



۷ و ۷ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران

$H_2 + O_2$   
3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



## تحلیل اقتصادی و زیست محیطی توسعه فناوری پیل سوختی به عنوان سیستم محرکه سبک در صنعت حمل و نقل

کیوان صادق زاده<sup>۱</sup>، محمد باقر صالحی<sup>۲</sup>

دانشگاه صنعتی شریف

sadeghzadeh@alum.sharif.edu

k.sadeghzadeh@hampaco.org

### چکیده

با توجه به اینکه مسائل و مشکلات زیست محیطی و میزان مصرف انرژیهای فسیلی، در آینده نه چندان دور از چالشهای اصلی تمام کشورهای جهان در ابعادی نظیر اجتماعی و اقتصادی خواهند بود، لذا بحث جایگزینی تکنولوژیهای جدید، سوختهای پاک و در دسترس و منابع نوین در صنایع مختلف چون حمل و نقل در اولویتهای اصلی برنامه بیشتر کشورها می باشد. با تکیه به این مطلب، در این مقاله ضمن بیان نتایج حاصل از تحقیق و بررسی در زمینه سرمایه گذاری تکنولوژیهای موجود در ارتباط با توسعه فناوری پیل سوختی به عنوان سیستم محرکه سبک در صنعت حمل و نقل، به ارائه روش و نتایج ارزیابی و تحلیل گزینه های مطرح در مورد سیستم محرکه خودرو توسط دو رویکرد تاپسیس (TOPSIS) و ای اچ پی (AHP) پرداخته شده است. در رویکرد تاپسیس معیارهایی نظیر میزان آلایندهها (گازهای منتشر شده و آلایندهگی صوتی)، قیمت تمام شده، قیمت سوخت، بازدهی، مدت زمان شارژ، برد با یکبار سوخت گیری و مدت زمان راه اندازی به عنوان معیارهای کمی تصمیم گیری لحاظ شده اند. در این رویکرد با توجه به اینکه گزینه های پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی از میان سیستمهای محرکه سبک، دارای کمترین میزان آلایندهگی هستند و گزینه های غالب این جنبه می باشند، اما بر اساس تحلیل اقتصادی و زیست محیطی، سهم و راهکار زمینه های توسعه و بهبود از دید سایر معیارها نظیر قیمت سوخت، قیمت تمام شده، مدت زمان سوخت گیری و ... در این گزینه ها بدست می آید و در رویکردی دیگر نیز هفت معیار اصلی و کلان اقتصادی، زیست محیطی، فناوری، سوخت، عملکرد و کارایی، بازار جهانی و فرهنگی سیاسی اجتماعی جهت تصمیم گیری بررسی می شوند و راهکارهای توجیه اقتصادی گزینه پیل سوختی که از گزینه های مطرح در دنیا می باشد حاصل می شود. تلاش نهایی مقاله بر این است تا با تحلیل لازم بر پایه توان علمی و فنی در کشور، جهت ارجحیت استفاده از سیستمهای محرکه پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی، راهکارهای اجرایی جهت پیشرفت قابل قبولی در معیارهای اقتصادی، فناوری و عملکرد ایجاد نماید.

واژه های کلیدی: فناوری پیل سوختی، سیستم محرکه، تحلیل اقتصادی و زیست محیطی، معیار کمی و کیفی

۱- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، محقق دانشگاه صنعتی شریف، مدیر کیفیت و تعالی شرکت مهندسی همپا

۲- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، شرکت بلند طبقه، mbs\_salehi@yahoo.com



۷ و ۷ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران



3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



دانشگاه تربیت مدرس

## ۱- مقدمه

پیل سوختی برای اولین بار در چهل سال پیش در خودروها مورد استفاده قرار گرفت. با گذشت زمان پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در خودروها بوجود آمده است. تا اواسط دهه نود میلادی، تنها تعدادی انگشت شمار خودروی پیل سوختی وجود داشت ولی اکنون تعداد خودروهای سبک به دو بیست عدد رسیده است که شامل وانت، خودروهای دو سرنشین، خودروهای خدماتی و خودروهای کوچکی مانند خودروی گلف می‌باشد. فعالیت در این بخش در چند سال اخیر رشد شتابانی گرفته است. اکثر خودروسازان نمونه‌های اولیه خودروی پیل سوختی خود را ارائه و تست نموده و ناوگان‌های کوچکی را ایجاد کرده‌اند. خودروهای پیل سوختی با سوخت هیدروژن مولکولی با خودروهای بنزینی با سیستم احتراق داخلی، خودروهای رایج کنونی یا خودروهای برقی هیبریدی رقابت می‌کنند. در مقایسه گزینه‌های مختلف سیستم‌های محرکه مطرح خودرو در آینده، در ابتدا لازم است تا شناخت کلی از این گزینه‌ها ایجاد گردد. این شناخت کمک خواهد کرد که در مراحل بعدی معیارهای مناسب ارزیابی انتخاب گردند. با مطالعاتی انجام پذیرفته بعد از آشنایی با گزینه‌ها و معیارهای مختلف تعداد مطرح برای ارزیابی انتخاب می‌شوند و به دلایل حذف دیگر معیارها و گزینه‌ها اشاره می‌شود. بعد از نهایی شدن گزینه‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری برای ارزیابی در قدم اول، هفت معیار فن‌آوری، زیست محیطی، اقتصادی، فرهنگی سیاسی اجتماعی، عملکرد، سوخت و بازار جهانی برای انجام ارزیابیها در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- ویژگیهای ذاتی فناوری پیل سوختی

توسعه دهندگان فناوری پیل سوختی، به دلیل وجود چهار ویژگی اصلی، در مسیر توسعه این فناوری با مشکلاتی مواجهند. این ویژگیها عبارتند از:

- نیاز به طیف وسیعی از دانش‌ها و قابلیت‌های موجود و جدید
- وجود عدم اطمینانهای فنی، اقتصادی و مالی زیاد موجب تاخیر ورود گسترده این تکنولوژی به بازار
- احتمال زمان گذار بسیار طولانی تا هنگام امکان تأمین سوخت این تکنولوژی با شبکه گسترده انرژی هیدروژن
- رقابت معدودی از شرکتهای بزرگ برای یادگیری‌های عملی<sup>۱</sup> هر چه بیشتر و پس از آن کسب سهم بازار

تا اواخر دهه ۱۹۸۰، گرایش زیادی برای توسعه پیل‌های سوختی جهت به کارگیری در سیستم محرکه خودروهای سبک و سنگین وجود داشته است. نیاز به وجود خودروهای سواری، کامیون و اتوبوس‌های پاک و با راندمان بالا که بتوانند از سوخت‌های متداول (گازوئیل و بنزین) و نیز سوخت‌های جایگزین (هیدروژن، متانول، اتانول، گاز طبیعی و سایر هیدروکربن‌ها) استفاده کنند، عامل اصلی این گرایش بوده است. در صورت استفاده از سایر سوخت‌های قابل استفاده بر روی خودرو، سیستم پیل سوختی که به مبدل سوخت مناسب جهت تبدیل سوخت به هیدروژن مجهز شده است، توان مورد نیاز خودرو را با بازده بالا و سطح آلاینده‌گی بسیار پایین تأمین می‌کند، به علاوه به دلیل کاهش قطعات متحرک، این خودروها از مزایای سیستم محرکه الکتریکی و تعمیرات و نگهداری کمتری بهره مند هستند. مزایای خودروهای پیل سوختی را به اختصار می‌توان اینگونه بر شمرد:

- عدم آلودگی هوا
- راندمان سوخت بالا (پیل سوختی بازده ای معادل ۳۰٪ تا ۵۵٪ را از خود نشان می‌دهد که در مقایسه با بازده کمتر از ۱۷٪ در خودروهای احتراق داخلی، بیانگر افزایش بیش از صد در صد راندمان در این خودروها می‌باشد).



۷ و ۴ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران



- طول عمر بسیار بالا
- قابل رقابت از جنبه قیمت و هزینه ها
- عدم وجود قطعات و قسمت های متحرک در پیل سوختی
- آلودگی صوتی ناچیز
- کاهش مصرف سوخت و استفاده از منابع تجدید پذیر جهت تولید هیدروژن و یا متانول (یک خودروی پیل سوختی معادل یا کمتر از ۳ لیتر بنزین در هر ۱۰۰ کیلومتر مصرف میکند).

در این مقاله مقایسه و ارزیابی تکنولوژی پیل سوختی به عنوان یک سیستم محرکه با سایر تکنولوژی های رقیب در صنعت خودرو انجام می شود هر چند که در مجموع به دلیل رویکرد تحلیلی استفاده شده، تمامی تکنولوژی های مطرح سیستم های محرکه خودرو مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در این فرآیند، بر مبنای رویکرد فرایند تصمیم گیری عقلایی در ابتدا معیارهای تصمیم گیری و سیستم های محرکه مطرح خودرو آینده کشور شناسایی و انتخاب شده اند. سپس بر پایه استفاده از روشهای تصمیم گیری شامل روش تاپسیس (TOPSIS)، ماکسی مین، ماکسی ماکس و تحلیل سلسله مراتبی، گزینه ها نسبت این معیارها سنجیده و رتبه بندی شده است و در ادامه راهکارهای اجرایی توسعه فناوری پیل سوختی به عنوان سیستم محرکه سبک در صنعت حمل و نقل بدست آمده است.

## ۲- فنون ریاضی ارزیابی معیارها و گزینه ها براساس تصمیم گیری چند معیاره

### ۲-۱- روش TOPSIS<sup>۱</sup>

در این روش علاوه بر در نظر گرفتن فاصله یک گزینه از نقطه ایدآل، فاصله آن از نقطه ایده آل منفی هم در نظر گرفته می شود. بدان معنی که گزینه انتخابی باید دارای کمترین فاصله از راه حل ایدآل بوده و در عین حال دارای دورترین فاصله از راه حل ایده آل منفی باشد. اصول این روش عبارتند از:

- مطلوبیت هر شاخص باید به طور یکنواخت افزایشی (یا کاهش) که بدان صورت بهترین ارزش موجود از یک شاخص نشان دهنده ایدآل آن بوده و بدترین ارزش موجود از آن مشخص کننده ایدآل - منفی برای آن خواهد بود.
- فاصله یک گزینه از ایده آل (یا از ایده آل منفی) ممکن است بصورت فاصله اقلیدسی (از توان دوم) و یا به صورت مجموع قدر مطلق از فواصل خطی (معروف به فواصل بلوکی) محاسبه گردد، که این امر بستگی به نرخ تبادل و جایگزینی در بین شاخص ها دارد.

### ۲-۲- روشهای ماکسی مین و ماکسی ماکس

ماکسی مین به معنای ماکزیمم کردن حداقل سودآوری ممکن و معمولاً در موقعیتی از تصمیم گیری به کار گرفته می شود که با یک تصمیم گیرنده محتاط روبرو باشیم. در مقابل روش ماکسی مین می توان از روش ماکسی ماکس (یعنی ماکزیمم کردن ماکزیمم سودآوری ممکن) استفاده نمود که برای یک تصمیم گیرنده خوش بین مناسب است.

شایان ذکر است که در این گونه روشها فقط بخشی از اطلاعات ماتریس تصمیم گیری مورد استفاده واقع می شود (یعنی فقط یک شاخص به ازای هر گزینه)، بدین طریق گزینه ای که برای کلیه شاخص ها دارای امتیاز بالایی است به استثنای یک شاخص می تواند تحت تسلط گزینه دیگری واقع شود که در کلیه شاخص ها متوسط بوده به استثنای در آن یک شاخص

1 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

خاص که امتیاز بالایی را گرفته باشد. این نقطه ضعف منجر به محدود شدن کاربرد این روشها گردیده و فقط در موارد خاصی همچو بدبینی کامل و خوش بینی کامل مورد استفاده واقع می شوند.

## ۲-۳- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup>

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یک روش تصمیم‌گیری در مورد مسائلی از نوع MADM<sup>۲</sup> با تشکیل درخت سلسله مراتب تصمیم است که سطح یک آن، هدف و سطح آخر آن، گزینه‌های رقیب خواهد بود. سطح میانی نیز شامل عوامل موثر است. روش AHP بر مبنای الگوریتمی است که مقایسات زوجی به عنوان اساس آن می باشد و پس از تشکیل درخت سلسله مراتب تصمیم، عوامل و عناصر موجود در هر سطح نسبت به تک تک عوامل و عناصر موجود در سطوح بالاتر به صورت دو به دو توسط تصمیم‌گیرنده یا کارشناس ۳ مورد مقایسه قرار می‌گیرند و جدولهای مقایسه‌ای ایجاد می‌گردند. در کاربرد این روش، کارشناس موظف است اولاً عوامل یا معیارها را نسبت به یکدیگر برتری دو به دو دهد. (مانند اینکه عامل قیمت سه برابر عامل گارانتی اهمیت دارد) و ثانیاً گزینه‌ها را دو به دو در یک عامل مقایسه نماید. (مانند اینکه شرکت X از لحاظ خدمات پس از فروش نسبت به شرکت Z دو برابر اهمیت دارد) با تکمیل نظرات کارشناسان، تحلیل نهایی توسط روش انجام می شود. [۱]

## ۳- انتخاب گزینه‌های مطرح سیستم‌های محرکه خودرو و معیارهای تصمیم‌گیری

### ۳-۱- گزینه‌های سیستم‌های محرکه خودرو

با مدنظر قراردادن سوخت‌های مصرفی سیستم‌های محرکه خودرو، مجموعاً می توان ۳۹ گزینه متفاوت در حوزه سیستم محرکه خودرو تعریف می‌شود. اما در بیشتر حالات نوع سوخت مصرفی، تغییر چندانی را در تکنولوژی ایجاد نخواهد کرد. بنابراین می‌توان تعداد سوخت‌های مختلف مورد استفاده در یک سیستم محرکه را به عنوان قابلیت تطبیق و تنوع پذیری گزینه در استفاده از سوخت‌های مختلف در نظر گرفته و گزینه‌های کمتری را برای مقایسه انتخاب نمود. به عنوان مثال اختلاف موجود سیستم محرکه پیل سوختی با سوخت هیدروژن با دیگر سوخت‌های مورد استفاده در پیل سوختی در مقایسه با گزینه‌های مستقل دیگر نظیر سیستم محرکه الکتریکی و احتراق داخلی، قابل اغماض و چشم‌پوشی است. به این ترتیب و با این دسته بندی تعداد گزینه‌ها به ۹ گزینه تقلیل می‌یابد. از سوی دیگر با توجه به اینکه سهم عمده مصرف انرژی و سوخت بخش حمل و نقل در کشور و همچنین میزان آلاینده‌گی ایجاد شده، ناشی از خودروهای سبک می‌باشد و از سوی دیگر سیستم‌های محرکه خودروهای سنگین اشتراکات زیادی با سیستم‌های محرکه خودروی سبک دارد، می‌توان در مجموع، شش گزینه زیر را انتخاب نمود که بدون اشاره به سایر گزینه‌های حذف شده، این شش گزینه عبارتند از:

- ۱) سیستم محرکه پیل سوختی (با سوخت هیدروژن از گاز طبیعی در ایستگاه)
- ۲) سیستم محرکه هیبرید پیل سوختی و باتری (با سوخت هیدروژن از گاز طبیعی در ایستگاه)
- ۳) سیستم محرکه موتور احتراق داخلی اشتعال جرقه‌ای پیشرفته با سوخت جایگزین (با سوخت CNG)
- ۴) سیستم محرکه موتور احتراق داخلی اشتعال تراکمی پیشرفته (با سوخت گازوئیل)
- ۵) سیستم محرکه هیبرید موتور احتراق داخلی و باتری (با سوخت بنزین)
- ۶) سیستم محرکه الکتریکی (با باتری شارژ شونده)

1 AHP

3 Expert

2 مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره



۷ و ۶ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار بین سوختی ایران

$H_2 + O_2$   
3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



### ۲-۳- تعریف فاکتورهای مطلوبیت انتخاب سیستم محرکه مناسب

برای این منظور، ابتدا، فهرستی اولیه از معیارهای اصلی تصمیم‌گیری و زیرمعیارها توسط کارشناسان آماده گردید. سپس این فهرست در اختیار مدیران ارشد صنعت خودرو و کارشناسان ارشد سازمان‌ها و شرکت‌های مرتبط با خودرو قرار گرفت. معیارهایی که در ادامه تعریف و ارائه می‌شوند، با جمع‌بندی نظرات کارشناسان بدست آمده است.

### ۳-۳- معیارهای تصمیم‌گیری اصلی و زیر معیارهای کیفی و کمی

#### ۱-۳-۳- معیارهای تصمیم‌گیری اصلی و کلان

مطابق دسته بندی انجام شده، هفت معیار اصلی و کلان شناسایی شده عبارتند از:

- فناوری؛ شامل زیر معیارهای کیفی و کمی شامل میزان تسلط به دانش فنی، امکان دستیابی به تکنولوژی، تنوع و فراوانی عرضه کنندگان، ریسک ارتباطی، پیچیدگی، چرخه عمر، وابستگی به مواد و فناوری‌ها، کاربرد در سایر صنایع (گسترده‌گی کاربرد)، انعطاف‌پذیری در به روز شدن
- زیست محیطی؛ شامل زیر معیارهای کیفی و کمی شامل گازهای سمی، گازهای گلخانه‌ای، ذرات معلق در هوا، آلایندگی صوت، عدم امکان بازیافت
- اقتصادی؛ شامل زیر معیارهای کیفی و کمی شامل قیمت تمام‌شده سیستم محرکه خودرو، حجم سرمایه‌گذاری برای تولید انبوه سیستم محرکه خودرو، قیمت سوخت به ازای ۱۰۰ کیلومتر مسافت طی شده، امکان صادرات، هزینه ایجاد زیرساخت توزیع سوخت، اشتغال‌زایی، مقاومت در برابر تغییر (پذیرش عمومی)، قدرت سیاسی و ارزش استراتژیک
- عملکرد و کارایی؛ شامل زیر معیارهای کیفی و کمی شامل بازدهی، تعمیر و نگهداری، نیاز به نگهداری، نیاز به تعمیرات، مدت زمان شارژ یا سوخت‌گیری، برد با یکبار سوخت‌گیری
- گشتاور؛ شامل زیر معیارهای کیفی و کمی شامل طول عمر، زمان راه اندازی، چگالی قدرت، قابلیت کار در دما و شرایط محیطی مختلف، ایمنی
- سوخت؛ شامل زیر معیارهای کیفی و کمی شامل تجدید پذیر بودن، پتانسیل یا ذخایر قابل استحصال، وجود زیرساخت تولید، وجود زیرساخت توزیع
- بازار جهانی؛ شامل زیر معیارهای کیفی و کمی به شامل میزان رشد بازار، حجم بازار

#### ۲-۳-۳- زیر معیارهای تصمیم‌گیری کمی

معیار های اصلی و کلان، از زیر معیارهای کمی و کیفی تشکیل شده که زیرمعیارهای کمی استفاده شده در این مقاله از مجموع هفت معیار اصلی و کلان که با در دست بودن اطلاعات و آمار، قابل تحلیل در روشهای تصمیم‌گیری ریاضی بوده اند، به اختصار عبارتند از:

- گازهای سمی: میزان گازهای سمی منتشرشده در هوا توسط سیستم محرکه خودروی مورد بررسی (گازهای CO، NOx، و HC).
- گازهای گلخانه‌ای: میزان گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> منتشر شده در هوا توسط سیستم محرکه خودروی مورد بررسی.
- ذرات معلق در هوا: میزان انتشار ذرات معلق در هوا (دوده) توسط سیستم محرکه خودروی مورد بررسی.
- آلایندگی صوت
- قیمت تمام شده سیستم محرکه خودرو

- قیمت سوخت به ازای ۱۰۰ کیلومتر مسافت طی شده: قیمت بین‌المللی سوخت (خلیج فارس FOB) با در نظر گرفتن ۱۰۰ کیلومتر پیمایش مسافت.
- بازدهی: درصد تبدیل انرژی ورودی (شیمیایی) به انرژی خروجی (مکانیکی) در سیستم محرکه خودروی مورد نظر.
- مدت زمان شارژ یا سوخت‌گیری: مدت زمانی که طول می‌کشد تا خودروی مورد نظر بطور کامل سوخت‌گیری نماید.
- برد با یکبار سوخت‌گیری: مقدار مسافتی که خودروی مورد نظر با یکبار سوخت‌گیری می‌تواند بپیماید.
- زمان راه‌اندازی: مدت زمانی که طول می‌کشد تا سیستم محرکه خودرو آماده حرکت شود.

#### ۴- تحلیل اقتصادی گزینه‌های موجود در سیستم محرکه خودرو بر مبنای زیر معیارهای کمی

در این بخش از مقاله به منظور تحلیل گزینه‌های مورد توجه بعنوان جایگزین‌های مناسب جهت روند فعلی در سیستم خودرو از دو رویکرد استفاده گردیده است: رویکرد اول که همان روش TOPSIS می‌باشد بیشتر به معیارهای کمی اختصاص داده شده زیرا این معیارها که همان ویژگیهای فنی آلترناتیو‌ها می‌باشند بیشتر قابلیت تغییر و بهبود توسط دانشمندان دیگر از دارند و بهمین دلیل به این ویژگیها بصورت جداگانه پرداخته شده است و آلترناتیو‌های رقیب بر این اساس رتبه‌بندی گردیده‌اند. در جدول ۱ مقایسه گزینه‌ها براساس معیارهای کمی نشان داده شده است.

جدول ۱- زیر معیارهای کمی

مدت زمان راه‌اندازی (min)	برد با یکبار سوخت‌گیری (Km)	مدت زمان شارژ یا سوخت‌گیری (min)	بازدهی (%)	قیمت سوخت با ازای صد کیلومتر مسافت (Cent/100Km)	قیمت تمام شده محصول در سال ۲۰۲۰ (\$)	آلودگی صوت (db)	ذرات معلق در هوا (g/Km)	گازهای گلخانه‌ای (g/Km)	گازهای سمی (g/Km)	معیار کمی
۴	۴۴۰	۳	۴۲	۷۱/۰۶	۲۳۰۰۰	۶۰	۰	۰	۰	پیل سوختی
۱	۵۶۰	۳	۴۷	۵۰/۹	۲۲۱۰۰	۶۰	۰	۰	۰	هیبرید پیل سوختی
۱	۴۵۰	۱	۲۰	۳۱/۳۶	۱۹۰۰۰	۷۲/۵	۰	۱۷۰	۰/۷۷۸	درون سوز اشتعال جرقه‌ای با سوخت جایگزین
۱	۱۱۰۰	۱	۳۰	۶۲/۴	۲۱۶۰۰	۶۹	۰	۱۰۴	۰/۲۱	هیبرید درون سوز اشتعال جرقه‌ای
۱	۶۰۰	۱	۴۰	۶۰/۰۲	۲۰۵۰۰	۷۱	۰/۰۳۱	۲۰۰	۰/۳۶	درون سوز اشتعال تراکمی
۱	۲۰۰	۴۵	۷۲	۵۶/۶	۲۷۰۰۰	۶۰	۰	۰	۰	باتری (الکتریکی)

۴-۱- رتبه بندی گزینه ها بر اساس زیر معیارهای کمی با استفاده از روش TOPSIS

جدول ۲- معیارهای کمی

گازهای سمی	گازهای گلخانه ای	ذرات معلق در هوا	آلاینده‌گی صوتی	قیمت تمام شده در سال ۲۰۲۰	قیمت سوخت به ازای ۱۰۰	بازدهی	مدت زمان سوخت گیری	برد با یکبار سوخت گیری	مدت زمان راه اندازی	
0	0	0	60	23000	71.06	42	3	430	3	پیل سوختی
0	0	0	60	22100	50.9	47	3	560	1	هیبرید پیل سوختی
0.21	104	0	69	21600	62.4	30	1	1100	1	هیبرید درونسوز
0.778	170	0	72.5	19000	31.36	20	1	450	1	درون سوز با سوخت جایگزین
0.36	200	0.031	71	20500	60.02	40	1	600	1	درون سوز دیزلی پیشرفته
0	0	0	60	27000	56.6	72	45	200	1	باتری الکتریکی

نتیجه حاصل از تحلیل فوق به شرح ترتیب اولویت ذیل است:

- ۱) هیبرید پیل سوختی
- ۲) پیل سوختی
- ۳) هیبرید درون سوز
- ۴) باتری الکتریکی
- ۵) درون سوز با سوخت جایگزین
- ۶) درون سوز دیزلی پیشرفته

از طرفی همانطوری که در جدول فوق ارائه شده است سه معیار اول، عوامل زیست محیطی می باشند که با توجه به غالب بودن پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی در این ویژگیها نسبت به سایر گزینه‌های رقیب، همواره این دو گزینه بعنوان گزینه های اول مطرح گردیده اند اما هدف این است که عواملی که باعث می شود تا تکنولوژی پیل سوختی از نظر اقتصادی از مقبولیت لازم برخوردار نباشد را مورد بررسی قرار داد به همین دلیل عامل غالب که همان عوامل محیط زیست می باشند در تحلیل بعدی حذف و آلترناتیوهای موجود براساس سایر معیارها مورد ارزیابی قرار گرفته اند.

۴-۲- رتبه بندی گزینه ها بر اساس زیر معیارهای کمی بدون عوامل زیست محیطی براساس روش TOPSIS

با حذف معیارهای زیست محیطی با توجه به بدهی بودن هدف و تاثیر این معیار در جابه جایی گزینه پیل سوختی به دلیل آلاینده‌گی صفر، نتایج جدید به ترتیب ذیل حاصل می شود:

جدول ۳- معیارهای کمی بدون عوامل زیست محیطی

قیمت تمام شده در سال ۲۰۲۰	قیمت سوخت به ازای ۱۰۰	بازدهی	مدت زمان سوخت گیری	برد با یکبار سوخت گیری	مدت زمان راه اندازی	
23000	71.06	42	3	430	3	پیل سوختی
22100	50.9	47	3	560	1	هیبرید پیل سوختی
21600	62.4	30	1	1100	1	هیبرید درونسوز
19000	31.36	20	1	450	1	درون سوز با سوخت جایگزین
20500	60.02	40	1	600	1	درون سوز دیزلی پیشرفته
27000	56.6	72	45	200	1	باتری الکتریکی

نتیجه حاصل از تحلیل TOPSIS بدون عوامل زیست محیطی به اولویت هیبرید پیل سوختی می انجامد. نظر به اهمیت گزینه های پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی در معیارهایی نظیر آلاینده‌گی هوا و مسائل زیست محیطی، مزیت های بررسی شده در تحلیل های اقتصادی و با توجه به اینکه گزینه هیبرید پیل سوختی در تمامی تحلیل ها همواره از گزینه های مطرح می باشد، لذا لازم است جهت توسعه این فناوری راهکارهایی شناخته شود.

#### ۴- بررسی معیارهای اصلی و کلان

هفت معیار اصلی فن آوری، زیست محیطی، اقتصادی، فرهنگی سیاسی اجتماعی، عملکرد و کارآیی، سوخت و بازار جهانی برای ارزیابی گزینه‌های مختلف در نظر گرفته شد. در این بین، معیار اقتصادی با ۲۴ درصد و معیار زیست محیطی با ۱۸/۷ درصد بیشترین وزن و اهمیت را در تصمیم‌گیری از آن خود کردند.

از بین سیستم‌های محرکه جدید خودرو نیز گزینه‌های زیر مقایسه مناسب تشخیص داده شدند:

- سیستم محرکه پیل سوختی
- سیستم محرکه هیبرید پیل سوختی
- سیستم محرکه درون‌سوز با سوخت جایگزین (CNG)
- سیستم محرکه هیبرید درون سوز
- سیستم محرکه دیزلی پیشرفته

در بررسی‌ها و ارزیابی‌های به عمل آمده مشخص گردید که سیستم محرکه دیزلی پیشرفته و سیستم محرکه هیبرید پیل سوختی مناسب‌ترین گزینه‌ها برای توسعه سیستم محرکه مطلوب آینده کشور می‌باشند. لذا می‌توان در یک جمع‌بندی اعلام داشت که در تمامی پیش‌بینی‌ها، سیستم محرکه هیبرید پیل سوختی، یکی از سیستم‌های محرکه مناسب برای کشور بوده و توسعه آن در آینده صنعت خودرو کمترین ریسک را نسبت به سایر گزینه‌ها به همراه دارد. همانگونه که ارائه شد، ارزیابی، تحلیل و تصمیم‌گیری در این بحث بر اساس هفت معیار اصلی که هر کدام از زیرمعیارهای کمی و کیفی تشکیل شده است، انجام پذیرفته و حاصل جمع‌بندی به صورت وزن دهی و رتبه بندی در قالب وزن نهایی تاثیر گذاری معیارها به شرح جدول ۴ می باشد.



جدول ۴- رتبه بندی معیارهای کلان

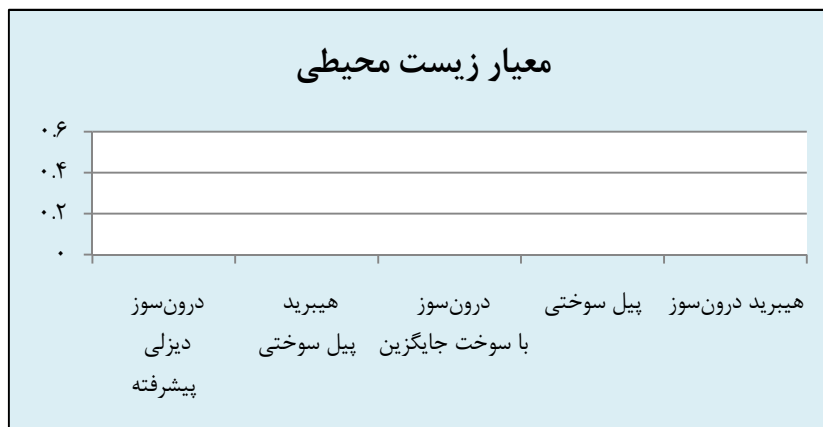
رتبه	معیار	ارزش (درصد)
۱	اقتصادی	۲۴/۳
۲	زیست محیطی	۱۸/۷
۳	فناوری	۱۷/۳
۴	سوخت	۱۴/۶
۵	عملکرد و کارایی	۱۴/۲
۶	بازار جهانی	۵/۵
۷	فرهنگی، سیاسی، اجتماعی	۵/۴

رتبه هر گزینه در مجموع و نیز به تفکیک در هر معیار در جدول ترکیبی ذیل قابل رویت است:

جدول ۵- ترکیب معیارها و رتبه ها

رتبه	۱	۲	۳	۴	۵
گزینه	درون سوز دیزلی پیشرفته	هیبرید پیل سوختی	درون سوز با سوخت جایگزین	پیل سوختی	هیبرید درون سوز
رتبه	۱	۴	۲	۵	۳
معیار	اقتصادی	زیست محیطی	فناوری	سوخت	عملکرد و کارایی
۱	۵	۲	۴	۱	۳
۲	۱	۵	۲	۴	۳
۳	۵	۲	۱	۳	۴
۴	۱	۴	۳	۵	۲
۵	۱	۴	۲	۵	۳
۶	۱	۲	۴	۵	۳
۷	۱	۲	۴	۵	۳

همانگونه که در جدول ۵ مشخص است، به استثنای معیار "زیست محیطی" که در درجه دوم اهمیت قرار داشته و البته از چالشهای اساسی بشر به حساب می آید، در سایر معیارها خصوصاً معیار اقتصادی (رتبه اول اهمیت) و معیار فناوری (رتبه سوم اهمیت)، سیستمهای محرکه پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی دارای مزیت نمی باشند. از سوی دیگر معیار سوخت علیرغم قرارگیری در رتبه چهارم، بحث حال و آینده جهان است و قرارگیری آن در این رتبه صرفاً به دلیل ارزیابی جمعی از زیر معیارهای آن می باشد اما واضح است که بحران سوخت، مساله ای استراتژیک است و سیستم محرکه درون سوز دیزلی پیشرفته با اینکه در رتبه اول جمعی قرار دارد اما در معیار سوخت حائز رتبه پنجم (آخر) می باشد که این موضوع توجه کارشناسان را در ناکارایی سیستم محرکه درون سوز دیزلی در آینده نزدیک به خود معطوف ساخته است. با استناد به اینکه سیستمهای محرکه پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی در معیارهای زیست محیطی و سوخت دارای رتبه های قابل قبول بوده و خصوصاً در معیار زیست محیطی دارای مزیت نسبی قابل توجه نسبت به سایر گزینه ها می باشند، (شکل ۱ و جدول ۶) لذا این برتری انگیزاننده مناسبی جهت بهره گیری از این سیستمهای محرکه نوین می باشد.



شکل ۱- رتبه بندی گزینه ها براساس معیار زیست محیطی

جدول ۶- زیر معیارها کمی زیست محیطی در گزینه ها

گزینه	درون سوز دیزلی پیشرفته	هیبرید پیل سوختی	درون سوز با سوخت جایگزین	پیل سوختی	هیبرید درون سوز
معیار کمی					
گازهای سمی (g/Km)	۰/۳۶	۰	۰/۷۷۸	۰	۰/۲۱
گازهای گلخانه‌ای (g/Km)	۲۰۰	۰	۱۷۰	۰	۱۰۴
ذرات معلق در هوا (g/Km)	۰/۰۳۱	۰	۰	۰	۰
آلاینده‌گی صوت (db)	۷۱	۶۰	۷۲/۵	۶۰	۶۹

## ۷- نتیجه گیری

تلاش بر این است تا با تحلیل لازم و بر پایه توان علمی و فنی در کشور، جهت ارجحیت استفاده از سیستمهای محرکه پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی راهکارهای اجرایی جهت پیشرفت قابل قبولی در معیارهای اقتصادی، فناوری و عملکرد ایجاد نمود. از اینرو با بررسیهای فنی و کارشناسی انجام شده، عوامل و زیر معیارهای قابل گسترش توسط حوزه های علمی و فنی به ترتیب اهمیت (درجه اهمیت زیر معیارها از ۱ الی ۵ می باشد) به شرح ذیل معرفی می گردند:

جدول ۷- زیر معیارهای پیشنهادی

درجه اهمیت زیر معیار	زیر معیار	معیار	ردیف
۱	قیمت تمام شده محصول	اقتصادی	۱
۲	سرمایه گذاری برای تولید انبوه		
۲	قیمت سوخت		
۳	هزینه ایجاد زیر ساخت توزیع سوخت		
۵	امکان صادرات		
۲	سیکل (چرخه) عمر	فناوری	۲
۲	وابستگی به مواد و فناوری ها		
۲	میزان تسلط به دانش فنی		
۳	پیچیدگی فناوری		
۴	انعطاف پذیری در به روز شدن		
۵	کاربرد در سایر صنایع	عملکرد و کارایی	۳
۲	بازدهی		
۴	برد با یکبار سوختگیری		
۵	ایمنی		
۵	قدرت (گشتاور)		
۵	مدت زمان شارژ یا سوخت گیری		
۵	طول عمر		

با توجه به وزن و رتبه بندی هر معیار و همچنین درجه اهمیت هر زیر معیار، مجموعاً عوامل تاثیرگذار و بالقوه در جهت دستیابی به سیستم محرکه پیل سوختی و هیبرید پیل سوختی موجه و مقرون به صرفه در سه گروه (به ترتیب اولویت و اهمیت از گروه ۱ الی ۳) جهت فعالیت حوزه های علمی و فنی به شرح ذیل تعیین می گردند:

جدول ۸- گروه بندی نهایی زیر معیار های بالقوه

زیر معیار بالقوه	ردیف
گروه ۱	
قیمت تمام شده محصول	۱
گروه ۲	
سرمایه گذاری برای تولید انبوه	۲
قیمت سوخت	۳
گروه ۳	
هزینه ایجاد زیر ساخت توزیع سوخت	۳
سیکل (چرخه) عمر	۴
وابستگی به مواد و فناوری ها	۵
میزان تسلط به دانش فنی	۶
بازدهی	۷



۷ و ۴ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران



3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



## مراجع

- ۱- صادق زاده، ک.، نیک زینت متین، ح. و صالحی، م.، " تحلیل اقتصادی و ارزیابی پیل سوختی و گزینه های موجود در سیستم محرکه خودرو"، دانشگاه صنعتی شریف، بهمن ۸۶.
- ۲- صادق زاده، ک. و نیک زینت متین، ح.، " راهکارهای اجرایی جهت توجیه پذیری پیل سوختی به عنوان سیستم محرکه خودرو"، دانشگاه صنعتی شریف، تیر ۸۷.
- ۳- صادق زاده، ک.، " نقش فناوری نانو در توسعه تکنولوژی پیل های سوختی"، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۸۷.
- ۴- صالحی، م.، " تحلیل فنی- اقتصادی توسعه راهکارهای بکارگیری پیل سوختی به عنوان نیروی محرکه خودرو"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، مرداد ۸۸.