



وزارت نیرو

معاونت امور برق و انرژی

دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی

بررسی مبحثی یادگیری فناوری برق خورشیدی

(فتوولتائیک)

گروه نوآوری و توسعه فناوری های برق و انرژی

مرداد ۱۳۸۹

مقدمه

حرکت به سوی سیستم های پایدار انرژی، نیازمند توسعه و به کارگیری فناوری های نوین و پیشرفته خواهد بود. غالباً چنین فناوری هایی نسبت به فناوری های رایج گران تر بوده و جهت به کارگیری نیازمند کاهش هزینه خواهند بود. به منظور تصمیم گیری برای سرمایه گذاری های آینده و طراحی سامانه های انرژی، تجزیه تحلیل فناوری ها و بررسی روند هزینه ها مورد نیاز می باشد.

منحنی یادگیری ابزاری جهت تجزیه تحلیل روند تغییرات هزینه در آینده به شمار می رود. به طور کلی منحنی یادگیری با تجزیه تحلیل روند گذشته تغییرات هزینه انواع فناوری ها به تخمین هزینه این فناوری ها در آینده می پردازد. کاربرد این ابزار در بحث فناوری های انرژی به تدریج افزایش یافته و امروزه در مدل های پیچیده انرژی جهت تجزیه تحلیل هزینه ها از آن استفاده می گردد.

از مزایای منحنی یادگیری می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- نرخ تقریبی کاهش هزینه های انواع فناوری های انرژی را با این روش می توان برآورد نمود.
- تلفیق منحنی های یادگیری با مدل های انرژی، امکان تلفیق تغییر فناوری با تجزیه تحلیل سیستم های انرژی و طراحی ستارو را فراهم نموده است.
- استفاده از این منحنی ها به طور واضح و روشن نشان داد که به منظور کاهش هزینه ها یک بازار اولیه مورد نیاز خواهد بود (این بازار اوایه فرصت یادگیری به ویژه یادگیری توسط انجام کار^۱ و یادگیری توسط به کارگیری^۲ را فراهم کرده که منجر به کاهش هزینه ها می گردد).

^۱ *Learning by doing*: یادگیری با انجام کار یا به اختصار یادگیری، پدیده ای است که از لحظه کاربرد فناوری آغاز و پس از گذر از مرحله بلوغ خاتمه می یابد.

^۲ *Learning by using*: یادگیری توسط به کارگیری فناوری که منجر به افزایش اثربخشی نیروی کار، تخصصی شدن کار و روش های بهبود می گردد.

از معایب منحنی های یادگیری می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- تفسیر منحنی های یادگیری به عنوان ابزار برسی روند هزینه ها در طول زمان مورد بررسی قرار می گیرد. در گذشته از این منحنی ها جهت تجزیه تحلیل کاهش ساعت کار نیروی انسانی به ازای هر واحد کالای استاندارد تولید شده در یک کارخانه استفاده می شد در حالی که امروزه از این منحنی ها جهت تجزیه تحلیل هزینه ها یا پیش بینی هزینه ها در سطح ملی یا جهانی استفاده می شود که این امر منجر به ایجاد عدم قطعیت و تفاوت هایی در نتایج حاصله می گردد که غالباً در تجزیه تحلیل منحنی های یادگیری مورد توجه قرار نمی گیرد.
- عوامل مؤثر بر کاهش هزینه ها با عدم قطعیت همراه است.
- منحنی یادگیری ابزاری جهت پیش بینی بلندمدت روند تغییرات هزینه ها می باشد [1].

فناوری های برق خورشیدی

فناوریهای حرارتی خورشیدی به دو بخش نیروگاههای حرارتی خورشیدی و کاربردهای غیر نیروگاهی سیستمهای خورشیدی تقسیم بندی می شوند.

نیروگاه های خورشیدی بر اساس نوع متمرکز کننده ها به سه دسته تقسیم می شوند:

الف: نیروگاه سهموی خطی¹، نیروگاههای حرارتی خورشیدی از نوع سیستم کلکتور سهموی خطی شامل ردیفهای موازی و طولانی از متمرکز کننده ها میباشد. بخش متمرکز کننده شامل سطوح انعکاسی سهموی است که از جنس آینه های شیشه ای میباشد و روی یک سازه نگهدارنده قرار میگیرند. دریافت کننده انرژی شامل لوله های جاذب استوانه ای شکل هستند که به وسیله شیشه پیرکس

¹ Parabolic Trough Concentrator

پوشانده میشوند و در طول خط کانونی قرار میگیرند. بخش دریافت کننده در قسمتهای انتهایی روی دو تکیه گاه قرار گرفته اند که این مجموعه روی تیرکهای اصلی سازه سوار است.

ب: نیروگاه دریافت کننده مرکزی¹، نیروگاه حرارتی خورشیدی از نوع برج دریافت کننده مرکزی با متمرکز نمودن پرتوهای تابش خورشید روی برج دریافت کننده انرژی الکتریکی تولید میکنند. این سیستم از مجموعه ای از آینه ها که هر یک بطور جداگانه خورشید را ردیابی میکنند تشکیل شده تعداد این آینه ها در یک نیروگاه به صدها و هزاران عدد میرسد که هلیوستات نامیده میشوند. سطوح متمرکز کننده طوری تنظیم میشود که همواره پرتوها را روی دریافت کننده ثابتی که همان برج مرکزی است منعکس کنند.

ج: نیروگاه دیش/استرلینگ، موتورهای استرلینگ از چرخه استرلینگ استفاده می کنند که با چرخه های استفاده شده در موتورهای احتراق داخلی متفاوت است. چرخه استرلینگ از یک منبع حرارتی خارجی که مانند بنزین، انرژی خورشیدی یا گازهای بیومس استفاده می کند و هیچ احتراقی داخل سیلندرها موتور رخ نمی دهد. برای تامین انرژی مورد نیاز این موتور از یک دیش منعکس کننده استفاده می شود. این دیش انرژی حرارتی خورشید را مستقیماً به روی موتور منعکس می کند و موتور شروع به تولید برق می کند.

از انرژی حرارتی خورشید علاوه بر استفاده نیروگاهی، می توان در گرمایش آب مصرفی (آب گرمکنهای خورشیدی برای منازل، ساختمانها، کارخانجات و استخرها)، گرمایش فضای داخلی ساختمانها و خشک کن ها به صورت صنعتی، تجاری و خانگی استفاده کرد [2].

¹ Power Tower

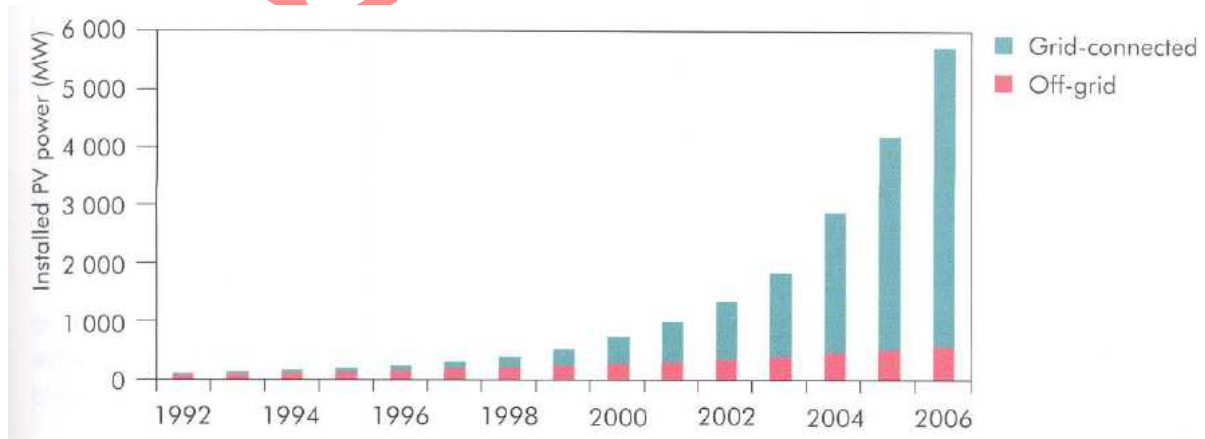
سامانه فتوولتائیک

به پدیده‌ای که در اثر تابش نور بدون استفاده از مکانیزم‌های محرک، الکتروسیته تولید نماید پدیده فتوولتائیک و به هر سیستمی که از این پدیده‌ها استفاده کند سیستم فتوولتائیک گفته می‌شود. سیستم‌های فتوولتائیک یکی از پر مصرف‌ترین کاربردهای انرژی‌های نو می‌باشند و تاکنون سیستم‌های گوناگونی با ظرفیت‌های مختلف (0.5 وات تا چند مگاوات) در سراسر جهان نصب و راه اندازی شده‌است و با توجه به قابلیت اطمینان و عملکرد این سیستم‌ها هر روزه بر تعداد متقاضیان آنها افزوده می‌شود. از سری و موازی کردن سلولهای آفتابی می‌توان به جریان و ولتاژ قابل قبولی دست یافت. در نتیجه به یک مجموعه از سلولهای سری و موازی شده پنل فتوولتائیک گفته می‌شود [3].

وضعیت فعلی و پیش بینی بازار فناوری فتوولتائیک

تا اواسط دهه ۱۹۹۰ اکثر سامانه های فتوولتائیک به صورت خارج از شبکه بوده و به عنوان راهکاری جهت تأمین برق مناطق دورافتاده از آن استفاده می‌شده است. اما در حال حاضر کاربرد سامانه های متصل به شبکه به منظور تولید پراکنده به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. اغلب این سامانه ها به صورت تلفیق با مصالح ساختمانی (به عنوان نمای خارجی، سقف، دیوار و ...) کاربرد داشته اند. سامانه های فتوولتائیک خارج شبکه با کاربرد در بخش حمل و نقل، پمپاژ آب و تأمین برق مناطق روستایی بیش از ۱۰٪ کل بازار فتوولتائیک را به خود اختصاص داده است. چنین کاربردهایی در مناطق دورافتاده از اهمیت زیادی برخوردار بوده و احتمالاً در کشورهای در حال توسعه به روند رشد خود ادامه خواهند داد.

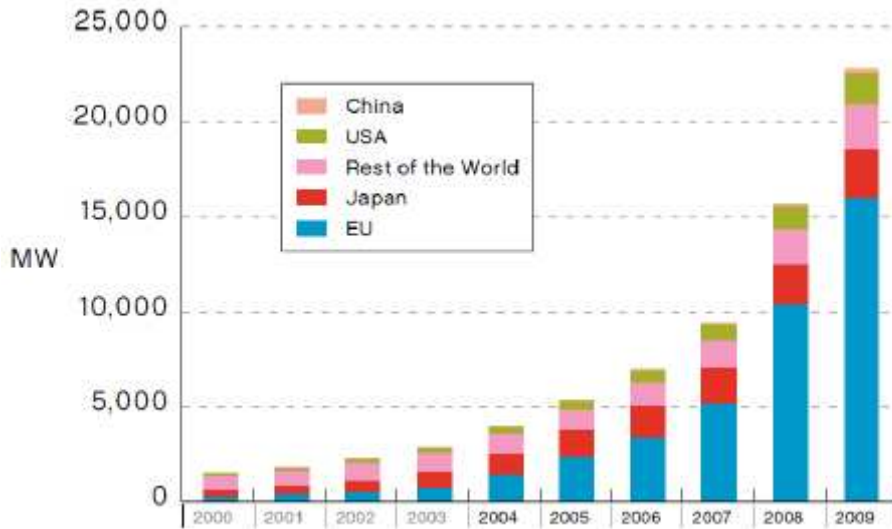
بر اساس مطالعه آژانس بین المللی انرژی، کل ظرفیت نصب شده فتوولتائیک در کشورهای عضو *IEA* تا پایان سال ۲۰۰۶ به ۵.۷ گیگاوات بالغ گردیده که نسبت به سال ۲۰۰۵، ۳۶٪ افزایش نشان می دهد. این رقم ۸۷٪ کل ظرفیت نصب شده در جهان (۶.۶ گیگاوات) را تشکیل می دهد. ۹۰٪ این ظرفیت نصب شده را سامانه های متصل به شبکه و ۹۳٪ آن سامانه های فتوولتائیک تلفیقی با ساختمان تشکیل می دهد (شکل ۱).



شکل ۱: ظرفیت نصب شده فتوولتائیک متصل به شبکه و خارج از شبکه در کشورهای عضو *IEA*

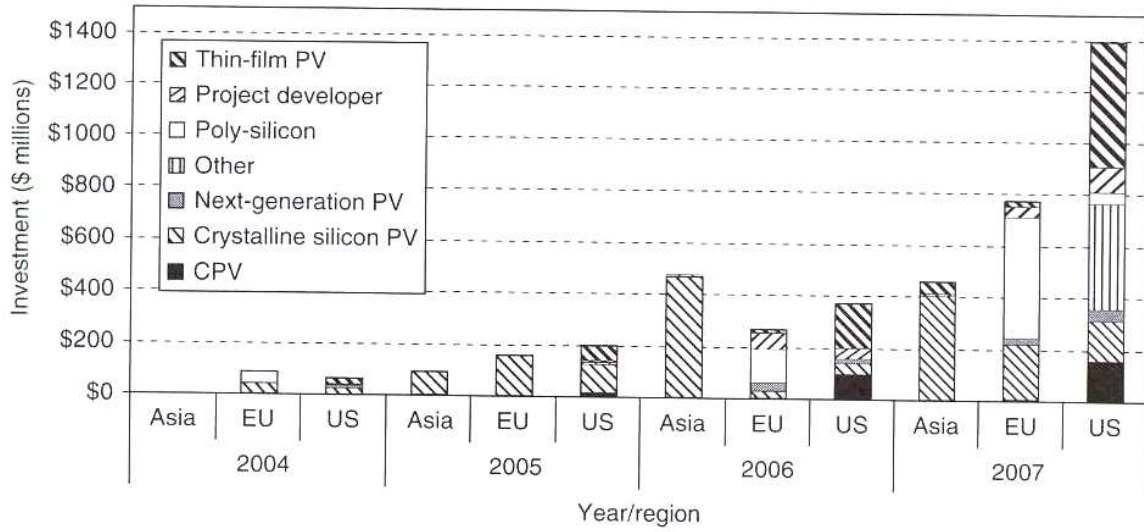
سه کشور آلمان، ژاپن و آمریکا ۷۰٪ از ظرفیت نصب شده جهان را به خود اختصاص داده اند. همچنین این سه کشور بزرگترین تولیدکنندگان فناوری فتوولتائیک بوده و ۶۳٪ از تولید این فناوری در این کشورها صورت می گیرد. پیش بینی می گردد در آینده نزدیک کشورهای دارای اقتصاد در حال پیدایش به خصوص هند و چین هم در زمینه ظرفیت نصب شده و هم در زمینه تولید از بازیگران مهم در زمینه فتوولتائیک محسوب گردند (شکل ۲). چین هم اکنون (تا پایان سال ۲۰۰۶) نیز سهم ۱۵٪ از

بازار جهانی تولید سلول های فتولتائیک را به خود اختصاص داده و یکی از تولیدکنندگان بزرگ در این زمینه می باشد [4].



شکل ۲: ظرفیت نصب شده فتولتائیک در جهان

میزان سرمایه گذاری در فناوری فتولتائیک طی سال های اخیر به شدت افزایش یافته است و این سرمایه گذاری ها عامل بالقوه ای جهت کاهش هزینه ها و افزایش ظرفیت تولید این فناوری طی سال های آتی به شمار می رود (شکل ۳) [5].

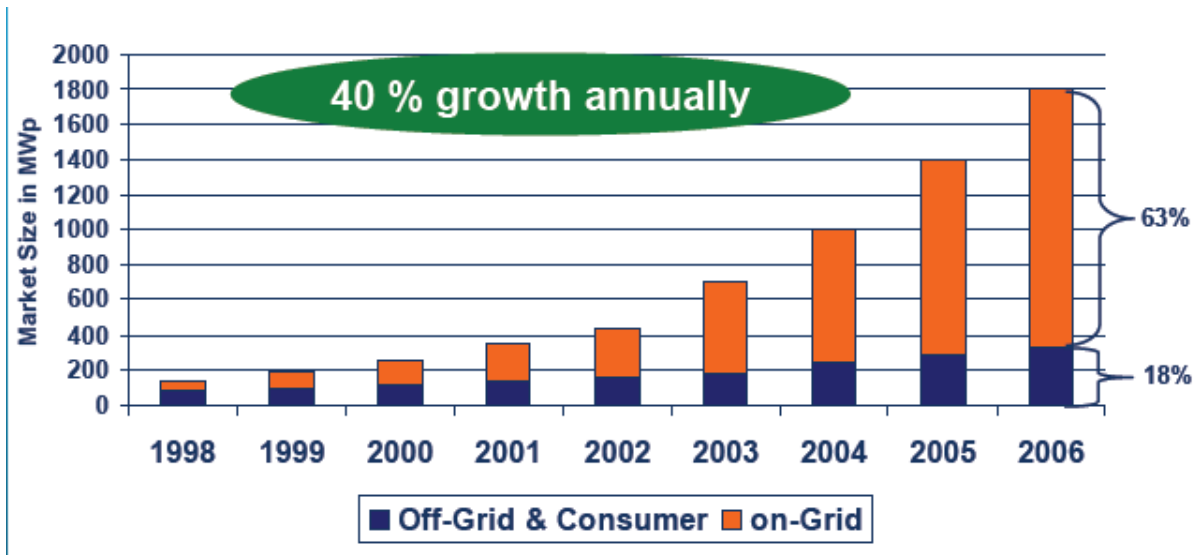


شکل ۳: میزان سرمایه گذاری خصوصی در فناوری های خورشیدی در سطح جهان و به تفکیک منطقه طی سال های

۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷

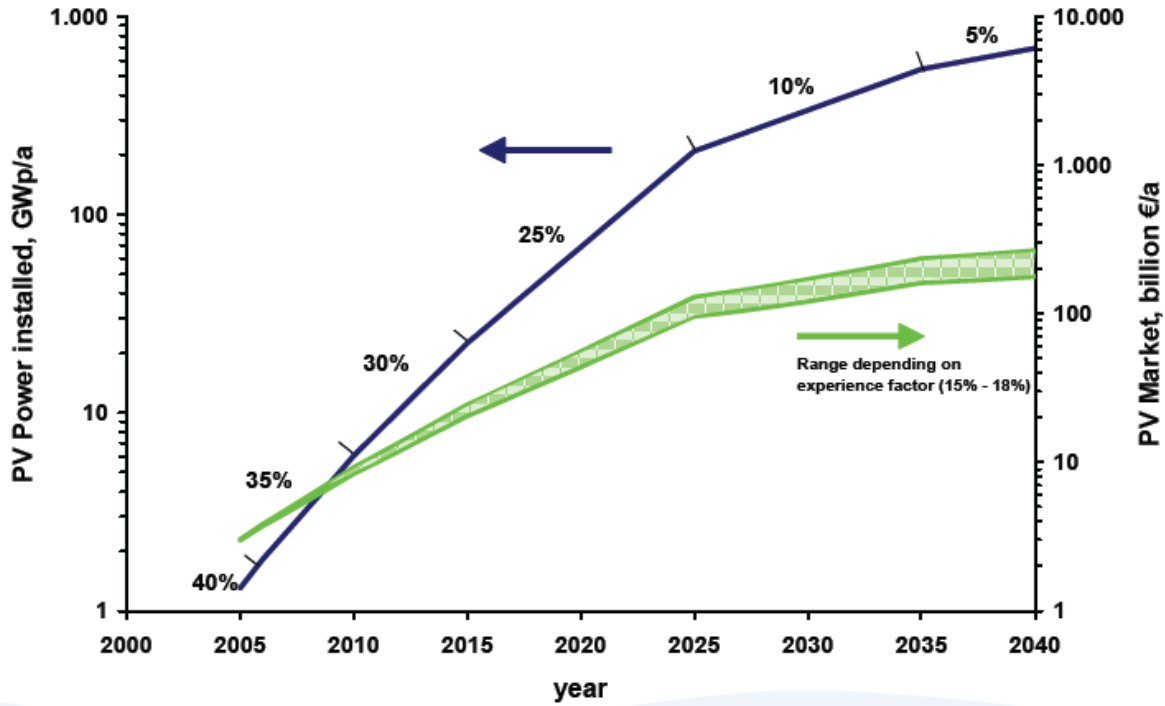
شکل ۴ نیز میزان رشد استفاده از فناوری فتوولتائیک در جهان را نشان می دهد. نرخ رشد این فناوری

طی سال های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۶ توسط آژانس بین المللی انرژی حدود ۴۰٪ در سال برآورد شده است.



شکل ۴: بازار جهانی فناوری فتوولتائیک (بر اساس اتصال به شبکه یا خارج از شبکه)

همچنین رشد این فناوری تا پایان سال ۲۰۴۰ به صورت شکل ذیل پیش بینی می گردد [6].



شکل ۵: پیش بینی رشد فناوری برق خورشیدی (فتوولتائیک) در جهان

منمنی یادگیری فناوری فتوولتائیک در مطالعات مختلف

انواع مختلفی از سامانه های فتوولتائیک طی دهه های اخیر توسعه یافته اند. عمده ترین این سامانه ها عبارتند از: سامانه های خانگی خارج از شبکه، سامانه های غیرخانگی خارج از شبکه، سامانه های فتوولتائیک پراکنده متصل به شبکه و سامانه های متمرکز متصل به شبکه که سامانه های متصل به شبکه که در بازار از فراوانی بیشتری برخوردارند. بر اساس گزارش آژانس بین المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۰۳ حدود ۶۰٪ از ظرفیت تجمعی نصب شده فتوولتائیک در جهان سامانه فتوولتائیک متصل به

شبکه ساختمانی^۱ (که به شکل سقف، دیوار، سایبان، نمای خارجی و ... در ساختمان ها کاربرد دارند) بوده است. پیش بینی ها حاکی از آن است که تقاضا برای چنین سامانه هایی در حال افزایش است این در حالی است که تقاضا برای سامانه های متمرکز به جهت دارا بودن هزینه های بالا و نیاز به مقدار زیاد زمین، محدود شده است.

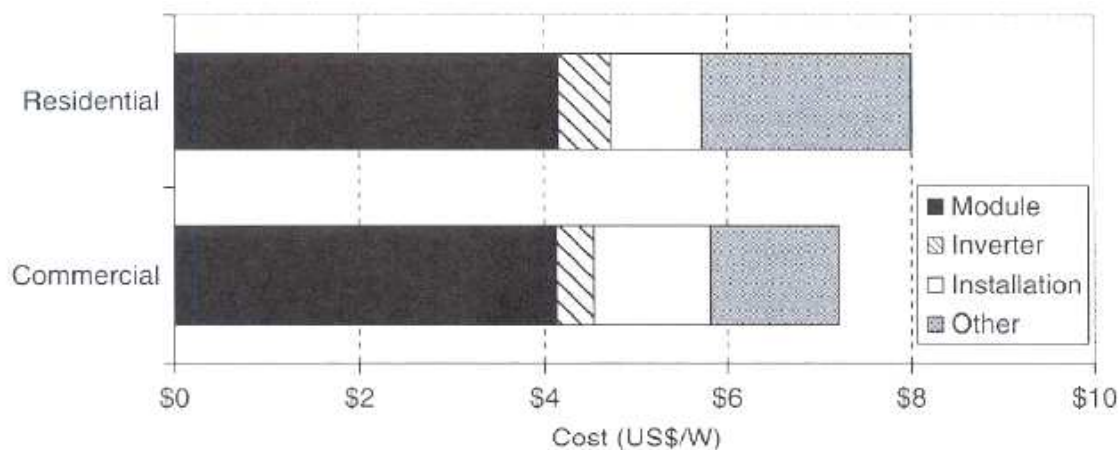
سامانه های فتوولتائیک از مدول (به عنوان مثال ترکیبی از سلول های خورشیدی که نور خورشید را به انرژی تبدیل می کند) و BOS^۲ (مشمول بر سایر مؤلفه ها از قبیل اتصال الکتریکی و سایر سازه ها) تشکیل شده است.

بیش از ۹۰٪ مدول های امروزی از جنس سیلیکون کریستال شده می باشد. در حال حاضر مدول های لایه نازک فتوولتائیک نیز در بازار وجود دارند.

نکته اصلی در استفاده بیشتر از سامانه های فتوولتائیک، کاهش هزینه است که همه انواع سامانه های فتوولتائیک را پوشش می دهد. سوال اصلی این است که چه مقدار و با چه سرعتی هزینه ها باید کاهش یابند. شکل ۶ سهم مؤلفه های مختلف یک سامانه فتوولتائیک در کل هزینه ها را نشان می دهد. عمده ترین هزینه های تولید مشتمل بر هزینه های سرمایه گذاری، مواد اولیه، انرژی، هزینه های نگهداری و هزینه های نیروی انسانی می باشند [7].

¹ Grid-connected building – integrated systems

² Balance of system



شکل ۶: قیمت مؤلفه های سامانه های فتوولتائیک خانگی و تجاری در سال ۲۰۰۷ [4]

بر اساس مطالعه ای که توسط آژانس بین المللی انرژی صورت گرفته است نرخ یادگیری فناوری فتوولتائیک در مطالعات مختلف به شرح جدول ۱ می باشد [8].

جدول ۱: نرخ یادگیری فناوری فتوولتائیک در مطالعات مختلف

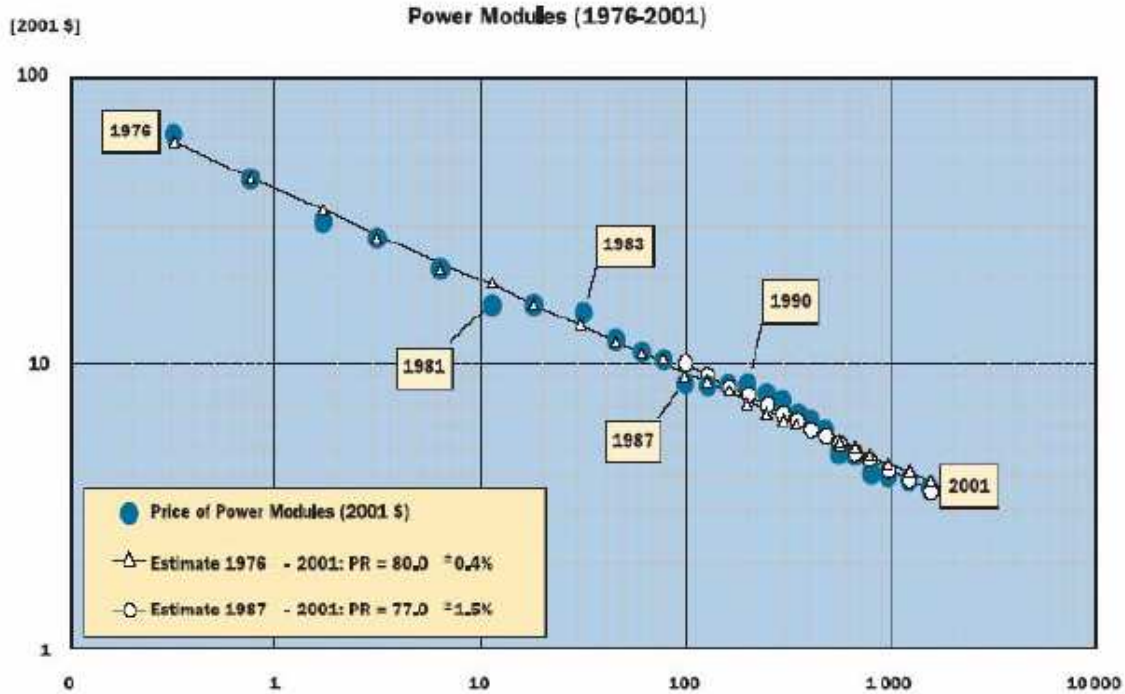
فناوری	منبع مطالعه	کشور/ منطقه	دوره زمانی	نرخ یادگیری (%)	توضیحات
فتوولتائیک	Harmon, 2000	در سطح جهان	۱۹۶۸-۱۹۹۸	۲۰	قیمت مدولهای PV (USD/W_{peak})
	IEA, 2000	اتحادیه اروپا	۱۹۷۶-۱۹۹۶	۲۱	قیمت مدولهای PV (USD/W_{peak})
	Williams, 2002	در سطح جهان	۱۹۷۶-۲۰۰۲	۲۰	قیمت مدولهای PV (USD/W_{peak})
	ECN, 2004	اتحادیه اروپا	۱۹۷۶-۲۰۰۱	۲۰-۲۳	قیمت مدولهای PV (USD/W_{peak})
	ECN, 2004	آلمان	۱۹۹۲-۲۰۰۱	۲۲	قیمت تعادل هزینه های سیستم

در اتحادیه اروپا مطالعات بسیاری جهت تجزیه تحلیل کاهش هزینه های فتوولتائیک در آینده بر اساس منحنی های یادگیری انجام گرفته است. در این مطالعات نرخ پیشرفت مدول های PV در دامنه ای بین ۵۳ تا ۹۰٪ گزارش گردیده است که در جدول ۲ به برخی از این مطالعات اشاره شده است.

جدول ۲: مطالعات انجام شده در مورد فتوولتائیک بر اساس منحنی یادگیری

منبع مطالعاتی	نرخ پیشرفت	دوره زمانی	منطقه جغرافیایی	سامانه PV
(Tsuchiya, 1992)	٪۷۹	۱۹۷۹-۱۹۸۸	ژاپن	مدول های PV (سیلیکون)
(Cody and Tiedje, 1997)	٪۷۸	۱۹۷۶-۱۹۸۸	آمریکا	مدول های PV
(Williams and Terzian, 1993)	٪۸۲	۱۹۷۶-۱۹۹۲	آمریکا	مدول های PV
(Parente et al., 2002)(data source unknown)	٪۷۷	۱۹۸۱-۲۰۰۰	—	مدول های PV
(Harmon, C. 2000) (several different data source)	٪۸۰	۱۹۶۸-۱۹۹۸	—	مدول های PV
(OECD/IEA, 2000)(based on the EU atlas project and Nitsch 1998)	٪۸۴ ٪۷۹:٪۵۳	۱۹۷۶-۱۹۹۶	—	مدول های PV (سیلیکون) کریستال شده)
(Schaeffer et al., 2004)	تقریباً ٪۹۰	—	آلمان	مدول های PV
(Schaeffer et al., 2004)	تقریباً ٪۹۰	—	هلند	مدول های PV
(Schaeffer et al., 2004)	٪۷۵-٪۸۰	۱۹۷۶-۲۰۰۱	جهان	مدول های PV
(Schaeffer et al., 2004)	٪۷۸	۱۹۹۲-۲۰۰۱	آلمان	PVBOS
(Schaeffer et al., 2004)	٪۸۱	۱۹۹۲-۲۰۰۱	هلند	PVBOS
Maycock, 2002, referred to in Nemet, 2006	٪۷۴	—	—	
Strategies Unlimited, referred to in Schaeffer et al., 2004	٪۸۰ ٪۷۷	۱۹۷۶-۲۰۰۱ ۱۹۸۷-۲۰۰۱	—	مدول های PV

به طور کلی، نرخ پیشرفت مدول های فتوولتائیک حدود ۰.۸٪ (دامنه ای بین ۰.۷۷٪ تا ۰.۸۲٪) برآورد شده است (شکل ۷).



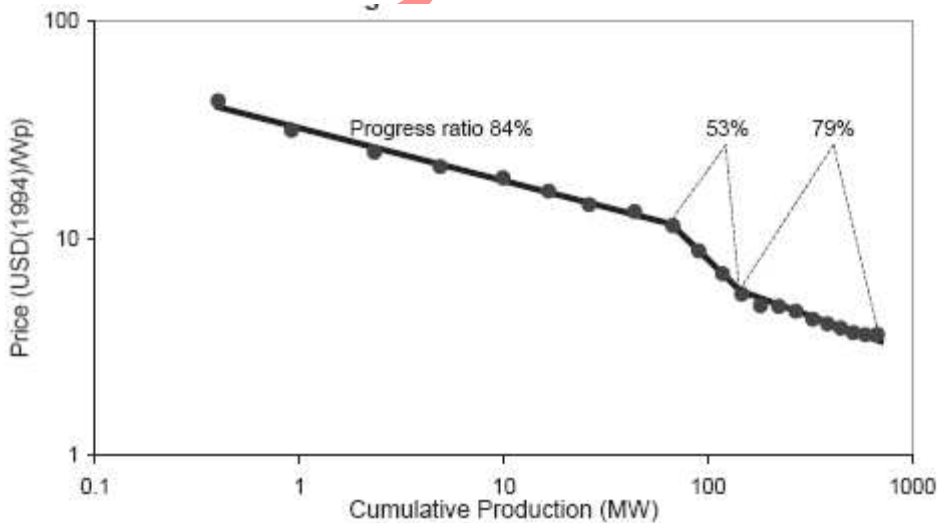
شکل ۷: منحنی یادگیری فناوری فتوولتائیک [قیمت مدل های فتوولتائیک (هر وات) به مجموع کالای حمل و نقل

شده با کشتی (به مگاوات)]

منحنی یادگیری مدول های فتوولتائیک در آلمان و هلند روند کندتری از کاهش هزینه را نشان داده و دارای نرخ پیشرفت ۰.۹٪ می باشند. در مطالعه دیگری هزینه های مدول ها و BOS از یکدیگر جدا و قیمت مدول ها در سطح جهان و قیمت BOS در سطح منطقه بررسی شده است. در کشوری مانند آلمان سیاست های حمایتی دولت منجر به افزایش بی سابقه تقاضا در بازار شده است که این امر منجر به کاهش هزینه BOS گردیده اما بر هزینه مدول ها تأثیری نداشته است. مطالعات نشان می دهند که نرخ پیشرفت در طول زمان تغییر می کند.

مطالعات مختلفی در زمینه چگونگی روند تغییر هزینه در آینده انجام شده اند که در آنها نرخ پیشرفت فناوری فتوولتائیک بین ۷۰٪ تا ۹۰٪ تخمین زده شده است. نتایج حاصل از این مطالعات حاکی از آن است که تغییرات اندک در نرخ پیشرفت منجر به ایجاد اثرات زیادی در روند محاسبه شده تغییرات هزینه خواهد شد [1].

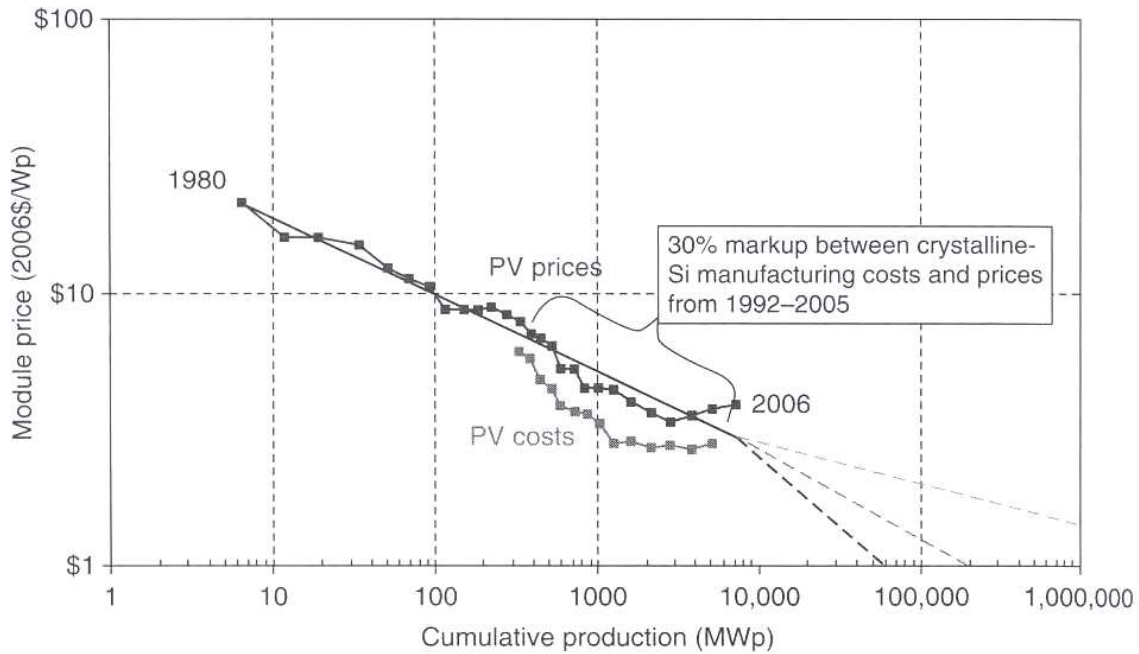
در مطالعه دیگری که توسط مک دونالد و همکاران صورت گرفته بررسی روند کاهش هزینه ها توسط منحنی های یادگیری در طیف وسیعی از صنایع و همچنین بخش تولید انرژی انجام شده است. در شکل ۸ داده های مربوط به قیمت مدول های فتوولتائیک طی سال های ۱۹۷۶ تا ۱۹۹۹ به صورت لگاریتمی نشان داده شده و نرخ یادگیری با توجه به شیب منحنی استخراج گردیده است.



شکل ۸: منحنی یادگیری دارای بخش های مختلف برای مدول های فتوولتائیک طی سال های ۱۹۷۶ تا ۱۹۹۹ (نرخ کلی یادگیری ۲۰٪ برآورد شده است).

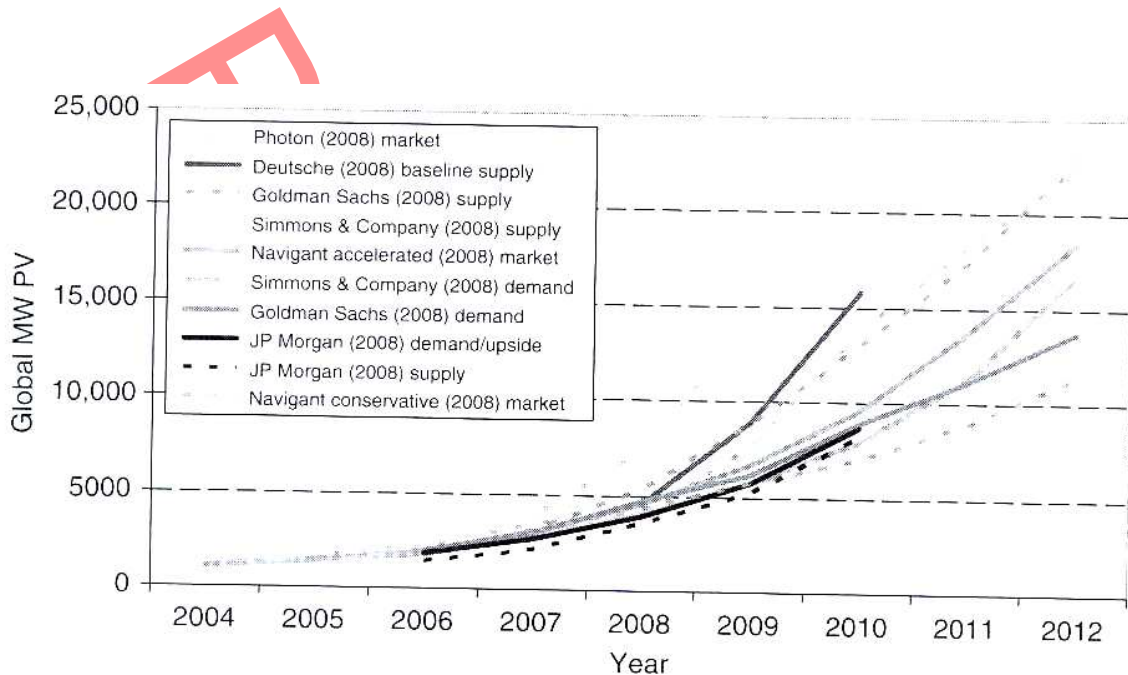
غالباً نرخ یادگیری ۱۰٪ تا ۳۰٪ و به طور متوسط ۲۰٪ (نرخ پیشرفت ۰.۸۰) به عنوان بهترین تخمین برای پتانسیل کاهش هزینه انواع فناوری های انرژی در نظر گرفته می شود [9].

در مطالعه ای که توسط آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر آمریکا صورت گرفته مشخص گردید که با افزایش تولید انبوه، قیمت سامانه های فتوولتائیک به شدت کاهش یافته است (شکل ۹). با توجه به این شکل، قیمت سامانه های فتوولتائیک حدود ۲۰٪ به ازای هر دو برابر شدن ظرفیت نصب شده فتوولتائیک کاهش یافته است.



شکل ۹: منحنی یادگیری فناوری فتوولتائیک طی سال های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۵

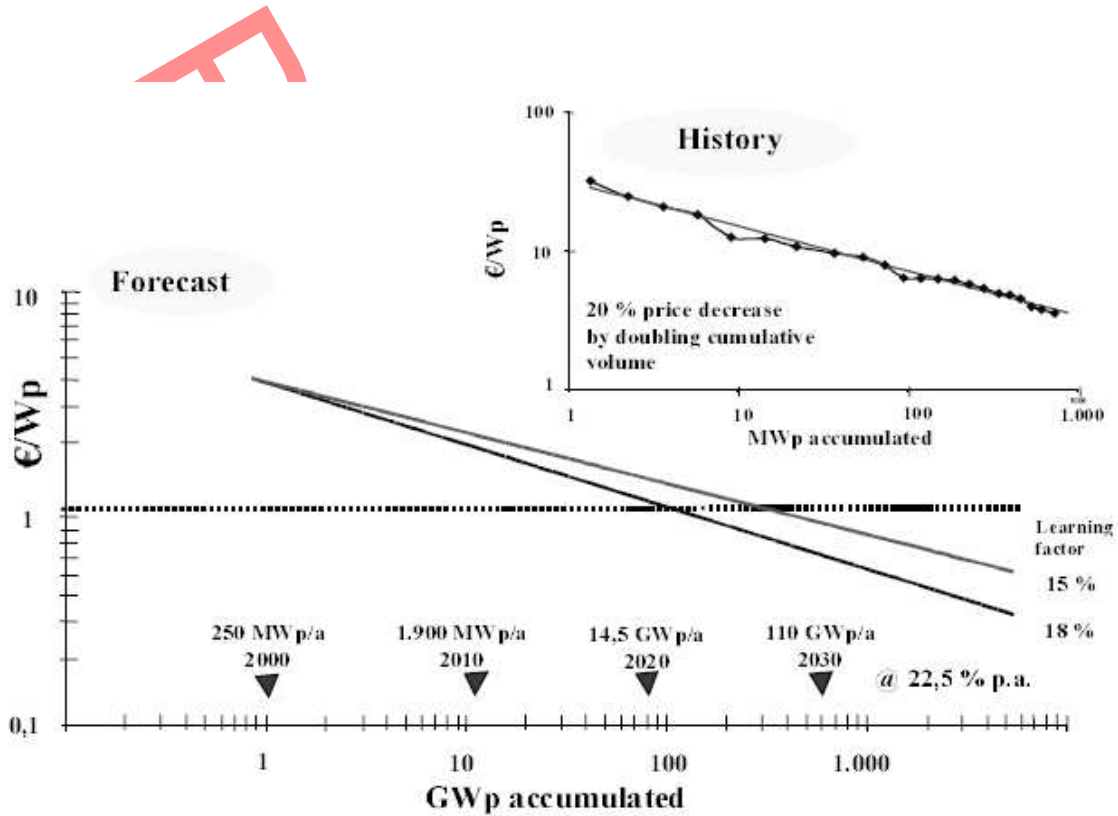
در بررسی دیگری که توسط همین آزمایشگاه صورت گرفته، بازار جهانی فتوولتائیک بر اساس مطالعات مختلف پیش بینی گردیده است (شکل ۱۰). این پیش بینی ها نرخ های متفاوتی از ۲۲٪ تا ۴۵٪ رشد سالانه را نشان داده اند.



شکل ۱۰: پیش بینی بازار جهانی فتوولتائیک تا سال ۲۰۱۲ [4]

در برخی مطالعات انجام شده، میزان یادگیری فناوری فتوولتائیک تا سال های ۲۰۳۰ نیز پیش بینی شده است. در شکل ۱۱ با دو منحنی روبرو هستیم. در یک منحنی، میزان یادگیری با توجه به روند قبلی کاهش هزینه ترسیم گردیده که میزان یادگیری آن در هر ۲ برابر شدن حجم تولید انبوه حدود ۲۰٪ برآورد شده است. همچنین در منحنی دیگر این نرخ تا سال ۲۰۳۰ برای مدول های فتوولتائیک پیش بینی گردیده است. منحنی های یادگیری تحت تأثیر عوامل مختلفی منجمله پیشرفت در تحقیق و توسعه، نحوه سرمایه گذاری در بخش صنعت، مسائل سیاسی و زیست محیطی و بازار قرار می گیرند.

همانطور که در شکل نشان داده شده با افزایش مقیاس تولید، عامل یادگیری از ۲۰٪ به ۱۸٪ و در حال خوشبینانه به ۱۵٪ کاهش خواهد یافت. بر اساس این منحنی و با فرض نرخ یادگیری ۱۵٪ یا ۱۸٪، در تولید انبوه با مقیاس ۱۰۰ تا ۳۰۰ گیگاوات هزینه ها حدود 1 €/W پیش بینی می گردد.

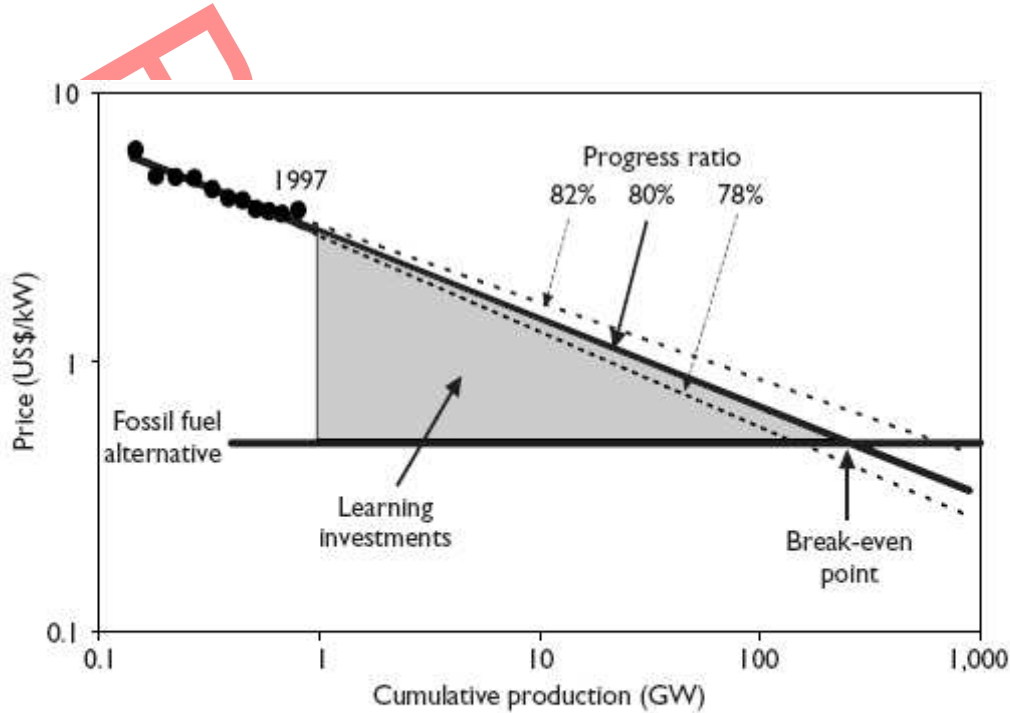


شکل ۱۱: منحنی یادگیری قیمت مدول های فتولتائیک [10]

تعیین نقطه سر به سر فناوری فتولتائیک با فناوری های رایج فسیلی

در مطالعه ای که توسط آژانس بین المللی انرژی صورت گرفته، نقطه سر به سر فناوری فتولتائیک با فناوری های رایج فسیلی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۲). جهت رقابتی شدن سامانه فتولتائیک با نیروگاه های رایج، هزینه مدول ها باید به $0.5 \text{ US\$/kW}$ کاهش یابد که در دیاگرام با "Fossil fuel alternative" مشخص گردیده است. به هنگام

سازی و گسترش منحنی های یادگیری، نرخ پیشرفت مدول ها را تا ۸۰٪ کاهش داد. برون یابی منحنی های یادگیری بر سطح تولید انبوه مدول ها جهت تعیین نقطه سربه سری با فناوری سوخت فسیلی، نشان داد که حدود ۲۰۰ گیگاوات تولید انبوه مدول، جهت دستیابی به این نقطه مورد نیاز خواهد بود.



Break-even point and learning investments for photovoltaic modules with a progress ratio of 80%. The shaded area indicates the remaining learning investments to reach the break-even point. The figure also shows changes in the break-even point for progress ratios of 78% and 82%.

شکل ۱۲: تعیین نقطه سربه سری مدول های فتوولتائیک

منحنی یادگیری، سرمایه گذاری مورد نیاز جهت رقابتی شدن یک فناوری را نشان می دهد. با لحاظ نمودن نرخ رشد سالانه ۱۵٪ (در گذشته)، مدول های فتوولتائیک حدود سال ۲۰۲۵ به نقطه سربه سری خواهند رسید. با دو برابر کردن نرخ رشد، این زمان حدود ۱۰ سال کاهش یافته و به سال ۲۰۱۵ می رسد.

در شکل بالا، سرمایه گذاری یادگیری برای مدول های فتوولتائیک با مثلث خاکستری رنگ نشان داده شده است. مجموع کل هزینه های یادگیری در آینده جهت رساندن فناوری این مدول ها به نقطه سر به سر، حدود ۶۰ میلیارد دلار آمریکا برآورد شده است. سرمایه گذاری قابل توجهی در زمینه یادگیری مدول های فتوولتائیک به میزان ۳ تا ۴ میلیارد دلار آمریکا تا سال ۱۹۹۸ انجام شده است. سرمایه گذاری یادگیری، هزینه فعالیت های تحقیق و توسعه (*R&D*) که توسط بازیگران بازار تجاری^۱ پرداخت شده (و نهایتاً توسط درآمدهای حاصل از این بازار جبران می گردد) را شامل می گردد [11].

نتیجه گیری

بر اساس مطالعات انجام شده، به دلیل هزینه های بالای فناوری فتوولتائیک سهم این فناوری در تأمین عرضه انرژی جهان و کاهش انتشار کربن در سال های قبل از ۲۰۲۰ امکان پذیر نخواهد بود. در مقایسه با فناوری های رایج فسیلی، با لحاظ نمودن هزینه های پنهان (هزینه های تخریب محیط زیست و هزینه های بهداشتی جوامع)، هزینه های فناوری تولید برق فتوولتائیک هم اکنون نیز قابل رقابت با فناوری های رایج فسیلی است.

بازار جهانی فتوولتائیک دارای رشد تقریبی سالانه ۳۰٪ بوده و این امر منجر به کاهش هزینه ها در سال های آتی می گردد. بررسی ها نشان داده است توسعه فناوری فتوولتائیک به همراه برق بادی تأثیر زیادی بر کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی خواهند داشت.

لازم به ذکر است عواملی چون قیمت سیلیکون مورد استفاده در مدول ها، ظرفیت، راندمان و ... نقش اساسی در کاهش هزینه های فناوری فتوولتائیک دارا می باشند. بنابر مطالعه ای که طی سال های

¹ Commercial market actors

۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ صورت گرفته میزان کاهش هزینه فناوری فتوولتائیک به ازای هر مؤلفه به شرح جدول

؟؟ بوده است [12].

جدول ۳: تأثیر عوامل مختلف بر کاهش هزینه فناوری فتوولتائیک طی سال های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱

عامل	تأثیر در کاهش هزینه (%)
ظرفیت نیروگاه	۴۳
راندمان	۳۰
هزینه سیلیکون	۱۲
اندازه ویفر	۳
سایر عوامل	۱۲

فهرست منابع و مراجع مورد استفاده

1. *Cost development-an analysis based on experience curves, 2006, Lund University (NEEDS).*
2. www.sun.org.ir
3. http://www.mechanicenergy.ir/solarenergy_usage%20.htm
4. *Christian Breyer, Mannheim, 2010, Global Photovoltaic Diffusion Regions, Market Segments and Cost. Workshop Student Chapters – GEE.*
5. *Sioshansi, fereidoon, 2010, Generating electricity in a carbon-constrained world, Elsevier publication.*
6. *Winfried Hoffmann, 2007, PV solar electricity - A future major technology*
7. *Trancik, Jessika, Ken Zweibel, 2006, Technology choice and the reduction potential of photovoltaics, NREL.*
8. *IEA, 2008, Energy technology perspective*
9. *Bob van der zwaan, Ari rabl, 2004, The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy, Energy policy 32 (2004) 1545-1554.*
10. *Hoffmann, Winfried, 2001, PV solar electricity: One among the new millennium industries, 17th European photovoltaic solar energy conference, Germany.*
۱۱. مقدمه ای بر کاربرد منحنی های یادگیری در پیش بینی فناوری های برق و انرژی، ۱۳۸۸، گروه نوآوری و توسعه فناوری، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی، وزارت نیرو.
12. *Nemet, Gregory F, 2005, beyond the learning curve: factors influencing cost reduction in photovoltaics, Energy policy.*