم [۱۵]

هم‌چنین تاثیر جریان دشارژ بر میزان هیدروژن ذخیره شده در شکل ۸ نشان داده شده است. این منحنی نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین این دو پارامتر است که دلیل آن افزایش میزان هیدروژن اتمی در اثر افزایش جریان است. راندمان فارادیک پارامتری است که میزان هیدروژن ذخیره شده را به صورت تئوری بیان می‌کند. تغییرات این پارامتر بر حسب جریان و شارژ در شکل ۹ آورده شده است. بصورت خلاصه مشخص می‌شود که به لحاظ سینتیکی چگالی جریان بالا، ولتاژ پایین و نرخ جریان دشارژ بالا قابلیت ذخیره هیدروژن را افزایش می‌دهد.



شکل ۸. تغییرات ظرفیت ذخیره هیدروژن نانولوله کربن بر حسب جریان و ظرفیت [۲۸]

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته، واکنش دشارژ به شرح زیر است:



که در آن هیدروژن جذب شده در طرف دوم توسط نانولوله کربنی مشخص است و برای بررسی سینتیکی پارامترهای موثر در این فرایند، روش پیشنهادی آلن و هیکلینگ مورد استفاده قرار گرفته است. معادله تافل کلاسیک به شرح زیر است: [۲۸]

$$i = i_0 \exp\left(\frac{-\alpha n F \eta}{RT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-n F \eta}{RT}\right)\right] \quad ۲$$

و یا

$$\log\left[\frac{i}{1 - \exp\left(\frac{-n F \eta}{RT}\right)}\right] = \log(i_0) - \frac{\alpha n F \eta}{2.303 RT} \quad ۳$$

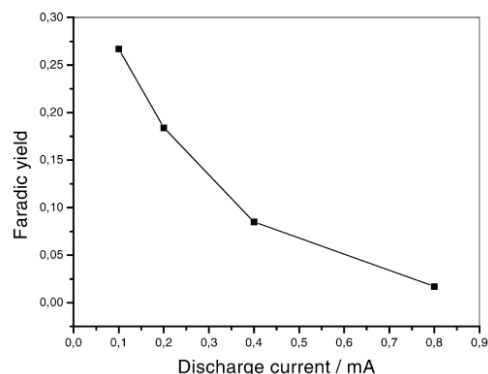
این معادله در شکل ۷ نشان داده شده است که ضریب انتقال α از شیب این منحنی بدست می‌آید.



۱۴۰۴	SWCNT/Ni	۱۴
------	----------	----

۲- نتیجه‌گیری

با توجه به اساس استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و نو که مبنی بر جذب و نشر است، مواد زیادی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا بتوان از این ویژگی آن‌ها بیشترین بهره را برد. برای جذب و ذخیره‌سازی هیدروژن به عنوان یکی منابع سوختی پاک و زیست‌دوست، مواد گوناگونی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که در این بین هیدریدهای فلزی، مواد پایه نیتروژنی، مواد پایه منیزومی و مواد پایه کربنی مورد توجه قرار گرفته‌اند. راندمان فارادیک پارامتری است که قابلیت جذب هیدروژن را در این مواد تعیین می‌کند. براساس مطالعات انجام شده ترکیب مواد فوق احتمالاً می‌تواند قابلیت جذب هیدروژن را افزایش دهد و این قابلیت نوید استفاده از یک سوخت پاک را برای همه مصارف انرژی را می‌دهد.



شکل ۹. تغییرات راندمان فارادی بر حسب جریان دشارژ نانولوله کربنی [۲۸]

در نهایت در جدول ۳، ۴ دسته مواد معرفی شده با یکدیگر مقایسه شده و مشخص است که میزان جذب هیدروژن مواد پایه منیزومی و مواد پایه کربنی بهتر است. همچنین مشخص است دوپ کردن گرافن با لایه‌های اکسیدی مانند تیتانیا باعث افزایش قابل توجه قابلیت جذب هیدروژن می‌شود [۱۴].

جدول ۲. مقایسه ظرفیت جذب هیدروژن [۱۴]

ردیف	ماده	میزان جذب هیدروژن mAhg^{-1}
۱	Co	۳۶۰
۲	CoNi	۳۲۵
۳	Ni	۲۹۰
۴	TiNi	۲۱۰
۵	LaNi ₅	۲۵۵
۶	MgTi	۳۶۰
۷	Mg ₂ NiH ₄	۵۷۸
۸	MgNi	۴۹۵
۹	Mg ₇₈ Y ₂₂	۱۵۹۰
۱۰	CNT	۲۷۰
۱۱	Graphene	۱۴۷
۱۲	G/TiO ₂	۳۷۴
۱۳	Ni/Graphene	۹۱۰

۴- منابع

- [1] R. Amirante, E. Cassone, E. Distaso, and P. Tamburrano, "Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies," *Energy Convers. Manag.*, vol. 132, pp. 372–387, 2017.
- [2] Y. Honarpazhouh and F. Razi, "ScienceDirect Electrochemical hydrogen storage in Pd-coated porous silicon / graphene oxide," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 2–9, 2016.
- [3] G. Raam Dheep and A. Sreekumar, "Influence of accelerated thermal charging and discharging cycles on thermo-physical properties of organic phase change materials for solar thermal energy storage applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 13–19, 2015.
- [4] D. Su, Y. Jia, Y. Lin, and G. Fang, "Maximizing the energy output of a photovoltaic-thermal solar collector incorporating phase change materials," *Energy Build.*, vol. 153, pp. 382–391, 2017.
- [5] A.T. Tabrizi, Sh. Khameneh, "Review on Metals and alloys with proper thermal properties as Phase Change Materials with aim of saving thermal energy", *JRENEW_Volume 5_Issue 2_Pages 1-11.pdf*.
- [6] G. Diglio, D. P. Hanak, P. Bareschino, F. Pepe, and F. Montagnaro, "Modelling of sorption-enhanced steam methane reforming in a fixed bed reactor network integrated with fuel cell," *Appl. Energy*, vol. 210, no. July 2017, pp. 1–15, 2018.
- [7] D. P. Hanak and V. Manovic, "Techno-economic feasibility assessment of CO₂ capture from coal- fi red power plants using molecularly imprinted polymer," *Fuel*, vol. 214, no. October 2016, pp. 512–520, 2018.



- [25] X. Chen *et al.*, "Electrochemical hydrogen storage of carbon nanotubes and carbon nanofibers," vol. 29, pp. 743–748, 2004.
- [26] H. Feng, Y. Wei, C. Shao, Y. Lai, S. Feng, and Z. Dong, "Study on overpotential of the electrochemical hydrogen storage of multiwall carbon nanotubes," vol. 32, pp. 1294–1298, 2007.
- [27] M. Wu, H. Hsu, H. Chiu, and Y. Lin, "Fabrication of nickel boride-coated carbon nanotube films by electrophoresis and electroless deposition for electrochemical hydrogen storage," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 17, pp. 8993–9001, 2010.
- [28] P. Paolo, A. Pozio, S. Botti, and R. Ciardi, "Electrochemical studies of hydrogen evolution, storage and oxidation on carbon nanotube electrodes," vol. 118, pp. 265–269, 2003.
- [8] D. P. Hanak, C. Biliyok, and V. Manovic, "Efficiency improvements for the coal-fired power plant retrofit with CO₂ capture plant using chilled ammonia process," *Appl. Energy*, vol. 151, pp. 258–272, 2015.
- [9] M. Choi, Y. Min, G. Gwak, S. Paek, and J. Oh, "A Nanostructured Ni / Graphene Hybrid for Enhanced Electrochemical Hydrogen Storage," *J. Alloys Compd.*, 2014.
- [10] A. Reyhani, S. Z. Mortazavi, A. N. Golikand, A. Z. Moshfegh, and S. Mirershad, "The effect of various acids treatment on the purification and electrochemical hydrogen storage of multi-walled carbon nanotubes," vol. 183, pp. 539–543, 2008.
- [11] M. Mohammadi and B. Khoshnevisan, "ScienceDirect Electrochemical hydrogen storage in EPD made porous Ni-CNT electrode," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 2–6, 2015.
- [12] Y. Wang, W. Deng, X. Liu, and X. Wang, "Electrochemical hydrogen storage properties of ball-milled multi-wall carbon nanotubes," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 1437–1443, 2009.
- [13] G. F. Guo *et al.*, "Surface & Coatings Technology Electrochemical hydrogen storage of the graphene sheets prepared by DC arc-discharge method," vol. 228, pp. 120–125, 2013.
- [14] A. Eftekhari and B. Fang, "ScienceDirect Electrochemical hydrogen storage: Opportunities for fuel storage, batteries, fuel cells, and supercapacitors," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 40, pp. 25143–25165, 2017.
- [15] H. Zhang *et al.*, "The electrochemical hydrogen storage of multi-walled carbon nanotubes synthesized by chemical vapor deposition using a lanthanum nickel hydrogen storage alloy as catalyst," vol. 352, pp. 66–72, 2004.
- [16] A. M. Abdalla, S. Hossain, O. B. Nis, and A. T. Azad, "Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review," vol. 165, no. January, pp. 602–627, 2018.
- [17] C. Series, "Hydrogen storage characterization in metal hydrides," 2018.
- [18] H. Ghorbani and M. Ghorbani, "ScienceDirect Palladium nanoparticle and decorated carbon nanotube for electrochemical hydrogen storage," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 6–11, 2017.
- [19] A. Lale, "Boron Nitride for Hydrogen Storage MINIREVIEW Boron nitride for hydrogen storage," no. May, 2018.
- [20] A. Zuettel, "Materials for hydrogen storage," no. September, pp. 24–33, 2003.
- [21] M. Sankir & N. D. Sankir, "Hydrogen Storage Technologies", *Scrivener Publishing*, 2018
- [22] I. O. P. C. Series and M. Science, "Hydrogen storage properties of mechanical milled MgH₂-nano Ni for solid hydrogen storage material Hydrogen storage properties of mechanical milled MgH₂ - nano Ni for solid hydrogen storage material," 2018.
- [23] O. G. Ershova and V. D. Dobrovolsky, "Ti, Fe, Ni) with low resistance and improved kinetics of hydrogenation / dehydrogenation for hydrogen storage applications," vol. 2, no. July, 2018.
- [24] P. Transformation, H. Storage, and S. Alloy, "Lin Hu *, Rui-hua Nan *, Jian-ping Li, Ling Gao and Yu-jing Wang," 2017.

