بررسی جذابیت پیل سوختی در مقایسه با سایر فناوری‌های قابل استفاده در صنعت خودرو کشور

محمدرضا آراستی (استادیار)
دانشکده‌ی مدیریت و اقتصاد، دانشگاه صنعتی شریف
همایون معدل (استادیار)
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

استفاده‌ی بهینه از منابع تجدیدناپذیر و حفظ محیط زیست از جمله چالش‌های مهمی است که امروزه بشر با آن مواجه است. فناوری پیل سوختی با ویژگی‌های منحصر به‌فرد در کاهش آلودگی، و نیز کاربرد وسیع آن در صنایع مختلف، از جمله صنعت خودرو، رفته رفته به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های اساسی در ارتباط با چالش فوق مطرح می‌شود.

نوشتار حاضر اهمیت فناوری پیل سوختی را در صنعت خودرو کشور، در مقایسه با فناوری‌های رقیب، در یک دورنمای ۱۰ ساله مورد بررسی قرار می‌دهد. در این ارزیابی فناوری‌ها بر اساس معیارهای مختلف، از جمله معیار فنی، اقتصادی، فناوری، زیست محیطی و فرهنگی-سیاسی مقایسه شده‌اند. برای این منظور از روش «تحلیل سلسله مراتبی »[1] (AHP) که یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل چندمعیاره[2] به شمار می‌رود، استفاده شده است. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که از دیدگاه دولت، تولید کنندگان و مصرف‌کنندگان خودرو، پیل سوختی در مقایسه با فناوری‌های رقیب دارای ارجحیت بالاتری است.

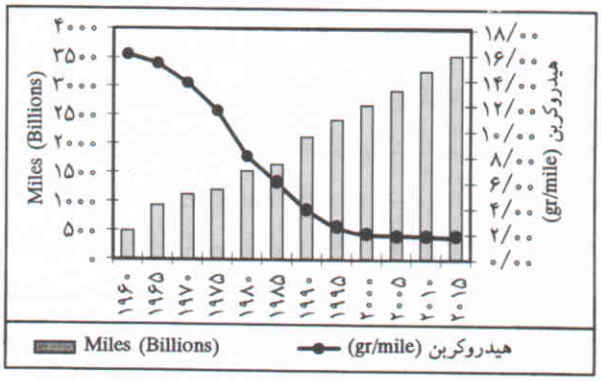
مقدمه

فناوری (تکنولوژی) را می‌توان کاربرد دستاوردهای علمی و تجربی به‌منظور پاسخ به نیازهای اجتماعی تعریف کرد.[1] نظر به این‌که نیازهای اجتماعی پیوسته در حال تغییرند، شاهد تغییر مداوم فناوری‌ها هستیم. تحولات تکنولوژیک[3] به هدف پاسخ به نیازهای جدید و یا برآورده کردن نیازهای موجود با اثر بخشی و کارآیی بالاتر صورت می‌گیرند.

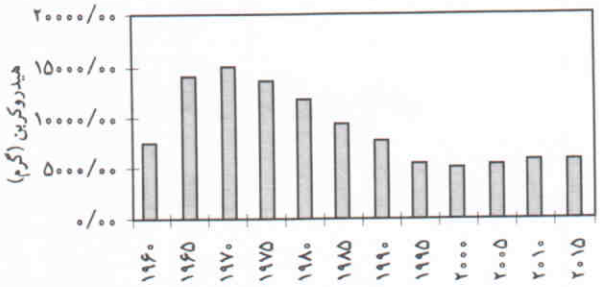
استفاده‌ی بهینه از منابع تجدیدناپذیر و حفظ محیط زیست از جمله چالش‌های مهمی است که امروزه بشر با آن مواجه است. وسائط نقلیه بیشترین سهم را در مصرف سوخت و آلودگی هوا به خود اختصاص می‌دهند. اگر چه خودروهای جدید، نسبت به خودروهای اولیه، به مراتب مواد آلاینده‌ی کمتری تولید می‌کنند، گسترش روزافزون تعداد خودرو در حال تردد و افزایش مسافتی که هر خودرو در طول عمر خود طی می‌کند، منجر به افزایش آلودگی هوا شده است.[2]

مرکز منابع هوای کالیفرنیا[4] میزان هیدروکربن تولید شده در هر کیلومتر، ونیز مسافت پیموده شده توسط هر اتومبیل را بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار داده است (شکل ۱). بر این اساس، آلایندگی اتومبیل‌های امروزی در غرب، نسبت به اتومبیل‌های ۴۰ سال قبل، بیش از ۸۵٪ کاهش یافته است. اما در صورت تداوم استفاده از فناوری‌های موجود، پیش‌بینی می‌شود که آلودگی هوا با توجه به رشد قابل توجه تعداد خودروها و مسیر جابه‌جایی آن‌ها در مجموع افزایش یابد (شکل ۲).

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای حل مشکل فوق صورت گرفته است. بعضی از تلاش‌ها با هدف بهبود فناوری‌های موجود انجام گرفته‌اند، که از آن جمله می‌توان به توسعه‌ی فناوری در موتورهای درون سوز (احتراق داخلی)[5] و موتورهای درون سوز با



شکل ۱. هیدروکربن تولید شده در کیلومتر و نیز مسافت پیموده شده توسط اتومبیل‌ها (سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۵).



شکل ۲. میزان آلایندگی اتومبیل‌ها از سال ۱۹۶۰ تاکنون و پیش‌بینی آن تا سال ۲۰۱۵.

سوخت جدید اشاره کرد. در مقابل، بخش دیگر تلاش‌ها به‌منظور ایجاد تحول اساسی در فناوری‌های موجود و خلق فناوری‌های جدید صورت پذیرفته‌اند، که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از سیستم‌های پیل سوختی[۶]، سیستم‌های الکتریکی (باتریی) و سیستم‌های هیبرید.[۷]

شرکت‌های خودروسازی در جهان برای کسب موقعیت برتر رقابتی، راهکارهای متفاوتی برای دست‌یابی به فناوری‌های پنج‌گانه‌ی فوق اتخاذ کرده‌اند. تصمیم‌گیری در این زمینه یکی از ضرورت‌های امروز صنعت خودرو کشور ما نیز به‌شمار می‌رود. صرف نظر از این‌که صنعت خودرو برای کشور در مقایسه با دیگر صنایع، می‌تواند از مزیت نسبی برخوردار باشد یا خیر، چنانچه بخواهیم به سرمایه‌گذاری در این صنعت ادامه داده و در سطح جهان فعالیت کنیم، باید محصولات خود را با استانداردهای جهانی و شرایط رقابت بین‌المللی سازگار نماییم. لازمه‌ی این کار بهره‌گیری از فناوری‌های برتر در فرایند تولید و نیز در محصولات، به‌ویژه در موتور خودرو است.

بدیهی است به‌علت محدودیت منابع، سرمایه‌گذاری همزمان بر روی تمام فناوری‌ها امکان‌پذیر نیست. لذا صنعت خودرو کشور می‌باید توان خودرا بر روی فناوری‌های خاصی متمرکز سازد و از این طریق یک مزیت رقابتی برای خود ایجاد کند.

انتخاب یک یا چند فناوری برای سرمایه‌گذاری، بستگی به جذابیت نسبی فناوری‌ها و توان کشور در اکتساب و به‌کارگیری آن فناوری‌ها دارد. در این نوشتار ما توجه خود را تنها به مؤلفه‌ی جذابیت معطوف می‌کنیم. در این رابطه اشاره به دو نکته ضروری است:

۱. جذابیت فناوری یک معیار نسبی است. بدین معنی که در مقایسه‌ی فناوری با فناوری‌های رقیب می‌توان میزان جذابیت آن را تعیین کرد.

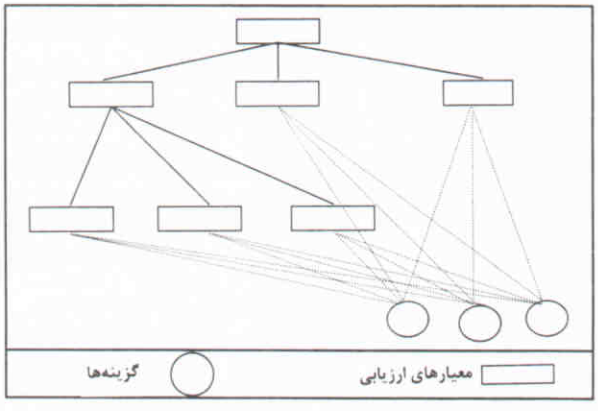
۲. جذابیت یک فناوری از نقطه نظرهای مختلف فنی، اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، سیاسی و... قابل بررسی است. بدین معنی که فناوری مورد نظر ممکن است از بعد فنی نسبت به فناوری‌های دیگر برتری داشته باشد، ولی از بعد اقتصادی یا اجتماعی، نسبت به فناوری‌های رقیب مزیت کم‌تری داشته باشد. بدیهی است جذابیت کلی فناوری تابع موقعیت آن در هر یک از ابعاد و نیز وزنی است که به هر بعد اختصاص می‌یابد.

متأسفانه تاکنون در کشور ما توجه کمی به نکات فوق، به‌ویژه نکته‌ی دوم شده است. ارزیابی فناوری‌ها معمولاً از دیدگاه اقتصادی یا فنی انجام می‌شود. در مواردی نیز که تصمیم‌گیران پارامترهای متعددی را مد نظر قرار می‌دهند، معمولاً تصمیم‌گیری براساس قضاوت کلی و بدون استفاده از ابزارهای تحلیلی صورت می‌گیرد. این در حالی است که روش‌های متعددی برای تصمیم‌گیری در شرایط فوق وجود دارد. یکی از روش‌های علمی تصمیم‌گیری در شرایطی که با پارامترهای متعدد روبرو هستیم، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است، که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم.

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

در این روش چنان‌که از نام آن استنباط می‌شود، مسئله‌ی تصمیم‌گیری در قالب یک ساختار سلسله‌مراتبی (یک درخت) مدل‌سازی می‌شود. شکل ۳ ریشه‌ی درخت هدف نهایی تصمیم‌گیری است. به‌عنوان مثال در اینجا انتخاب فناوری مناسب برای آینده‌ی صنعت خودرو کشور در رأس درخت تصمیم قرار می‌گیرد.

درخت تصمیم ممکن است لایه‌های متعدد داشته باشد. در مثال فوق، می‌توان جنبه‌های اقتصادی، فرهنگی و غیره را در لایه‌ی اول قرار داد. به همین ترتیب، هر یک از پارامترهای مذکور را می‌توان به پارامترهای جزئی‌تری تقسیم کرد. مثلاً قیمت تمام‌شده‌ی محصولی



شکل ۳. حالت کلی درخت تصمیم در روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP).

که از فناوری مورد نظر بهره می‌گیرد، امکان صادرات محصول و میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای دست‌یابی به فناوری مورد نظر، بخشی از جنبه‌های اقتصادی است که می‌توانند مورد توجه قرار گیرند.

در روش تحلیل سلسله مراتبی ابتدا ارزش نسبی پارامترهای تصمیم‌گیری، و سپس ارزش نسبی هر یک از گزینه‌ها در برابر هر یک از پارامترها تعیین می‌شوند. بدین ترتیب که ارزش نسبی پارامترهای لایه‌ی اول درخت در مقایسه باهدف نهایی تعیین می‌شود و سپس ارزش نسبی پارامترهای لایه دوم نسبت به هر یک از پارامترهای لایه‌ی اول که در ارتباط با آنها قرار می‌گیرند، و به همین ترتیب تا لایه‌ی آخر که ارزش نسبی پارامترها در مقایسه با پارامترهای لایه‌ی ماقبل آخر تعیین می‌شود. پس از این مرحله، ارزش (نمره) نهایی هر یک از گزینه‌ها از جمع وزنی ارزش آن گزینه در ارتباط با پارامترهای مورد مطالعه به‌دست می‌آید. این ارزش را با رابطه‌ی زیر نمایش می‌دهند:

$$SA_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \times c_{ij} \qquad (1)$$

که در آن:

SA_i= ارزش کلی گزینه‌ی i؛

w_j= ارزش نسبی پارامتر j در رابطه با هدف غایی ؛

c_{ij}= ارزش گزینه‌ی i از نظر پارامتر j.

در روش تحلیل سلسله مراتبی، برای تعیین ارزش نسبی پارامترها یا گزینه‌ها از مقایسات زوجی استفاده می‌کنند. هر پارامتر یا گزینه با پارامترها یا گزینه‌های هم‌لایه‌ی خود مقایسه شده و امتیاز دریافت می‌کند. چنانچه مقایسه‌ی پارامترها یا گزینه‌ها به‌صورت کمّی امکان‌پذیر باشد، نسبت (کسر) مقادیر نشان‌دهنده‌ی ارجحیت یا امتیاز یک پارامتر یا گزینه، به پارامتر یا گزینه‌ی دیگر است. اما اگر مقایسه به‌صورت کمّی امکان‌پذیر نباشد، ارجحیت یا امتیاز براساس جدول ۱ محاسبه می‌شود. بدین‌ترتیب تصمیم‌گیرنده نظر کیفی[8] خود

جدول ۱. جدول تبدیل ارجحیت تصمیم گیرنده به امتیازات عددی.

میزان ارجحیت پارامتر a نسبت به پارامتر b	امتیاز
هیچ ارجحیتی وجود ندارد	۱
a بر b کمی ارجح است	۳
a بر b ارجح است	۵
a بر b خیلی ارجح است	۷
a مطلقاً بر b ارجح است	۹

را با استفاده از این جدول به اعداد کمی تبدیل کرده و در ماتریس مربعی به نام ماتریس امتیازات وارد می‌کند:

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

اگر امتیاز پارامتر (گزینه) a نسبت به پارامتر (گزینه) b را با a_{ij} نمایش دهیم، خواهیم داشت:

$$a_{ij}=\frac{1}{a_{ji}} \quad , \quad a_{ii}=1 \qquad (2)$$

بنابراین کافی است که تصمیم‌گیرنده یکی از مثلث‌های بالایی یا پایینی ماتریس امتیازات را تکمیل کند. به‌دنبال تکمیل ماتریس امتیازات، ارزش نسبی پارامترها از طریق محاسبه‌ی بردار ویژه[9]ی این ماتریس تعیین می‌شود:

$$W=\lim_{k\to\infty} A_e^k / e^T A^k e \qquad (3)$$

که در آن:

$W(w_j)$= بردار ویژه‌ی ماتریس امتیازات و یا اهمیت نسبی پارامترها (گزینه‌ها)؛

$A(a_{ij})$= ماتریس امتیازات یا ماتریس مقایسات زوجی[10]؛

e= بردار یکه؛

e^T= بردار یکه‌ی تبدیل یافته.

پس از محاسبه‌ی بردار ویژه، براساس روابط زیر میزان ناسازگاری تصمیم گیرنده محاسبه می‌شود:

$$C.I.=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \qquad (4)$$

$$\lambda_{max}=\frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij} \times w_j}{w_1} \qquad (5)$$

که در آن:

$C.I.$= شاخص سازگاری[11]؛

λ_{max}= مقدار ویژه[12]ی ماتریس امتیازات؛

w_j= اهمیت نسبی پارامتر (گزینه) زام؛

n= ابعاد ماتریس مربعی امتیازات.

به‌منظور تعدیل شاخص سازگاری ($C.I.$)، آن را بر مقداری ثابت تقسیم می‌کنند که براساس تجربه حاصل شده است. این مقدار ثابت از تولید تصادفی ماتریس‌های متعدد و محاسبه‌ی میانگین $C.I.$ آنها

جدول ۲. مقدار *R.I.* به ازای *n*های مختلف.

n	*R.I.*	*n*	*R.I.*
۱و۲	۰/۰۰	۹	۱/۴۵
۳	۰/۵۸	۱۰	۱/۴۹
۴	۰/۹۰	۱۱	۱/۵۱
۵	۱/۱۲	۱۲	۱/۴۸
۶	۱/۲۴	۱۳	۱/۵۶
۷	۱/۳۲	۱۴	۱/۵۷
۸	۱/۴۱	۱۵	۱/۵۹

به‌دست آمده است. به‌همین دلیل از آن به‌عنوان شاخص تصادفی [۱۳] یاد می‌کنند. *R.I.* تابعی است از ابعاد ماتریس امتیازات *(n)*، ولی برای ماتریس‌های با اندازه‌ی یکسان، ثابت است. جدول ۲ مقادیر *R.I.* را برای *n*های مختلف نشان می‌دهد.

بدین ترتیب، شاخص دیگری تحت عنوان نسبت سازگاری [۱۴] محاسبه می‌شود که تعدیل یافته‌ی *C.I.* است:

$$C.R.=\frac{C.I.}{R.I.} \qquad (۶)$$

و در آن:

C.R.= نسبت سازگاری؛

C.I.= شاخص سازگاری؛

R.I.= شاخص تصادفی.

در مورد مزایای روش تحلیل سلسله مراتبی می‌توان به‌طور خلاصه به موارد زیر اشاره کرد:[۳و۴]

۱. با تبدیل مسئله‌ی تصمیم‌گیری به یک درخت تصمیم، تصویر روشنی از مسئله به دست می‌آید، که بررسی مسائل پیچیده را به‌راحتی امکان‌پذیر می‌سازد.

۲. امکان در نظر گرفتن پارامترهای کمی و کیفی را به‌طور همزمان فراهم می‌سازد.

۳. به تصمیم‌گیری گروهی اهمیت داده و از آن بهره‌برداری شایانی می‌کند.

۴. دراین روش میزان ناسازگاری تصمیم‌گیرنده در مقایسات زوجی بررسی می‌شود. درجه‌ی ناسازگاری نشان می‌دهد که تا چه اندازه می‌توان به مقایسات انجام شده اعتماد کرد. چنانچه این مقدار از حد مجاز بیشتر باشد، تجدید نظر در ماتریس امتیازات ضروری است.

مقایسه‌ی پیل سوختی با فناوری‌های رقیب

همان‌طور که اشاره شد، فعالیت‌های بخش تحقیق و توسعه (R&D) خودروسازان جهان بر پایه‌ی پنج فناوری متمرکز است: سیستم‌های پیل سوختی، سیستم‌های الکتریکی /باتری، سیستم‌های هیبرید، موتورهای درون سوز (ICE) و موتورهای درون سوز احتراق داخلی با سوخت جدید (ICE - NF). هدف، بررسی جذابیت فناوری‌های فوق برای صنعت خودرو کشور در یک دورنمای ۱۰ساله است.

تعیین معیارهای تصمیم‌گیری

برای ارزیابی گزینه‌های پنج‌گانه در بررسی جذابیت فناوری‌های ذکر شده، ابتدا پارامترهای اصلی مؤثر در تصمیم‌گیری بدین شرح انتخاب شدند: شاخص‌های فنی، شاخص‌های اقتصادی، شاخص‌های مربوط به مشخصات فناوری (شاخص‌های تکنولوژیک)، شاخص‌های زیست‌محیطی و شاخص‌های فرهنگی ـ سیاسی. این شاخص‌ها به‌عنوان سرشاخه‌های درخت تصمیم در نظر گرفته شدند و سپس هر یک از شاخه‌ها به زیرشاخه‌های جزئی‌تر تفکیک و در نهایت مجموعه‌ی درخت تصمیم تکمیل شد (شکل ۴). در ادامه به شرح مختصر هر یک از شاخه‌های درخت تصمیم می‌پردازیم.

شاخص‌های فنی

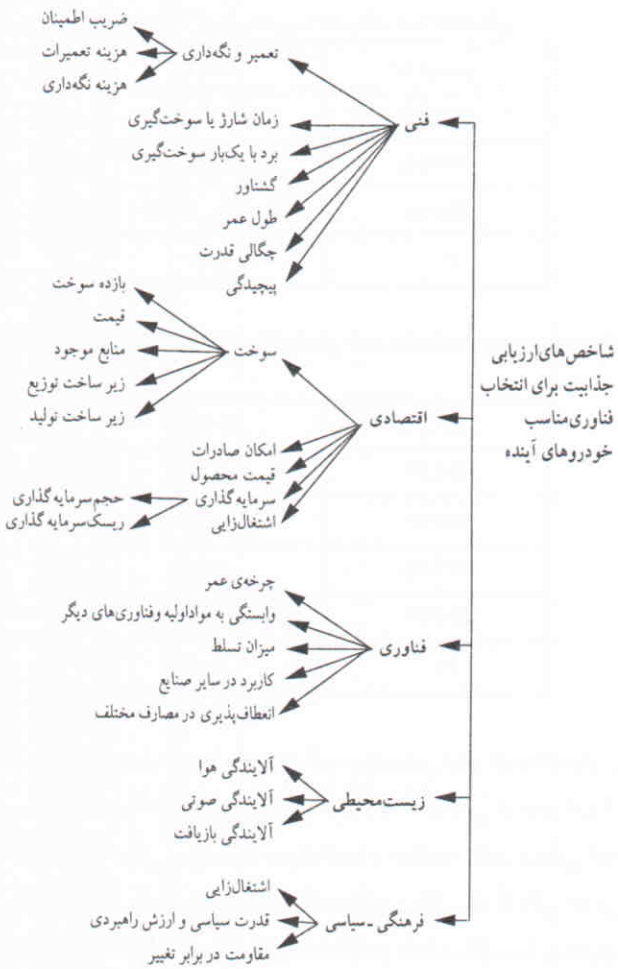
کارشناسان فنی و مصرف‌کنندگان عمدتاً به خصوصیات فنی و مشخصات سرویس‌دهی خودرو توجه داشته و آن‌را معیار انتخاب خود قرار می‌دهند. در یک بازار رقابتی، تولیدکنندگان ملزم به در نظر گرفتن این مشخصات و جلب رضایت مشتریان خواهند بود. لذا توجه به این معیارها در انتخاب فناوری مناسب ضروری است. شاخص‌های فنی که در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند عبارت‌اند از:

تعمیرپذیری: سادگی تعمیر و نگه‌داری خودرویی که در آن از فناوری مورد نظر استفاده شده است، با جذابیت فناوری نسبت مستقیم دارد. «تعمیرپذیری» به سه زیر شاخه‌ی «ضریب اطمینان»، «هزینه‌ی تعمیرات» و «هزینه‌ی نگهداری» تفکیک می‌شود.

زمان شارژ یا سوخت‌گیری: زمان شارژ یا سوخت‌گیری خودرویی که در آن از فناوری مورد نظر استفاده شده است، با جذابیت فناوری نسبت معکوس دارد.

برد با یک‌بار سوخت‌گیری: مسافتی که خودرو استاندارد با یک‌بار سوخت‌گیری طی می‌کند، یکی از شاخص‌های جذابیت فناوری مورد استفاده در آن خودرو به حساب می‌آید.

گشتاور و چگالی قدرت موتور: از جمله مشخصات فنی محصول



شکل ۴. درخت تصمیم در مسئله‌ی انتخاب فناوری مناسب برای خودروهای آینده.

به‌شمار می‌روند که معمولاً مورد نظر مشتری است و با جذابیت فناوری مورد استفاده در خودرو نسبت مستقیم دارد.

طول عمر: فناوری‌ها بر طول عمر محصول اثر متفاوتی دارند. از دید مصرف‌کننده، هر اندازه طول عمر خودرو بیشتر باشد مطلوبتر است و می‌توان نتیجه گرفت که فناوری به‌کار رفته در آن خودرو جذاب‌تر است.

پیچیدگی سیستم: معمولاً پیچیدگی سیستم علاوه بر کاهش درجه‌ی تعمیرپذیری محصول، در مصرف کنندگان آن اثرات روانی منفی برجای می‌گذارد.

شاخص‌های اقتصادی

یکی از پارامترهای مؤثر در انتخاب فناوری‌های آینده، پیامدهای اقتصادی سرمایه‌گذاری روی این فناوری‌هاست. بخشی از جنبه‌های اقتصادی که دراین مطالعه مورد توجه قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از:

قیمت محصول: قیمت تمام شده‌ی محصولی که در آن از فناوری مورد نظر استفاده شده است، در موفقیت آن محصول در بازار و در جذابیت فناوری مؤثر است.

امکان صادرات: امکان صادرات محصولی که در آن از فناوری مورد نظر بهره گرفته شده است، در جذابیت فناوری مؤثر است.

سرمایه‌گذاری مورد نیاز: میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای دست‌یابی به فرایند مورد نظر با جذابیت آن نسبت معکوس دارد. شاخص سرمایه‌گذاری به دو زیر شاخه‌ی حجم سرمایه‌گذاری مورد نیاز و ریسک حاصل از سرمایه‌گذاری تفکیک می‌شود.

پارامترهای مربوط به سوخت: بخشی از شاخص‌های اقتصادی مربوط به مصرف سوخت در خودرویی است که از فناوری مورد نظر استفاده می‌کند. پارامترهای مربوط به سوخت نیز به پنج زیر شاخه قابل تفکیک است: بازده سوخت در خودرو، سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای ایجاد زیرساخت تولید سوخت، سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای ایجاد زیرساخت توزیع سوخت، منابع سوختی موجود در کشور و قیمت سوخت مورد نیاز.

اشتغال زایی: تعداد شغل مستقیم و غیرمستقیم که ممکن است در جریان توسعه‌ی فناوری مورد نظر ایجاد شوند، یکی دیگر از پارامترهای اقتصادی است که در جذابیت فناوری مؤثر است.

شاخص‌های فناوری

هر فناوری دارای مشخصات و ویژگی‌های خاصی است که آن‌را از سایر فناوری‌ها متمایز می‌کند. مقایسه‌ی فناوری‌ها از این بعد می‌تواند تصمیم‌گیران را در انتخاب فناوری مناسب یاری کند. شاخص‌های فناوری مورد توجه در این مطالعه عبارت‌اند از:

چرخه‌ی عمر فناوری: فناوری در طول عمر خود چهار مرحله را سپری می‌کند:[5] پیدایش (جنینی)، رشد، بلوغ، و زوال (جایگزینی). مرحله‌یی از چرخه‌ی عمر که فناوری در آن قرار دارد، می‌تواند در جذابیت فناوری مؤثر باشد. به‌عنوان مثال، فناوری که در مرحله‌ی رشد قرار دارد نسبت به فناوری که در مرحله‌ی بلوغ یا زوال بسر می‌برد به‌مراتب از جذابیت بیشتری برخوردار است.

وابستگی فناوری به مواد اولیه و فناوری‌های دیگر: هر قدر وابستگی یک فناوری به مواد اولیه و فناوری‌های دیگری که در اختیار ما نیستند بیشتر باشد، جذابیت آن کمتر است.

میزان تسلط متخصصان داخلی بر فناوری: یکی از شرایط لازم برای دست‌یابی به فناوری مورد نظر وجود حداقل آگاهی و دانش نسبت به آن در کشور است. لذا تسلط متخصصان داخلی بر فناوری، جذابیت آن‌را افزایش می‌دهد.

کاربرد فناوری در سایر صنایع و انعطاف‌پذیری آن در مصارف مختلف: چنانچه امکان به‌کارگیری فناوری در محصولات مختلف و یا صنایع مختلف وجود داشته باشد، جذابیت آن بیشتر است.

شاخص‌های زیست محیطی

ازجمله شاخص‌های مهم تصمیم‌گیری در مورد فناوری‌های آینده‌ی خودرو، تأثیر آنها بر محیط زیست است که امروزه یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های جامعه‌ی بشری است. این‌که هر یک از گزینه‌ها تا چه حد بر محیط زندگی بشر تأثیر نامطلوب دارد می‌تواند در جذابیت آن برای سرمایه‌گذاری آینده مؤثر باشد. این تأثیر می‌تواند شامل مواردی چون آلایندگی هوا، آلایندگی صوتی و ارتعاش و همچنین آلایندگی محیط زیست به سبب انباشت مواد غیرقابل بازیافت (آلایندگی بازیافت) باشد.

شاخص‌های فرهنگی ـ سیاسی

علاوه بر ابعاد فنی، اقتصادی، تکنولوژیک و زیست محیطی، ارزیابی گزینه‌ها از منظر مسائل فرهنگی و سیاسی نیز ضروری است. فناوری‌ها براساس ویژگی‌های خاص خود اثر متفاوتی بر فرهنگ و نیز قدرت سیاسی کشورها دارند، که این موضوع جذابیت آن‌ها را دستخوش تغییر می‌سازد. شاخص‌های مربوط به مسائل فرهنگی و سیاسی که در این پروژه مورد توجه قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از: مقاومت جامعه در برابر تغییرات ناشی از به‌کارگیری فناوری جدید، ارزش راهبردی فناوری برای کشور (امکان کسب قدرت سیاسی ناشی از دست‌یابی به فناوری جدید) و تأثیر فناوری در اشتغال‌زایی. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عامل «اشتغال‌زایی» در میان شاخص‌های فرهنگی ـ سیاسی و شاخص‌های اقتصادی مشترک است.

تعیین وزن (ارزش) شاخص‌های درخت تصمیم

پس از شناسایی معیارهای ارزیابی (شاخص‌های جذابیت) و تعیین موقعیت آنها در درخت تصمیم، نوبت به محاسبه‌ی وزن (ارزش) نسبی هر یک از معیارها می‌رسد. برای این‌کار از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. بدین ترتیب که از کارشناسان و متخصصین ذی‌ربط خواسته شد تا با مقایسه‌ی زوجی شاخص‌ها نظر خود را مطابق با جدول ۱ در ماتریس امتیازات وارد کنند. سپس از طریق محاسبه‌ی بردار ویژه‌ی ماتریس امتیازات، وزن یا ارزش نسبی شاخص‌ها به‌دست آمد. به‌عنوان مثال، نتیجه‌ی مقایسات زوجی شاخص‌های زیست‌محیطی به‌شرح جدول ۳ است.

جدول ۳. ارزش نسبی شاخص‌های زیست‌محیطی.

نام شاخص	ارزش نسبی
آلایندگی هوا	٪۷۸/۵۴
آلایندگی صوتی	٪۱۴/۸۸
آلایندگی بازیافت	٪۶/۸۵
جمع	٪۱۰۰

جدول ۴. ارزش نسبی شاخص‌های اصلی (سرشاخه‌های درخت تصمیم)، از دیدگاه دولت.

نام شاخص	ارزش نسبی
فناوری	٪۲۱/۶۲
زیست‌محیطی	٪۸/۴۷
اقتصادی	٪۶۱/۴۵
فرهنگی ـ سیاسی	٪۸/۴۷
جمع	٪۱۰۰

این جدول نشان می‌دهد که براساس نظر کارشناسان و متخصصینی که مورد پرسش قرار گرفته‌اند، آلایندگی هوا به‌مراتب از آلایندگی صوتی و بازیافت مهم‌تر است و درنتیجه فناوری‌هایی که کمتر آلودگی هوا ایجاد کنند، نسبت به فناوری‌هایی که آلودگی صوتی یا بازیافت کمتری ایجاد می‌کنند، از مزیت (جذابیت) بیشتری برخوردار خواهند بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار مطلق اعداد معنی‌دار نیست، بلکه نسبت آنهاست که می‌تواند ارزش نسبی هر معیار را مشخص کند.

محاسبات فوق برای چهار شاخه‌ی دیگر درخت (یعنی فنی، اقتصادی، تکنولوژیک و فرهنگی ـ سیاسی) انجام شد، که از ذکر جزئیات آن صرف نظر می‌شود. سپس سرشاخه‌های درخت با یکدیگر مقایسه شدند وزن نسبی آن‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی تعیین شد. نتیجه‌ی این محاسبات در جدول ۴ نمایش داده شده است. بر اساس نظر کارشناسان، برای انتخاب فناوری مناسب، شاخص‌های اقتصادی بیشترین ارزش را به خود اختصاص می‌دهند و شاخص‌های تکنولوژیک در درجه‌ی بعدی اهمیت قرار دارند. در این ارزیابی، شاخص‌های فنی وزن صفر به خود گرفته و از درخت تصمیم حذف شده‌اند. آیا این امر نشانگر بی‌اهمیت بودن معیارهای فنی در انتخاب فناوری مناسب است؟ در پاسخ باید گفت که محاسبات فوق از دیدگاه دولت صورت گرفته است. کارشناسانی که در این مطالعه شرکت کرده‌اند معتقدند که چنانچه بخواهیم از منظر دولت به فناوری مناسب خودروهای آینده نگاه کنیم، معیارهای فنی

دارای ارزش چندانی نخواهند بود. ارزیابی‌های جداگانه‌ی مشابهی از دیدگاه تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان خودرو انجام شده است که به نتایج متفاوتی در مورد وزن (ارزش) نسبی شاخص‌های ارزیابی منتج شده است (جدول ۵). به‌عنوان مثال شاخص‌های فنی که از دیدگاه دولت غیر مهم ارزیابی شدند، از دیدگاه مصرف‌کنندگان خودرو بالاترین ارزش، و از دیدگاه تولید کنندگان خودرو مقام دوم اهمیت را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۵. ارزش نسبی شاخص‌های اصلی درخت تصمیم ازدیدگاه تولیدکنندگان و مصرف کنندگان خودرو.

نام شاخص	ارزش نسبی از دیدگاه تولیدکنندگان	ارزش نسبی از دیدگاه مصرف‌کنندگان
تکنولوژیک	٪۱۳/۹۷	٪۰
زیست‌محیطی	٪۶/۷۱	٪۸/۵۲
اقتصادی	٪۵۳/۹۹	٪۲۷/۰۶
فرهنگی ـ سیاسی	٪۳/۰۵	٪۰
فنی	٪۲۲/۲۸	٪۶۴/۴۲
جمع	٪۱۰۰	٪۱۰۰

جدول ۶. ارزش نسبی شاخص‌ها با توجه به وزن سرشاخه‌های درخت تصمیم، از دیدگاه دولت.

گروه شاخص‌ها	نام شاخص	ارزش نسبی
تکنولوژیک	چرخه‌ی عمر	٪۳/۹۶
	وابستگی‌به‌مواداولیه‌وسایرفناوری‌ها	٪۳/۹۶
	میزان تسلط	٪۳/۹۶
	کاربرد در سایر صنایع	٪۹/۷۶
	انعطاف‌پذیری در مصارف مختلف	٪۰/۸۸
زیست‌محیطی	آلایندگی هوا	٪۶/۵۶
	آلایندگی صوتی	٪۱/۶۲
	آلایندگی بازیافت	٪۰/۶۵
فنی	بازده سوخت	٪۲/۳۳
	زیرساخت تولید سوخت	٪۶/۳۴
	زیرساخت توزیع سوخت	٪۶/۳۴
	منابع سوخت	٪۱۶/۱۵
	قیمت سوخت	٪۲/۳۳
اقتصادی	امکان صادرات	٪۸/۰۲
	قیمت محصولات	٪۲/۴۸
	اشتغال	٪۱۶/۳۸
فرهنگی ـ سیاسی	اشتغال	٪۲/۴۵
	مقاومت در برابر تغییر	٪۰/۴۶
	قدرت سیاسی و ارزش راهبردی	٪۵/۵۶
جمع		٪۱۰۰

اکنون با مشخص شدن وزن سرشاخه‌ها، می‌توان وزن نهایی شاخص‌های جزئی را از ضرب ارزش (اهمیت) نسبی هر شاخص در ارزش سرشاخه‌ی آن به‌دست آورد. به‌عنوان مثال، شاخص‌های زیست‌محیطی (آلایندگی هوا، آلایندگی صوتی و آلایندگی بازیافت) به‌ترتیب از اهمیت نسبی ٪۷۸/۵۴، ٪۱۴/۸۸ و ٪۶/۸۵ برخوردارند. حال با ضرب هریک از این اعداد در عدد ۰/۸۴۷ که ارزش شاخه‌ی زیست‌محیطی، از منظر دولت، است ارزش نهایی شاخص‌های زیست‌محیطی از منظر دولت به‌دست خواهد آمد. جدول ۶ ارزش نهایی کلیه شاخص‌های ارزیابی را از منظر دولت نشان می‌دهد. بدیهی است جداول مشابهی نیز از نقطه‌نظر تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان خودرو وجود دارد. در نتیجه مابا سه درخت تصمیم روبرو هستیم که ساختار مشابهی دارند ولی وزن شاخص‌ها در آن‌ها متفاوت است.

تعیین ارزش نسبی گزینه‌ها (فناوری‌های بر گزیده)

پس از تعیین ارزش نسبی شاخص‌های ارزیابی، نوبت به مقایسه‌ی گزینه‌های پنج‌گانه (موتورهای درون سوز، موتورهای درون سوز با سوخت جدید، باتری، هیبریدی، و پیل سوختی) می‌رسد. برای این منظور با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی ارزش نسبی گزینه‌ها در برابر هریک از شاخص‌های ارزیابی تعیین شد.[15] به‌عنوان مثال نظرسنجی از کارشناسان و متخصصین، حاکی از آن است که در رابطه با تسلط کشور به فناوری‌های فوق، سیستم باتری در مقام اول، سیستم موتورهای درون سوز با سوخت معمولی یا سوخت جدید در مقام دوم، و پیل سوختی در مقام سوم قرار دارد (جدول ۷). در حالی‌که از نظر کاربرد در سایر صنایع پیل سوختی با اختلاف زیادی نسبت به رقبای خود پیشی می‌گیرد (جدول۸).

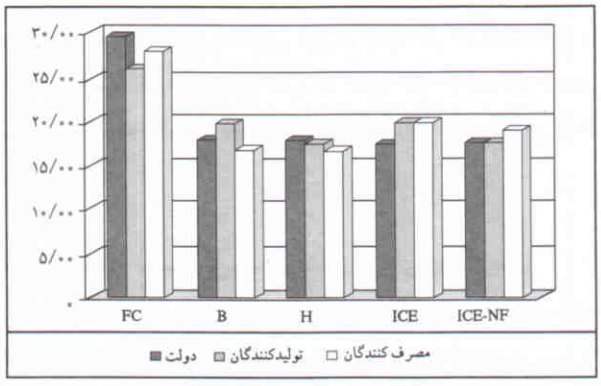
با به‌دست آمدن وزن نسبی گزینه‌ها در برابرهر یک از شاخص‌های ارزیابی و جمع این اوزان روی تمام شاخص‌ها،

جدول ۷. ارزش نسبی گزینه‌ها (فناوری‌ها) ازنظر میزان تسلط بر فناوری در داخل کشور.

نام فناوری	ارزش نسبی
FC	٪۱۷/۳۹
B	٪۲۸/۹۹
H	٪۱۳/۰۴
ICE	٪۲۰/۲۹
ICE-NF	٪۲۰/۲۹
جمع	٪۱۰۰

جدول ۸. ارزش نسبی گزینه‌ها (فناوری‌ها) از نظر کاربرد در سایر صنایع.

نام فناوری	ارزش نسبی
FC	٪۴۸/۷۸
B	٪۱۲/۲۰
H	٪۰
ICE	٪۱۹/۵۱
ICE-NF	٪۱۹/۵۱
جمع	٪۱۰۰



شکل ۵. جمع‌بندی ارزش نهایی فناوری‌های مورد بررسی از دیدگاه دولت، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان خودرو.

وزن‌نهایی گزینه‌ها از طریق رابطه‌ی ۱ به‌دست آمد. وزن نهایی فناوری‌ها جذابیت آن‌ها را برای سرمایه‌گذاری مشخص کرد. بدیهی است در این راستا شاهد سه رتبه‌بندی مختلف (از دیدگاه دولت، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان) بودیم (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، فناوری پیل سوختی در هر سه رتبه‌بندی مقام اول اهمیت را به خود اختصاص داده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به: الف) روند جهانی‌شدن تجارت، نقش صنعت خودرو در اقتصاد ایران و لزوم پیوستن آن به بازار بین‌المللی؛ ب) لزوم استفاده‌ی بهینه از ذخایر نفتی؛ ج) ضرورت چاره‌جویی برای مشکل آلودگی هوا در شهرهای بزرگ کشور، به‌کارگیری فناوری‌های برتر در تولیدخودروهای جدید از اهمیت ویژه‌یی برخوردار است.

یکی از فناوری‌های مطرح که می‌تواند جایگزین فناوری‌های موجود شود، پیل سوختی است. با به‌کارگیری این فناوری در موتور خودروهای جدید می‌توان در عین کاهش آلودگی، بازده مصرف سوخت را به‌نحو چشم‌گیری افزایش داد. از طرفی بهره‌گیری از این فناوری می‌تواند موقعیت رقابتی صنعت خودرو کشور را در جهان ارتقاء دهد.

به‌منظور بررسی جذابیت این فناوری، برای صنعت خودرو کشور، فناوری پیل سوختی با فناوری‌های رقیب آن (موتورهای درون سوز، موتورهای دورن سوز با سوخت جدید، سیستم‌های الکتریکی/باتری و سیستم‌های هیبرید) در یک دورنمای ۱۰ ساله مقایسه شد. نتیجه‌ی این مطالعه که با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و با بهره‌گیری از نظر کارشناسان و متخصصین ذی‌ربط صورت گرفت، نشان داد که فناوری پیل سوختی از سه منظر دولت، تولید کنندگان خودرو ومصرف‌کنندگان خودرو، انتخابی مناسب‌تر است. ارجحیت (جذابیت) فناوری پیل سوختی به حدی از سایر گزینه‌ها بیشتر است که نیاز به هرگونه تجزیه و تحلیل حساسیت را منتفی می‌سازد.

به هر حال تذکر این مطلب مفید است که نوشتار حاضر تنها جذابیت پیل سوختی را در مقایسه با فناوری‌های رقیب مورد بررسی قرار داده است. بدیهی است تصمیم‌گیری نهایی در این زمینه نیازمند بررسی توان کشور در جذب و به‌کارگیری این فناوری است که موضوع مطالعه جداگانه‌یی را تشکیل می‌دهد.

نتایج مطالعه‌ی ارائه شده در این نوشتار از طرفی، و رشد روزافزون فعالیت‌های تحقیق و توسعه در زمینه‌ی پیل سوختی در کشورهای صنعتی جهان از طرف دیگر، می‌تواند مدیران ارشد کشور را به تعمق بیشتر در زمینه‌ی این فناوری نوین ترغیب کند. کاربرد گسترده‌ی این فناوری در صنایع مختلف بر این نکته‌ی مهم دلالت دارد که به‌واسطه‌ی ظهور این فناوری تحولات بزرگی در انتظار جامعه‌ی بشری است. این موضوع برنامه‌ریزی دقیق و تدوین راهکار مناسب به‌منظور توسعه‌ی فناوری پیل سوختی را در کشور ضروری می‌سازد.

پانوشت

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)
2. multi - criteria analysis
3. technological changes
4. California Air Resources Board
5. internal combustion engine
6. fuel cell
7. hybrid
8. subjective
9. eigen vector
10. matrix of pairwise comparison
11. consistency index
12. eigen value
13. random index

14. consistency ratio

۱۵. در مواردی که مقایسه‌ی گزینه‌ها به‌صورت کمی امکان‌پذیر نبود، از جدول ۱ برای مقایسه‌ی کیفی آن‌ها استفاده شد.

منابع

1. Little, A. D., "The strategic management of technology", European Management Forum, DAVOS (1981).

۲. بولتن پیل سوختی، سال اول، شماره ۱، (مرداد ماه ۱۳۷۹).

3. Harker, P. T., "The Art and science of decision making: the analytic hierarchy process", in B. L. Golden et. al. *The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies,* Springer-Verlag, PP. 3-36, (1989).
4. Saaty, T. L., "The analytic hierarchy process, McGraw-Hill" (1980).
5. Khalil, T. M., *Management of Technology: The Key to Competitiveness and Wealth Creation,* McGraw-Hill (2000).