



وزارت نیرو

معاونت امور برق و انرژی

دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی

بررسی مسمخنی یادگیری فناوری پیل سوختی

گروه نوآوری و توسعه فناوری های برق و انرژی

آذر ۱۳۸۹

مقدمه

پیل سوختی یک سامانه پیشرفته تولید انرژی پاک و دوستدار محیط زیست است. این فناوری با توجه به کاهش ذخایر سوخت فسیلی، وضع قوانین بین المللی کنترل انتشار گازهای گلخانه ای و سیاست های ملی انرژی در جهان مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است.

پیل سوختی یک ابزار تبدیل انرژی الکتروشیمیایی است که طی واکنش های اکسایش و کاهش در آند و کاتد پیل، انرژی شیمیایی هیدروژن و اکسیژن را به برق و انرژی حرارتی تبدیل می کند و آب تنها محصول جانبی این سامانه خواهد بود. پیل سوختی دارای راندمان تبدیل انرژی بیش از ۴۰٪ تا ۵۰٪ بوده و یک فناوری پاک محسوب می گردد. این فناوری قابلیت کار با سوخت خالص هیدروژن و یا سوخت های اولیه ای چون گاز طبیعی و متانول را دارد که در این حالت سوخت ها را می توان به صورت مستقیم مصرف و یا برای تولید هیدروژن استفاده نمود.

در حال حاضر ۶ نوع عمده پیل سوختی بر اساس نوع الکترولیت به کاررفته عبارتند از: پیل سوختی قلیایی^۱، پیل سوختی اسید فسفریک^۲، پیل سوختی کربنات مذاب^۳، پیل سوختی اکسید جامد^۴، پیل سوختی پلیمری^۵ و پیل سوختی متانولی^۶ که در جدول ۱ به ویژگی های هر یک اشاره شده است [1].

¹ AFC

² PAFC

³ MCFC

⁴ SOFC

⁵ PEMFC

⁶ DMFC

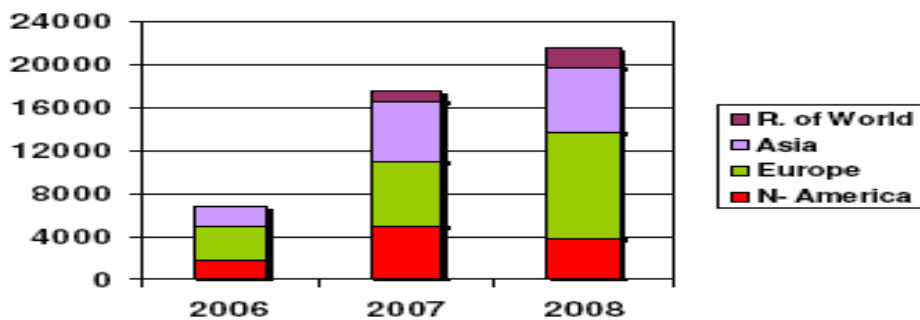
جدول ۱: مزایا و معایب انواع پیل های سوختی

نوع	دما (°C)	راندمان (%)	کاربرد	مزایا	معایب
قلیایی	۵۰-۹۰	۵۰-۷۰	کاربردهای فضایی	راندمان بالا	حساسیت به دی اکسید کربن موجود در هیدروژن و هوای ناخالص، خوردگی، گران بودن
اسید فسفریک	۱۷۵-۲۲۰	۴۰-۴۵	مستقل از شبکه و تولید همزمان برق و حرارت	عدم حساسیت به هیدروژن ناخالص، رسیدن به مرحله تجاری سازی	دانشیته انرژی پایین، خوردگی و مسمومیت با سولفور
کربنات مذاب	۶۰۰-۶۵۰	۵۰-۶۰	مرکزی، مستقل از شبکه و تولید همزمان برق و حرارت	راندمان بالا، در شرف تجاری شدن	ناپایداری الکترولیت، خوردگی
اکسید جامد	۸۰۰-۱۰۰۰	۵۰-۶۰	مرکزی، مستقل از شبکه و تولید همزمان برق و حرارت	راندمان بالا و امکان استفاده مستقیم از سوخت های فسیلی	دمای بالا، شکست در اثر تنش حرارتی، کک زایی و مسمومیت با سولفور
پلیمری	۶۰-۱۰۰	۴۰-۵۰	خودرویی، قابل حمل	دانشیته انرژی بالا و دمای پایین	حساسیت به منواکسید کربن موجود در هیدروژن ناخالص
متانولی	۵۰-۱۲۰	۲۵-۴۰	خودرویی، قابل حمل کوچک	عدم نیاز به تبدیل سوخت، دانشیته انرژی بالا، دمای پایین	راندمان پایین، عبوردهی متانول، محصول جانبی سمی

بر اساس طبقه بندی ارائه شده از سوی کمیته راهبری، پیل سوختی به انواع پلیمری، قلیایی، اسید فسفریک، اکسید جامد، هوا-روی، سرامیکی پروتونی، کربنات مذاب، متانولی، میکروبی، اسید فرمیک، هیبرید فلزی، احیاء کننده، متانولی بهسازی شده، کربنی مستقیم، الکتروگالوانی، بروهیدرید مستقیم و اتانولی طبقه بندی گردیده است [2].

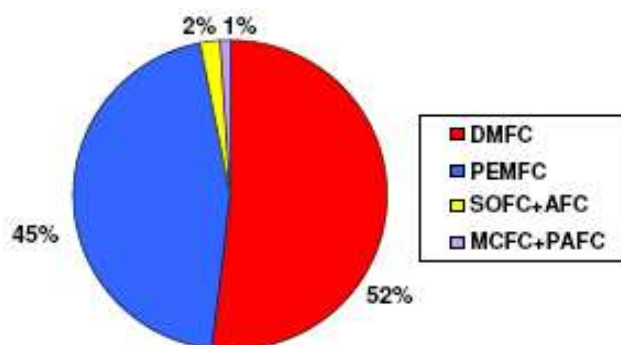
بازار و روند پیل سوختی

در تصویر ۱ میزان تولید پیل سوختی طی سال های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ به تفکیک مناطق مختلف جغرافیایی (آمریکای شمالی، اروپا، آسیا و بقیه دنیا) آورده شده است.



شکل ۱: تعداد پیل های سوختی تولید شده در مناطق مختلف جهان

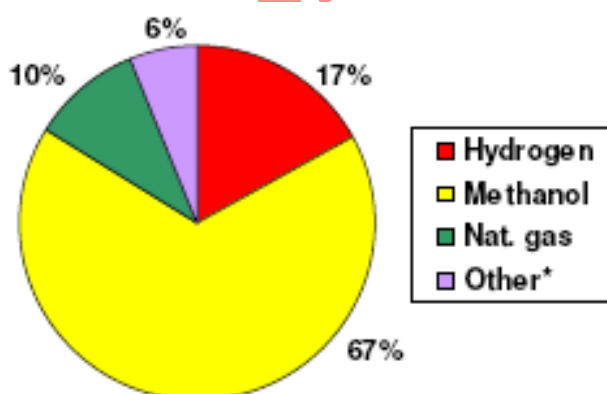
همچنین در شکل ۲ میزان تولید پیل سوختی بر اساس نوع فناوری در سال ۲۰۰۸ در جهان ملاحظه می گردد.



شکل ۲: درصد انواع مختلف پیل سوختی تولید شده در جهان در سال ۲۰۰۸

همانطور که از شکل ۲ مشخص می گردد بیش از ۹۰٪ از پیل سوختی تولیدی در جهان در این سال از نوع پلیمری و متانولی بوده است.

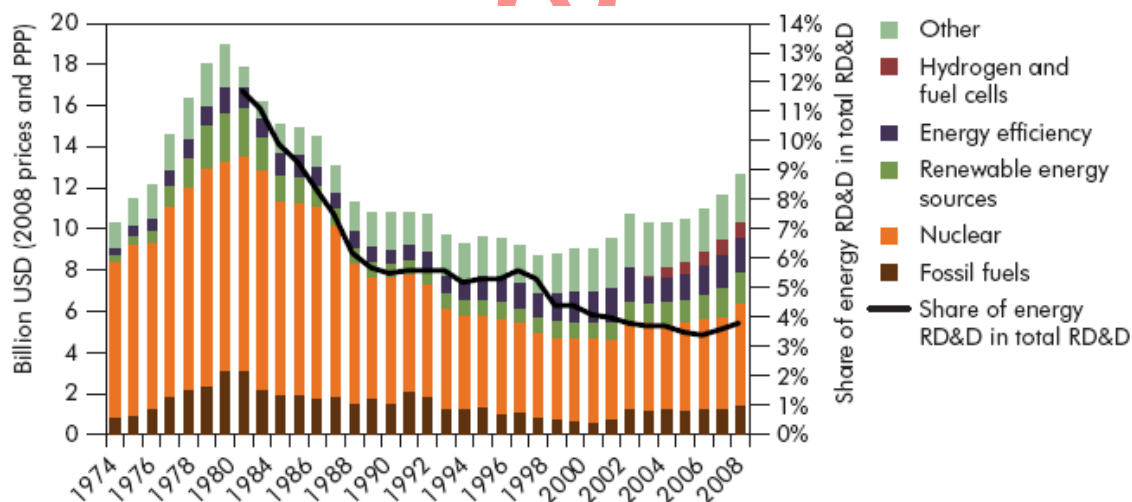
همچنین سهم انواع سوخت مورد استفاده در پیل سوختی در سال ۲۰۰۸ در تصویر ۳ ارائه شده است. با توجه به این شکل متانول و هیدروژن نزدیک به ۹۰٪ سوخت مصرفی انواع پیل سوختی را به خود اختصاص داده اند [3].



شکل ۳: سهم انواع سوخت مصرفی در پیل سوختی در سال ۲۰۰۸

هزینه های تحقیق و توسعه فناوری های کم کربن

بودجه های دولتی تحقیق و توسعه در کشورهای عضو *IEA* طی سال های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ از ۱۹ میلیارد دلار آمریکا در سال ۱۹۸۰ به ۸ میلیارد دلار در سال ۱۹۹۷ کاهش یافته است. این کاهش عمدتاً به دلیل مشکلات صنعت هسته ای و کاهش قیمت نفت طی سال های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۲ در میزان سرمایه گذاری در بخش فناوری های کم کربن روی داده است. روند بودجه های دولتی از سال ۱۹۹۸ به بعد به ویژه در بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ در بخش هزینه های تحقیق و توسعه بخش انرژی شروع به افزایش نموده است. این هزینه ها در سال ۲۰۰۸ حدود ۱۲ میلیارد دلار آمریکا بوده است. سهم هزینه های تحقیق و توسعه بخش انرژی در کل هزینه های تحقیق و توسعه کشورهای عضو *IEA* از ۱۱٪ در سال ۱۹۸۵ به ۳٪ در سال ۲۰۰۶ کاهش یافته است. این روند پس از سال ۲۰۰۶ دوباره افزایش داشته است (شکل ۴). همچنین با توجه به این شکل هزینه های تحقیق و توسعه فناوری پیل سوختی و هیدروژن تا سال ۲۰۰۸ از روند افزایشی برخوردار بوده است [4].

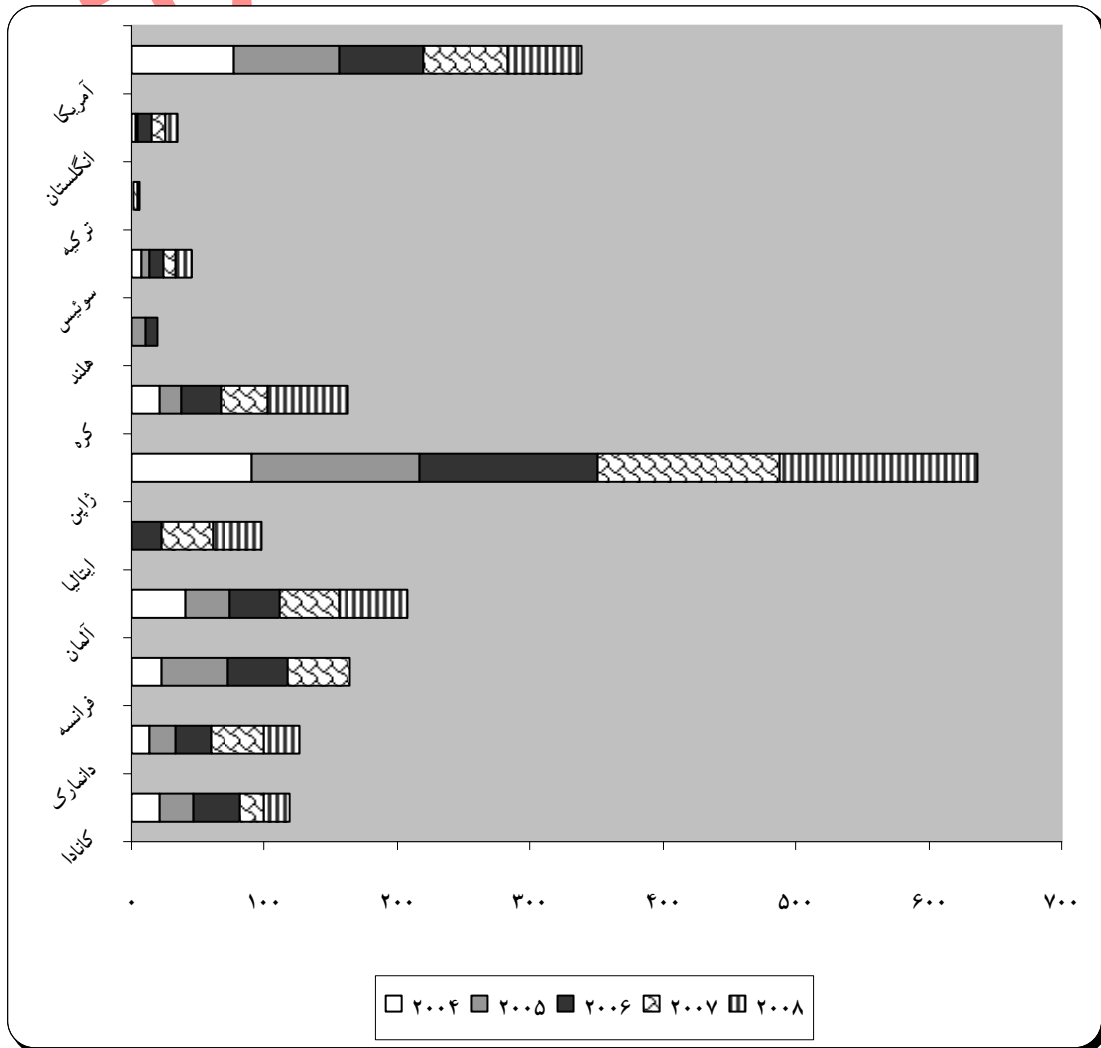


Note: PPP = purchasing power parity.

شکل ۴: هزینه های دولتی تحقیق و توسعه در کشورهای عضو *IEA* طی سال های ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۸

و سهم هزینه های تحقیق و توسعه بخش انرژی

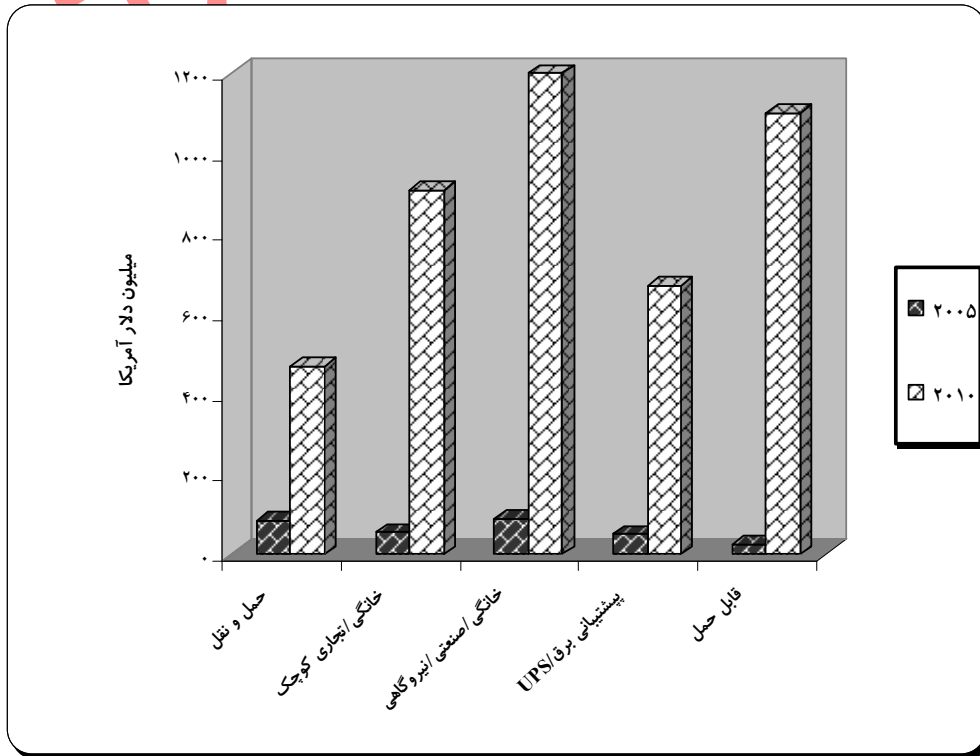
همچنین در تصویر ۵ هزینه های تحقیق و توسعه برخی کشورها در فناوری پیل سوختی طی سال های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ آورده شده است. نکته قابل توجه کاهش میزان سرمایه گذاری در برخی کشورها مانند هلند، فرانسه و .. و افزایش سرمایه گذاری در کشورهایی نظیر کره و ژاپن است [5].



شکل ۵: روند تخصیص بودجه های تحقیق و توسعه به فناوری پیل سوختی طی سال های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸

(میلیون دلار آمریکا)

میزان فروش پیل های سوختی بر اساس نوع کاربرد در سال های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ در تصویر ۶ آورده شده است که بیانگر روند افزایشی در کلیه کاربردها (ثابت و حمل و نقل) بوده است. بیشترین افزایش در کاربرد پرتابل پیل سوختی بوده است.



شکل ۶: میزان فروش پیل های سوختی در جهان در سال های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ بر اساس نوع کاربرد (میلیون دلار آمریکا)

بر اساس مطالعه ای که توسط موسسه EPRI صورت گرفته هزینه تولید برق از انواع پیل سوختی به شرح جدول ذیل برآورد گردیده است [6].

جدول ۲: برآورد هزینه تولید برق از انواع پیل سوختی

راندمان تولید برق (%)	هزینه نصب (US/kW$)	اندازه (kW)	نوع پیل
۴۰-۶۰	۵۰۰-۱۲۵۰	۱-۱۰۰	AFC
۴۰-۵۰	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۲۰۰-۱۰۰۰	PAFC
۳۵-۴۵	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱-۷۵۰	PEMFC
۵۰-۶۰	۱۲۵۰-۱۷۱۵	۲۵۰-۳۰۰۰	MCFC
۴۵-۵۵	۸۰۰-۱۵۰۰	۱-۳۰۰	SOFC
۶۰-۷۰	۶۶۰-۱۶۰۰	۳۰۰-۳۰۰۰	SOFC/MCFC-GT

بررسی روند توسعه فناوری های پیل سوختی

چگونگی روند توسعه فناوری پیل سوختی در یک کشور پیشرو در این بخش مورد بررسی خواهد گرفت. کشور هلند از دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ طرح های توسعه پیل سوختی را آغاز نمود اما این طرح ها بیشتر در قالب طرح های تحقیق و توسعه باقی ماندند. در واقع ابتدای دهه ۱۹۸۰ را می توان آغازگر روند توسعه فناوری پیل سوختی در این کشور محسوب کرد.

- دوره احیای مجدد فناوری (سال های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۱): در اثر بحران نفتی، تشکیل نهضت های زیست محیطی و تحولات آمریکابرنامه های ملی پیل سوختی تداوم یافته و وزارت انرژی و وزارت کشاورزی این کشور تأسیس یک واحد پایلوت با توان ۲۰۰ تا ۳۰۰ وات را در دستور کار خود قرار می دهند. از آثار این دوره به شکل گرفتن شبکه کوچکی از دانشمندان و توسعه دهندگان فناوری اشاره نمود که مهمترین نتیجه آن ایجاد پایگاه دانش برای نسل دوم فناوری پیل سوختی است.

- دوره فشار فناوری (سال های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۸): با تغییر نگاه جهانی به فناوری پیل سوختی و کاهش بودجه های پژوهشی دولت، توسعه نسل سوم فناوری پیل سوختی شدت گرفته و تلاش هایی جهت بهبود فناوری و کاهش هزینه های آن انجام می گیرد. مهمترین آثار این دوره افزایش دانش موجود است که منجر به توسعه پایگاه دانش نه بر اساس مطالعات امکان سنجی و شناخت بازار بلکه بر اساس پروژه های پایلوت می گردد.
- دوره سازماندهی مجدد (سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳): با اهمیت یافتن سیاست های زیست محیطی در کشورهای مختلف به ویژه آمریکا، خودروسازان توسعه خودروهای پیل سوختی را در دستور کار قرار داده و در نتیجه بودجه های پژوهشی در این مقطع به شدت افزایش می یابند. با ورود طیف گسترده ای از شرکت ها به بازار پیل سوختی، کار آفرینی نیز شدت می یابد.
- دوره رونق بازار (سال های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷): با افزایش حمایت های اتحادیه اروپا، افزایش قیمت نفت و بحث تغییر اقلیم منجر به تلاش هایی جهت کاهش هزینه های فناوری پیل سوختی گردید. این تلاش ها به همراه عوامل بیرونی منجر به افزایش انگیزه دولت جهت ورود به این فعالیت ها گردید تا جایی که خود به عنوان یکی از نقش آفرینان این بازار مطرح گردید. به این ترتیب با افزایش تقاضا روند توسعه فناوری از شدت بیشتری برخوردار می گردد [7].

بررسی منحنی یادگیری پیل سوختی

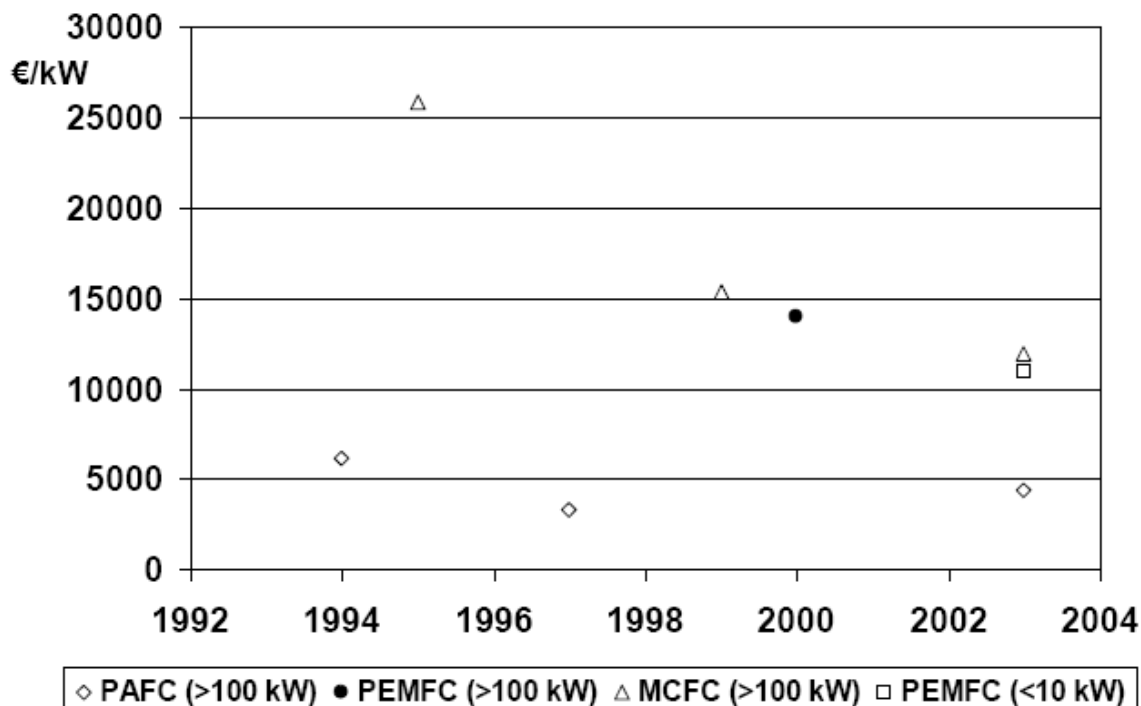
در بازار انرژی پیل سوختی فناوری در حال پیدایش محسوب می گردد که دارای پتانسیل زیادی در زمینه کاهش هزینه سوخت و انتشار گازهای گلخانه ای است که جهت تجاری شدن نیازمند کاهش

هزینه ها می باشد. تا کنون تعداد معدودی از پیل سوختی به دلیل هزینه های بالا (نیاز به نیروی کار متخصص و بودجه های بالای تحقیق و توسعه) در جهان به فروش رسیده است [8].

در حال حاضر تنها پیل سوختی تجاری شده پیل *PAFC* می باشد که در برخی از صنایع خاص کاربرد دارد. تا کنون تجربیات در مورد پیل سوختی محدود و هزینه های آن بالا بوده است که جهت تجاری سازی این هزینه ها باید کاهش یابد اما در چه زمانی و با چه سرعتی؟

مطالعاتی با استفاده از منحنی یادگیری در مورد تجزیه تحلیل چگونگی کاهش هزینه های پیل سوختی در آینده انجام گرفته است.

Schmid و *Krewitt* در سال ۲۰۰۴ اطلاعاتی در خصوص هزینه و قیمت پیل سوختی در کاربردهای ثابت و متحرک (اتوموبیل سازی) ارائه نموده اند. این دو خاطر نشان نموده اند که ثبت اطلاعات در مورد انواع پیل سوختی در گذشته کمتر صورت گرفته و بسیار محدود انجام می شده است. در مورد پیل های سوختی کوچک (کمتر از ۵ کیلووات) با کاربرد ثابت اطلاعات با عدم قطعیت های زیادی روبرو می باشد. در مورد پیل های بزرگ (از ۲۰۰ کیلووات تا ۵ مگاوات) با کاربرد ثابت نیز داده های هزینه دارای پراکندگی زیادی بوده و از ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ یورو بر کیلووات متغیرند. بنابراین استفاده از منحنی یادگیری در این زمینه بسیار مشکل خواهد بود. اما این منحنی یادگیری بر اساس داده های هزینه مربوط به دو نوع پیل *PEMFC* و *MCFC* در شکل ۷ (کاهش هزینه به عنوان تابعی از ظرفیت جمعی نصب شده) ارائه گردیده است.



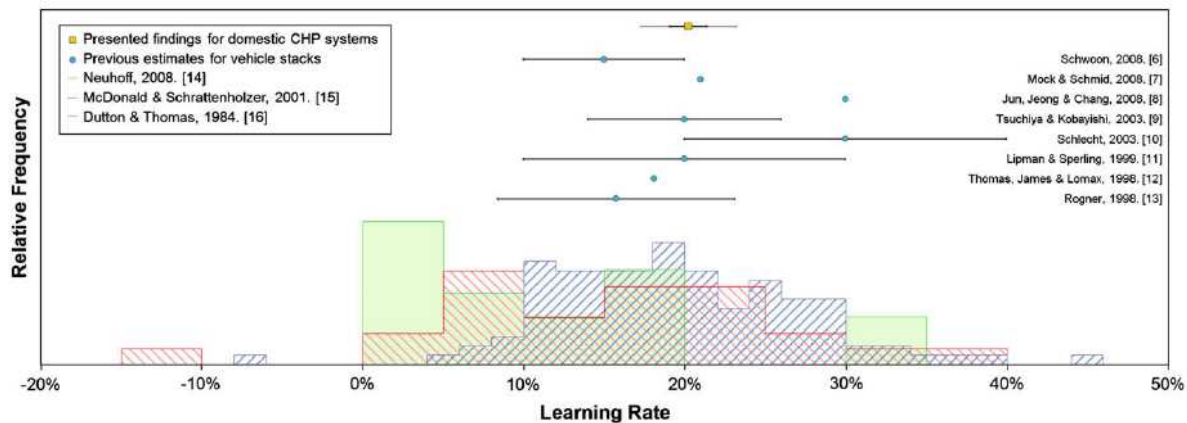
شکل ۷: روند هزینه های تولید پیل سوختی در جهان تا سال ۲۰۰۴

تصویر فوق بیانگر کاهش هزینه از تقریباً ۲۵۰۰۰ یورو بر کیلووات به ۱۰۰۰۰ یورو بر کیلووات از ۱۰۰۰ کیلووات ظرفیت نصب شده به ۱۶۰۰۰ کیلووات نصب شده طی این دوره زمانی بوده است. از این داده ها نرخ پیشرفت استخراج نگرديده است.

مطالعات دیگری نیز در زمینه تجزیه تحلیل هزینه های پیل سوختی با استفاده از منحنی یادگیری انجام گرفته است. *Lipman* و *Sperling* در سال ۱۹۹۹ هزینه و قیمت پیل سوختی را مورد بحث قرار داده و نرخ پیشرفتی برابر ۷۵٪ تا ۸۵٪ را برای این فناوری پیشنهاد نموده اند. پیل سوختی فناوری نوینی بوده و بنابراین داده های زیادی در مورد روند گذشته هزینه های آن در دست نیست. اما با وجود پراکندگی زیاد داده ها در مطالعه ای که توسط اتحادیه اروپا انجام شده، نرخ پیشرفتی برابر ۷۰٪ تا ۹۰٪ برای این

فناوری مفروض گردیده که با توجه به سایر مطالعات ارقام ۷۵٪ تا ۸۵٪ مورد تأیید قرار گرفته است [9].

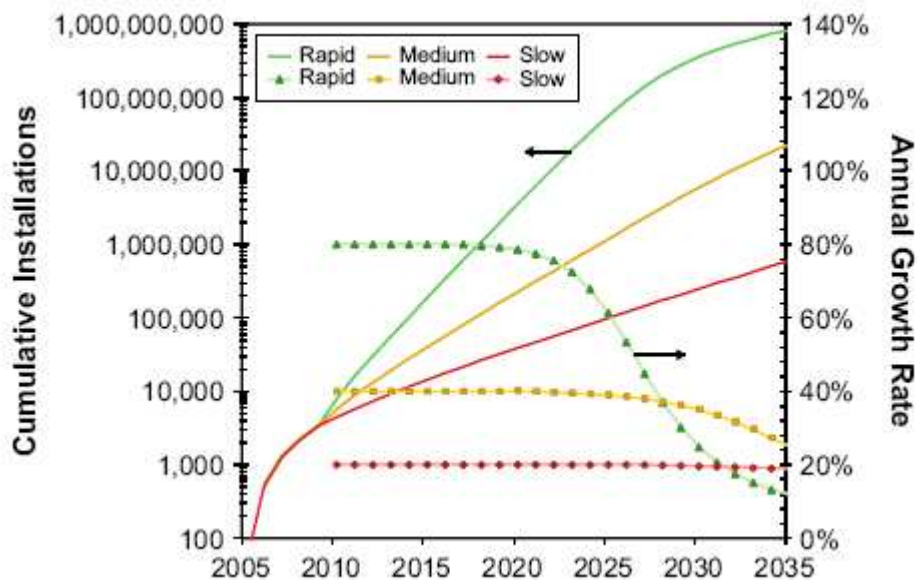
در مطالعه دیگری، منحنی یادگیری برای پیل های سوختی با کاربرد *CHP* های خانگی بر اساس قیمت های قبلی در کشور ژاپن انجام گرفته است. این داده ها بر اساس پیل های سوختی نوع *PEM* که طی سال های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۸ با حمایت های دولتی در خانه های شهروندان ژاپنی نصب گردیده جمع آوری شده است. در اوایل سال ۲۰۰۹ متوسط قیمت یک سامانه *CHP* خانگی ۰.۷ تا ۱ کیلووات حدود ۲۳۰۰۰ یورو و میزان تولید تجمعی حدود ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ بوده است که میزان کاهش قیمت مشاهده شده در دامنه ۱۹.۱٪ تا ۲۱.۴٪ به ازای هر دو برابر شدن تعداد تولید بوده است. در این مطالعه مروری بر مطالعات گذشته برآورد هزینه فناوری پیل سوختی انجام گرفته که در دامنه ۱۴ تا ۲۸٪ قرار می گیرد (شکل ۸).



شکل ۸: مقایسه نرخ یادگیری پیل سوختی *PEMFC* در مطالعات گذشته و مقایسه با هیستوگرام نرخ یادگیری مشاهده

شده در سایر فناوری های انرژی

در همین مطالعه به بررسی نرخ رشد این فناوری نیز پرداخته شده است. منحنی یادگیری کاهش هزینه فناوری با توجه به ظرفیت نصب شده را مد نظر قرار می دهد اما نرخ رشد میزان کاهش هزینه در زمان را بررسی می کند. به همین منظور در این مطالعه سه سناریو کند (تخصیص سهم ۱۰٪ از بازار انرژی ژاپن به فناوری پیل سوختی)، متوسط (تخصیص سهم ۱۰٪ از بازار انرژی اروپا به فناوری پیل سوختی) و سریع (تخصیص سهم ۵۰٪ از بازار انرژی جهان به فناوری پیل سوختی) برای این فناوری فرض شده است (شکل ۹) [7].



شکل ۹: پیش بینی نرخ رشد و میزان ظرفیت تجمعی نصب شده پیل سوختی در جهان در آینده

برخی محققین معتقدند فناوری های مدولار (متشکل از واحدهای استاندارد) همانند پیل های سوختی، نسبت به سایر فناوری های انرژی در آینده نرخ یادگیری بیشتری را تجربه خواهند نمود. اما در عین حال بر این باورند که این نرخ تا حد ۳۰٪ باقی مانده و از آن فراتر نخواهد رفت [10].

به طور کلی در مطالعات مختلف، نرخ یادگیری فناوری پیل سوختی به شرح جدول ۳ برآورد گردیده است.

جدول ۳: نرخ یادگیری فناوری پیل سوختی در مطالعات مختلف [11]

منبع	نرخ یادگیری (%)	هزینه (us\$/kW)	تولید تجمعی
Rogner (1998)	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰	۲۵۰۰، ۴۵۰۰، ۱۰۰۰۰	۲ مگاوات
Lipman and Sperling (1999)	۱۵، ۲۰، ۲۵	۱۸۰۰، ۲۰۰۰، ۲۲۰۰	۵ مگاوات
Gritsevskiy and Nakicenovic (2000)	۲۰	—	۱۰ مگاوات
Lovins (2003)	۲۰-۳۰	۱۰۰-۳۰۰ تا سال ۲۰۱۰	—
Schlecht (2003)	۲۰، ۳۰، ۴۰	۱۲۹-۵۱۶	۱۰۰۰۰ دستگاه
Sorensen et al (2004)	۱۰، ۲۰	۳۹۲ (یورو بر کیلووات)	۵۰۰۰۰ دستگاه
Tsuchiya and Kobayashi (2004)	۲۶	۱۶۷	۵۰۰۰۰ دستگاه

نتیجه گیری

پیل سختی همانند سایر فناوری های در حال پیدایش نیازمند سرمایه گذاری بلندمدت می باشد. کاهش انتشار دی اکسید کربن و امنیت انرژی منافی هستند که با هزینه رقابتی و به فوریت در دسترس قرار

نخواهند گرفت. لازم به ذکر است که تخصیص بودجه های تحقیق و توسعه نقش قابل توجهی در

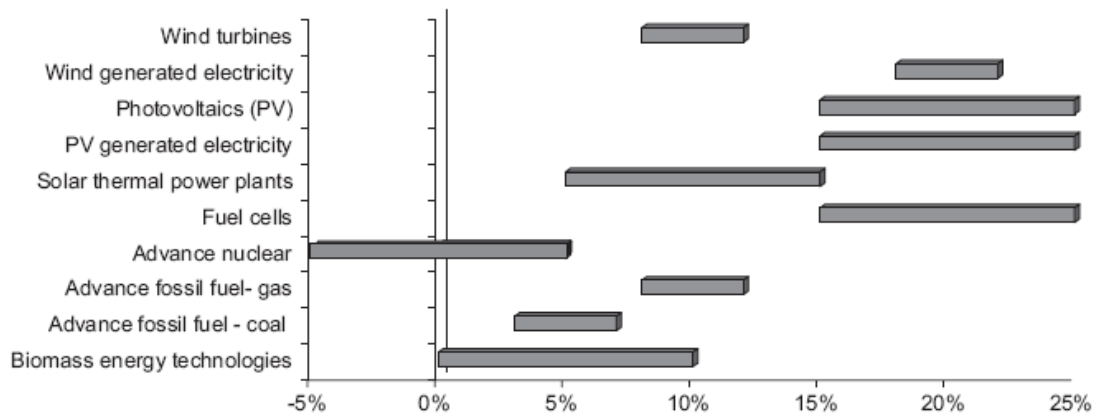
پیشرفت این فناوری ایفاء کرده و دارای اثرات زیادی بر کاهش هزینه های آن خواهد بود [12]

در تصویر ۱۰ دامنه ای از نرخ یادگیری انواع فناوری های تولید برق که حاصل مطالعه ای در اتحادیه

اروپا می باشد جهت مقایسه درج گردیده است. لازم به ذکر است که چگونگی روند هزینه ها در هر

فناوری تابعی از ظرفیت تجمعی نصب شده (کیلووات) بوده است. در این مطالعه نرخ یادگیری فناوری

پیل سوختی تا افق ۲۰۵۰ بین ۱۵ تا ۳۰٪ برآورد گردیده است [13].



شکل 10: مقایسه نرخ یادگیری انواع فناوری های تولید برق در جهان تا افق ۲۰۵۰

فهرست منابع و مراجع مورد استفاده

۱. سانا، کمیته راهبردی پیل سوختی، نشریه هیدروژن و پیل سوختی سال دوم، شماره ۱۱، مرداد ۱۳۸۶
2. <http://www.fcc.gov.ir>
3. Pauli Jumppanen, 2009, market trends for fuel cells, Tekes Annual Fuel Cell – Programme Seminar
4. IEA, 2010, Energy technology perspectives
5. www.iea.org
6. Weaver, Graham, 2002, World fuel cell, Elsevier publication
۷. سانا، کمیته راهبردی پیل سوختی، نشریه هیدروژن و پیل سوختی سال پنجم، شماره ۴۷، مرداد ۱۳۸۹
8. Staffell, R.J Green, Estimating future prices for stationary fuel cells with empirically derived experience curves, International journal of hydrogen energy 34 (2009) 5617-5628, Elsevier
9. Cost development-an analysis based on experience curves, 2006, Lund University (NEEDS).
10. Iain Staffell, 2009, FUEL CELLS FOR DOMESTIC HEAT AND POWER: ARE THEY WORTH IT?, a thesis submitted to The University of Birmingham for the degree of Doctor of Philosophy
11. Malte Schwoon, 2006, Learning-by-doing, Learning Spillovers and the Diffusion of Fuel Cell Vehicles, International Max Planck Research School on Earth System Modelling, Hamburg, Germany, Research Unit Sustainability and Global Change, Centre for Marine and Atmospheric Sciences, Hamburg University, Germany
12. K. schoots, G.J.Kramer, B.C.C.vander Zwaan, 2010, Technology learning for fuel cells: An assessment of past and potential cost reductions, a Energy research Centre of the Netherlands (ECN), Policy Studies Department, The Netherlands, Energy policy 38 (2010) 2887-2897
13. Neij, L, 2008, Cost development of future technologies for power generation—A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments, Energy policy 36 (2008) 2200-2211