



۱۱ الی ۴ خرداد ۱۳۸۵  
تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## فن آوری پیل های سوختی و کاربرد آن در خودرو

### کوروش طباطبایی

معاونت مهندسی گروه خودروسازی سایپا - مدیریت مهندسی قوای محرکه

[Kourosh.tb@saipacorp.com](mailto:Kourosh.tb@saipacorp.com)

#### چکیده

پیل سوختی بهترین پیشنهاد برای جایگزینی بنزین می‌باشد. سیستم های پیل سوختی هیچ گونه آلودگی نداشته و اجزای متحرک ندارند. راندمان پیل های سوختی بیش از سه برابر موتورهای احتراق داخلی است. علیرغم آن که بنزین توسط موتورهای احتراق داخلی مصرف می شود اکثر پیل های سوختی از هیدروژن به عنوان منبع تجدید پذیر استفاده می کنند. کاربرد پیل های سوختی وابستگی به منابع محدود سوخت های فسیلی را کاهش می دهد و مزایای بسیار دیگری نیز دارد. در این مقاله سعی بر این است با معرفی این تکنولوژی و مزایای آن گامی در جهت پیشبرد اهداف آینده پژوهی برداشته و چشم اندازی نوین در خصوص پیشرفت تکنولوژی خودرو در آینده ارائه گردد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی، خودرو های هیبرید، الکترولیت، هیدروژن

#### مقدمه

امروزه میلیون ها نفر از مردم به خودروها به عنوان عامل اصلی حمل و نقل وابسته هستند. خودروها مناسب ترین و مؤثرترین وسیله برای مسافرت هستند. متأسفانه اکثر خودروها از سوخت های فسیلی استفاده می کنند. با مصرف بنزین در موتورهای احتراق داخلی، مونواکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن ها و دی اکسید کربن تولید می شود. این مواد شیمیایی موجب آلودگی هوا، باران های اسیدی و تجمع گازهای گلخانه ای در اتمسفر می گردد که نهایتاً موجب تخریب لایه اوزون می شود. گذشته از تخریب محیط زیست، بنزین منبع انرژی محدودی است. لذا خودروهای یکی از منابع عمده آلودگی هوا به شمار می روند. مشکل بزرگ مصرف اکسیژن هوا، تولید گازهای آلاینده ناشی از دود آگزوها و تخریب طبیعت، خودروسازان را وادار به ساختن خودرویی کرده است که عاری از این نقایص باشد. بنابر این باید منبع انرژی ارزان و مؤثری سریعاً تهیه شود و به طور ایده آل این منبع انرژی باید از نظر مقدار نامحدود و با محیط زیست سازگار باشد. در زمینه برقی کردن خودرو می توان از انواع باتری ها و پیل های سوختی استفاده کرد. برای مثال محققان مبادرت به ساخت خودروهایی با استفاده از باتری های خورشیدی نموده اند. با وجود این از آن جا که باتری ها بر اساس مقدار انرژی انبار شده عمل می کنند، عملکرد محدودی دارند. باتری ها همچنین بسیار بزرگ هستند 17 برابر بیشتر فضا اشغال کرده و 45 برابر سنگین تر از مخازن بنزینی هستند. استفاده از خودروهای خورشیدی، محدود به روزهای آفتابی می شود و بایستی در روزهای ابری و در شب از باتری استفاده کرد.

در مجموع بهترین پیشنهاد برای جایگزینی بنزین، پیل سوختی به نظر میرسد. سیستم های پیل سوختی هیچ گونه آلودگی نداشته و اجزای متحرک ندارند. راندمان پیل های سوختی بیش از سه برابر موتورهای احتراق داخلی است. علیرغم آن که بنزین توسط موتورهای احتراق داخلی مصرف می شود اکثر پیل های سوختی از هیدروژن به عنوان منبع تجدید پذیر استفاده می کنند. کاربرد پیل های سوختی وابستگی به منابع محدود سوخت های فسیلی را کاهش می دهد.

## مروری بر پیل سوختی از گذشته تا حال

در سال 1839 ویلیام گرو (William Groh) فیزیکدان و روزنامه نگار انگلیسی، اصول کار سوختی را کشف کرد گرو چهار پیل بزرگ که هر کدام دارای ظرفی محتوی هیدروژن و اکسیژن بودند را برای تولید الکتریسیته به کار برد. الکتریسیته ی حاصل، آب را در یک ظرف کوچکتر به اکسیژن و هیدروژن تبدیل می کرد. اما سابقه تولید پیل سوختی به سال 1889 بر می گردد که اولین پیل سوختی توسط لودویک من (Ludovic Mond) و چارلز لنجر (Charles Lenjer) ساخته شد. در اوایل قرن بیستم تلاش هایی در جهت توسعه ی پیل سوختی صورت گرفت. در سال 1955 پیل سوختی قلیایی پنج کیلوواتی ساخته شد. از سال 1960 سازمان فضایی آمریکا (ناسا) از پیل های مزبور در سفینه های جیمینی (Gemini & Apollo) و آپولو جهت تولید الکتریسیته و تهیه آب مورد نیاز فضانوردان استفاده کرد. در طی دهه ی هفتاد فن آوری پیل سوختی در وسایل خانگی و خودرو به کار گرفته شد. اولین خودرو مجهز به پیل سوختی حدود سال 1970 توسط شرکت جنرال موتور آمریکا ساخته شد. با سرمایه گذاری این وزارت خانه از سال 1990 فن آور پیل سوختی توسعه ی چشمگیری پیدا کرده است. از دهه ی هشتاد به بعد شرکت بالارد (Balard) در کانادا تحت حمایت دولت با انجام پروژه ساخت زیردریایی که در آن از پیل سوختی استفاده می شد به عنوان پیشرو این صنعت، در دنیا معرفی شد. هواپیمای پیل سوختی ناسا در سال 2000 میلادی با نیروی محرکه دوگانه باتری خورشیدی و پیل سوختی مورد بهره برداری قرار گرفت. این هواپیما توان پرواز طولانی (شش ماه) و بدون وقفه را دارد و با حرکت مستمر خود در یک منطقه از آسمان در سیستم های مخابراتی، جاسوسی و امداد رسانی (در حوادث طبیعی) کاربردهای وسیعی پیدا کرده است.

## خودروهای برقی

علیرغم خودروهای متداول که توسط انرژی حرارتی تولید شده و از احتراق سوخت های فسیلی حرکت می کنند، خودروهای الکتریکی به الکتریسته نیاز دارند و الکتریسته لازم از راه های مختلف قابل دسترسی می باشد. یک راه آن استفاده از باتری های قابل شارژ است که مشابه آن در خودروهای معمولی به عنوان راه انداز به کار می رود. مزیت خودروهای الکتریکی بدون آلودگی بودن آن هاست. البته برای شارژ مجدد باتری ها به الکتریسته نیاز است این الکتریسته بایستی از یک نیروگاه تأمین شود و البته نیروگاه نیز ایجاد آلودگی می کند. اما باید در نظر داشت که کنترل آلودگی چند نیروگاه بسیار ساده تر و امکان پذیرتر از میلیون ها خودرو خواهد بود. حتی با احتساب این آلودگی آلایندهی حاصل از خودروی برقی یک دهم خودروهای متداول است. تقریباً در حدود 2900 خودروی الکتریکی در سال 1995 در آمریکا استفاده شده است که انتظار می رود این تعداد به سبب مقررات سخت کالیفرنیا در خصوص آلودگی، بسیار افزایش یابد.

خودروهای الکتریکی با باتری های شیمیایی معیبه را نیز دارا می باشند و اگر چه قیمت انرژی الکتریکی مورد نیاز برای شارژ آن ها نسبتاً پایین است اما هزینه اولیه خودرو بالاست. باتری های آن ها سنگین بوده و وزن زیادی را به خود اختصاص می دهند. قیمتی در محدوده 1500 - 40000 دلار دارند و بعد از 500 - 600 بار دشارژ (1.5 تا 2 سال) دور انداخته می

شود. محدوده رانش خودروی برقی 130 کیلومتر است. به علاوه شتاب حرکت آن پایین است. امکان شارژ مجدد بین جاده ها وجود ندارد و بایستی شارژ مجدد در منزل برای زمانی حدود چند ساعت صورت گیرد.

## مزایای خودروهای برقی

- § راه اندازی سریع
- § مصرف انرژی معادل صد مایل به ازای هر گالن
- § آرام و بی صدا
- § قابلیت اعتماد
- § ذخیره انرژی سینتیگی در حالت توقف با سیستم regenerative breaking
- § رانندگی راحت
- § عدم نیاز به کلاچ و جعبه دنده
- § نداشتن اجزای متحرک در مقایسه با خودروهای بنزینی
- § عدم نیاز به تعویض روغن، فیلترهای سوخت، تزریق سوخت و ...
- § آلاینده‌گی تقریباً صفر (ZEV) – بدون دود (Zero smog)
- § راندمان تبدیل انرژی بالا در مقایسه با راندمان 25 درصدی خودروهای بنزینی
- § عدم مصرف انرژی در حالت سکون
- § حد اقل نیاز به تعمیرات و نگهداری

## خودروهای پیل سوختی

### تعریف پیل سوختی

پیل سوختی دستگاهی است الکترو شیمیایی که انرژی حاصل از یک واکنش شیمیایی را به انرژی الکتریکی مفید تبدیل می کند. تبدیل انرژی در پیل سوختی تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی است. عملکرد پیل سوختی مانند باتری نیست که انرژی را ذخیره کند، بلکه در پیل سوختی حالتی از انرژی به حالت دیگر تبدیل می شود، به طوری که در این تبدیل مواد داخل پیل مصرف نمی شوند. همچنین چگالی انرژی باتری کمتر از پیل سوختی است و فرآیند شارژ نمودن باتری بسیار پیچیده تر از پر کردن تانک سوخت پیل سوختی می باشد. در باتری ها بعد از چندین بار شارژ شدن توان تبدیلات الکترو شیمیایی کاهش می یابد، حال آنکه در پیل های سوختی چنین محدودیتی وجود ندارد، به عنوان مثال توده پیل های سوختی کار کرده در یک خودرو قابل انتقال به خودرو جدید می باشد.

### الف) خودروهای پیل سوختی (ساده)

در خودروهای پیل سوختی، خود پیل و توده سوختی آن به عنوان منبع تولید توان بوده و هیچگونه باتری کمکی در آن استفاده نمی شود. پیل سوختی مشابه باتری خودروهای برقی جریان الکتریسته مورد نیاز موتور و نیروی محرکه را تولید می نماید. سیستم نیرو محرکه شامل یک معکوس کننده برای تبدیل جریان پیل سوختی از DC به AC با فرکانس و ولتاژ متغییر، یک رتور AC و یک سیستم انتقال نیرو از موتور به چرخ های ماشین می باشد.

## ب) خودروهای پیل سوختی ترکیبی (هیبریدی)

یک خودروی پیل سوختی ترکیبی دارای یک باتری با یک خازن با ظرفیت بالا به صورت موازی با سیستم پیل سوختی است. پیل سوختی ترکیبی به طور همزمان از بیشترین بازده انرژی پیل سوختی و نیز توان بالای موجود در باتری استفاده می نماید. در هنگامی که مصرف انرژی بالاست مانند حالت شتاب، توان مورد نیاز ماشین را باتری و مجموعه پیل سوختی تأمین خواهند کرد. وقتی میزان مصرف انرژی پایین باشد، مانند حرکت در خیابان، پیل سوختی توان مورد نیاز را تأمین می کند. باتری ها در طی مدت زمانی که مصرف انرژی پایین است شارژ خواهند شد.

بنابراین برای تأمین توان و انرژی مورد نیاز، پیل سوختی برای حرکت معمولی و باتری برای با ماکزیمم توان، طراحی می شوند. انتخاب مجموعه باتری به عوامل چون هزینه و عملکرد پیل سوختی و فناوری ساخت باتری و سیکل حرکتی بستگی دارد.

استفاده از باتری امکان راه اندازی سریع را به خودروی پیل سوختی داده و آن را در مقابل واکنش معکوس در پیل سوختی طی عملکرد و سوخت توده محافظت می نماید. به علاوه باتری حد اکثر توان مورد نیاز را تأمین می کند. و انرژی تولیدی می تواند بازیابی شود. زمان پاسخ سیستم خودرو به تغییرات بار در حالت وجود باتری سریعتر می باشد. پیل سوختی ترکیبی دارای عملکرد خوب، زمان کارکرد طولانی و زمان سوختگیری سریع بوده و مسافت قابل توجیهی را طی می کند.

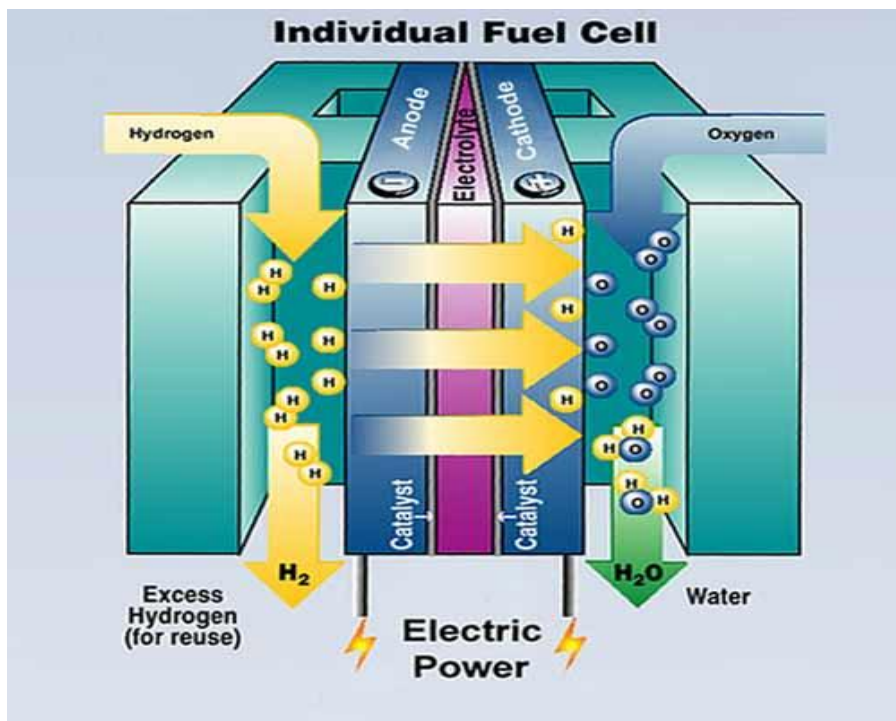
## سایر مزایای وجود باتری عبارتند از

§ عدم نیاز خودرو به پیش گرم کردن پیل سوختی برای راه اندازی خودرو.  
§ توانایی عملکرد خودرو در حالت کاملاً برقی طی زمانی که سیستم پیل قادر به عملکرد در سطح ولتاژ اسمی خود نیست.

§ زمان پاسخ بسیار سریع تر برای تغییرات بار  
از جمله معایب وجود باتری می توان هزینه، وزن، زمان شارژ مجدد بالای آن باشد که به خودرو تحمیل می شود. هزینه یکه مجموعه باتری معمولاً متناسب با مقدار انرژی ای که می تواند ذخیره نماید و هزینه پیل سوختی متناسب با میزان توان خواسته شده است. لذا یک باتری با ظرفیت توان بالا و ذخیره انرژی متوسط ممکن است کمی گران باشد.

## اساس کار پیل سوختی

هیدروژن (سوخت) به آند و اکسیژن (اکسیدان) به کاتد تزریق می شود. هر اتم هیدروژن، یک پروتون و یک الکترون دارد که با از دست دادن الکترون در آند به پرتون ( $H^+$ ) تبدیل می شود و به این ترتیب قابلیت عبور از الکترولیت عبور می کند و الکترون ها نمی توانند از الکترولیت عبور کنند).<sup>+</sup> از الکترولیت عبور می کند و الکترون ها از طریق اتصال خارجی به کاتد می رسند. در کاتد، الکترون ها، اکسیژن جذب شده روی کاتد و پروتون ها تشکیل آب می دهند که از سیستم خارج می شود. با قراردادن موتور الکتریکی در مسیر جریان الکتریکی سیستم پیل سوختی کامل می شود.



اساس کار انواع پیل های سوختی شبیه یکدیگر است . در پیل های سوختی با عملکرد در دمای پایین بین دو واکنش دهنده حایلی قرار گرفته که از سه فاز تشکیل شده است و عبارتند از : الکترولیت و دو پوشش کاتالیزور روی الکترودها . طبیعت و نوع حایل نقش اساسی در عملکرد الکتروشیمیایی پیل سوختی دارد ، به ویژه پیل های سوختی که الکترولیت آن ها مایع است . در چنین پیل هایی واکنش دهنده از لایه ی نازک الکترولیت ( که مرطوب کننده ی خلل و فرج الکترود است ) نفوذ می کنند و واکنش الکترو شیمیایی روی سطح الکترود مربوطه انجام می شود . الکترولیت علاوه بر اینکه رسانای یون ها بین الکترودها است ، مانعی فیزیکی برای جلوگیری از انحراف جریان سوخت و اکسیدان از مسیر اصلی می باشد .

**پیل های سوختی بر حسب نوع الکترولیت به کاررفته در آن ها به پنج دسته تقسیم می شوند که عبارتند از**

1. پیل های سوختی پلیمری یا دارای غشا مبادله کننده پرتون ( دمای عملکرد 70 تا  $90^{\circ}C$  )
2. پیل های سوختی قلیایی ( دمای عملکرد 60 تا  $90^{\circ}C$  )
3. پیل های سوختی اسید فسفریک ( دمای عملکرد 150 تا  $200^{\circ}C$  )
4. پیل های سوختی کربنات مذاب ( دمای عملکرد 550 تا  $700^{\circ}C$  )
5. پیل های سوختی اکسید جامد ( دمای عملکرد 800 تا  $1000^{\circ}C$  )

## مزایای پیل سوختی

### مزایای پیل سوختی از لحاظ کاربری عبارتند از

1. بازدهی بالا: پیل های سوختی از قوانین حاکم بر ماشین های گرمایی تبعیت نمی کنند ، از این رو بازدهی آن ها به سه برابر ماشین های گرمایی می رسد. بر اساس نوع طراحی ، بازدهی الکتریکی پیل های سوختی حدود 40 تا 60 درصد ( کمترین ارزش گرمایی) می باشد. وقتی که از گرمای خروجی آن ها نیز استفاده شود بازدهی تقریباً 85 درصد می شود.
2. تنظیم سیستم برحسب نیاز: پیل های سوختی بسیار قابل انعطاف هستند یعنی می توان در هر لحظه یک یا چند توده پیل را به کار گرفت و یا از کار انداخت. توان خروجی آنها بسیار متغیر است ( گستره ی توان خروجی از 100 مگاوات برای سوخت ذغال سنگ تا بیش از 500 مگاوات برای سوخت گاز طبیعی در تغییر است). ارزش تمام شده ی توده پیل به ازای هر کیلو وات برای نیروگاه بزرگ و یا کوچک یکسان است ، چرا که بازدهی الکتریکی به طور منفرد محاسبه می شود و تعداد پیل ها روی بازدهی کلی کم اثر است.
3. سازگاری با قوانین زیست محیطی: پیل های سوختی دارای بازدهی بالا می باشند و در هر توان خروجی ، دی اکسید کربن تولید شده کم می باشد. مقدار اکسیدهای نیتروژن و گوگرد به ترتیب حدود  $1/81 \times 10^3$  و  $1/36 \times 10^3$  کیلو گرم بر مگاوات ساعت می باشد . این پیل ها بی سر و صدا هستند و صدای ایجاد شده توسط آن ها 60 دسی بل در هر 9 متر مربع می باشد. از این رو قابل نصب در هر محلی می باشند. پیل های سوختی را می توان به گونه ای طراحی کرد که از لحاظ مقدار آب مورد نیاز خود کفا باشند . به دلیل سازگاری پیل های سوختی با قوامین زیست محیطی کسب پروانه ی ساخت آن ها در زمان بسیار کوتاهی صورت می گیرد.
4. انعطاف پذیری نسبت به سوخت : هیدروژن سوخت اصلی پیل های سوختی است که از تفکیک آب ، گاز طبیعی ، ذغال سنگ ، متانول و دیگر پیل های سوختی هیدرو کربنی به دست می آید. حتی وقتی این منابع در دسترس نباشد با توجه به منابع موجود در محل می توان هیدروژن مورد نیاز را تأمین نمود.
5. افزایش تولید و کاهش توزیع : با توجه به نیاز روز افزون به انرژی در مناطق دور دست در صورت استفاده از پیل های سوختی مشکلات توزیع با کاهش خطوط جدید انتقال انرژی برطرف می شود. هم اکنون 8 تا 10 درصد از انرژی تولید شده بین نیروگاه و مصرف کننده ها از طریق خطوط انتقال کاهش می یابد و بازدهی کلی تبدیل سوخت بهینه می شود. همچنین خطر ناشی از میدان های الکترومغناطیسی موجود در اطراف خطوط انتقال نیرو در ولتاژ بالا از بین می رود. از آنجایی که امکان استفاده از چندین واحد پیل سوختی در مناطق مختلف وجود دارد ، با از کار افتادن یک یا چند پیل ، برخلاف خطوط انتقال فعل ، شبکه آسیب جدی نمی بیند.
6. قابلیت ترکیب شدن با سیستم های دیگر و تولید انرژی با استفاده از گرمای خروجی پیل های سوختی : به چنین سیستمی ، سیستم ترکیبی گفته می شود . توسعه چنین سیستم هایی به سرعت در حال پیشرفت است . سیستم هایی ترکیبی برای محل مسکونی ، تجاری و صنایع قابل استفاده هستند. دریک نمونه سیستم ترکیبی گازهای خروجی از پیل سوختی در توربین های گازی استفاده هستند. که بدین ترتیب گرمای خروجی از پیل باز یافت می شود.
7. عدم نیاز به تعمیر: چون پیل های سوختی قطعات متحرک ندارند از این رو نیاز پی در پی به تعمیر نداشته و تنها تعویض فیلتر هوا و مواد مورد نیاز است. حداقل زمان تعویض قطعات 5 سال است ، هر چند انتظار می رود که این زمان به 20 سال یا بیشتر هم برسد.

## انواع پیل های سوختی مورد استفاده در صنعت خودرو

ذیلاً پیل سوختی *الکترولیت پلیمر جامد* و *متانول مستقیم* که مستقیماً مربوط به صنعت خودرو می باشند، شرح داده خواهند شد.

### الف - پیل سوختی الکترولیت پلیمر جامد :

پیل سوختی الکترولیت پلیمر جامد از یک غشاء تبادل یون به عنوان الکترولیت استفاده می کند. این نوع پیل ها ابتدا در برنامه فضایی ایالات متحده (Gemini) در دهه 1960 مورد استفاده قرار گرفت. امروز استفاده از این فناوری در رابطه با حمل و نقل مورد تأکید است.

### ب - پیل سوختی متانول مستقیم :

دروسایل نقلیه الکتریکی یک راه حل خوب استفاده از پیل سوختی متانول مستقیم (DMFC) است. در حدود سی سال است که تحقیقات بر روی آن آغاز شده است و کاربرد آن در وسایل نقلیه رویای محققان پیل سوختی محسوب می گردد. گرچه متانول ساده ترین ماده آلی است اما فعالیت الکتروشیمیایی آن حدود سه درجه کمتر از هیدروژن می باشد و از این رو چگالی جریان تولید آن پایین است. به علاوه فعالیت کاتالیزور در این نوع پیل سوختی به دلیل مسمومیت به شدت افت می کند. علیرغم این مشکلات که بایستی رفع گردد استفاده از پیل سوختی متانول مستقیم به علت حمل و نقل راحت متانول و نداشتن مشکلات ذخیره سازی و امنیتی هیدروژن بسیار مورد توجه محققان است.

## پارامترهای مؤثر در انتخاب فناوری مناسب خودروهای پیل سوختی

برای انتخاب یک فناوری مناسب برای خودروهای پیل سوختی پارامترهای مؤثر زیادی نظیر زیر ساخت سوخت، هزینه سوخت، هزینه واحد انرژی درخودرو، نوع سوخت مصرفی، ایمنی خودرو، بردخودرو (فاصله بین دو سوخت گیری)، شکل خودرو (از لحاظ توپولوژی و فضای داخلی) محل نصب مخزن و نوع توده پیل سوختی وجود دارد. بررسی وضعیت کنونی خودروهای پیل سوختی نیاز به زمان داشته و باید دید که چگونه خودروهای پیل سوختی خواهند توانست جایگاه ویژه ای را در بازار فروش به وجود آورند.

## مراجع

1. <http://web.mit.edu>
2. <http://www.news.cornell.edu>
3. <http://www.eere.energy.gov>

4. بولتن همایش پیل های سوختی (دانشگاه صنعتی شریف 1382)