



وزارت نیرو
معاونت امور برق و انرژی
دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی

بررسی منحنی یادگیری فناوری

زیست توده

گروه نوآوری و توسعه فناوری های برق و انرژی

اردیبهشت ۱۳۹۰

مقدمه

استفاده از سامانه های نوین زیست توده جهت تولید انرژی (برق و حرارت) یکی از مهمترین فناوری های انرژی تجدیدپذیر در جهان محسوب می گردد. استفاده از زیست توده جهت تولید برق و حرارت و سوخت های مایع و گازی سهم عمده ای در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای داشته و منجر به توسعه ظرفیت های بالقوه سیستم های اقتصادی و انرژی خواهد گردید. همچنین استفاده از آن موجب کاهش وابستگی به مصرف سوخت های فسیلی می گردد. مصرف زیست توده در اتحادیه اروپا طی دهه های اخیر از رشد چشم گیری برخوردار بوده است (استفاده از زیست توده تا ۶۰۰۰ پتاژول تا سال ۲۰۱۰ در اروپا مورد انتظار بوده است).

بر اساس تعریف آژانس بین المللی انرژی، زیست توده به ۳ دسته سوخت های جنگلی، سوخت های زیستی مایع و سوخت های زیستی گازی دسته بندی شده است. سوخت جنگلی معمولا به چوب های گرده بینه اطلاق می گردد که تکه تکه شده و قیل از استفاده خرد می شود. سوخت جنگلی در سایر اشکال شامل تراشه های چوب، پلت چوب (حاصل از چسباندن خاک اره با ماده ای به نام لینین)، خاک اره و ... است. تراشه های چوب و پلت چوب به طور فزاینده ای در تجهیزات بویلری بزرگ به دلیل ایجاد شرایط بهتر و قابل کنترل تر احتراق مورد استفاده قرار می گیرد.

سوخت های زیستی مایع شامل اتانول زیستی، دیزل زیستی، متانول زیستی، دی متیل اتر زیستی و روغن زیستی می باشند که عمدتا در بخش حمل و نقل استفاده می گردند. این سوخت ها را می توان از روغن های گیاهی تازه یا مصرف شده تولید کرد و یا با سوخت های پایه نفتی آنها را ترکیب نمود. در برخی شرایط به عنوان خوراک سایر فرایندها نیز از آنها استفاده می گردد.

سوخت های زیستی گازی یا بیوگاز که عمدتاً از متان و دی اکسید کربن تشکیل شده و از تجزیه بی هوازی زیست توده تولید شده و شامل گازهای زیر می باشد:

- گاز دفنگاه که از تجزیه ضایعات دفن شده در زمین تشکیل می شود.
- گاز لجن فاضلاب که از تخمیر بی هوازی لجن های فاضلاب تشکیل می شود.
- سایر بیوگازها، نظیر بیوگاز تولید شده از تخمیر بی هوازی پسماندهای مایع حیوانی و پسماندهای کشتارگاه ها و سایر صنایع غذایی تولید می شود [۱].

همچنین آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر آمریکا (NERL) در راستای مطالعات پتانسیل یابی منابع زیست توده تقسیم بندی ذیل را انجام داده است:

- زایدات کشاورزی شامل زایدات زراعی و متان ناشی از فضولات دامی
- زایدات چوبی شامل زایدات جنگلی، صنایع چوب و ضایعات چوبی شهری (باغچه ها، سرشاخه ها و نخاله های چوبی)
- پسماندهای شهری شامل گاز دفنگاه، گاز فاضلاب
- گیاهان انرژی زا [۲].

بررسی پتانسیل زیست توده در ایران

بر اساس مطالعات وزارت جهاد سازندگی و سازمان انرژی های نو ایران پتانسیل منابع زیست توده در ایران (جدول ۱)، برابر ۱۳۲.۵ میلیون بشکه معادل نفت خام برابر ۷۸.۵ گیگاوات ساعت برآورد شده که برابر ۱۷٪ عرضه انرژی نهایی کشور در سال ۸۲ بوده است.

جدول ۱: پتانسیل زیست توده در ایران

پتانسیل (میلیون بشکه معادل نفت خام)	منبع
۷۴	زائدات کشاورزی و جنگلی
۱۵	زباله های شهری
۲	فاضلاب های شهری
۵.۵	فاضلاب های صنعتی
۳۶	فضولات دامی

همچنین بر اساس مطالعات انجام شده در راستای تدوین اطلس انرژی زیست توده در سازمان انرژی های نو ایران، پتانسیل تولید انرژی از پسماندهای شهری در برخی استان های کشور به شرح تصویر ۱ برآورد شده است.



شکل ۱: حداکثر پتانسیل عملی استخراج انرژی از پسماندهای شهری (مگاوات) [۳]

دلایل متعددی جهت سرمایه گذاری در این نوع انرژی مطرح بوده است. اغلب فناوری های انرژی زیست توده به ویژه زیست توده حاصل از محصولات کشاورزی به سختی با سوخت های فسیلی قابل رقابتند. اما تجربیات زیادی با فناوری های نوین زیست توده چندین دهه کسب گردیده و این امر منجر به کاهش هزینه های تولید می گردد. برخی از فناوری های زیست توده همانند سامانه های احتراق مواد آلی و زائدات در گذشته جهت تولید برق تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گرفته و در این زمینه با سایر فناوری ها قابل رقابت بوده اند. در این گزارش به بررسی چگونگی کاهش هزینه های تولید طی چند

دهه گذشته پرداخته شده و هدف اصلی آن تعیین منحنی یادگیری برای سیستم های انرژی زیست توده خواهد بود.

وضعیت تولید برق از زیست توده در جهان

طی سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۷ تولید برق از منابع تجدیدپذیر (به استثناء نیروگاه های تلمبه ذخیره ای) در کشورهای *OECD* از ۱۳۱۰ تراوات ساعت به ۱۶۳۶ تراوات ساعت افزایش یافته است. این در حالی است که ۱۵.۴٪ کل برق تولیدی، از منابع تجدیدپذیر تولید شده که ۱۱.۸٪ آن از نیروگاه های برقابی تأمین گردیده است.

از سال ۱۹۹۰، تولید برق از منابع تجدیدپذیر رشد سالانه ۱.۳٪ را تجربه نموده است. به عبارت دیگر رشد کند تولید برق از این منابع در سال های اخیر تحت تأثیر کاهش خروجی نیروگاه های برقابی در برخی کشورهای *OECD* به دلیل کمبود بارش بوده است.

وضعیت تولید برق از زیست توده جامد^۱ در سال ۲۰۰۷

تولید برق از زیست توده جامد از ۹۳.۱ تراوات ساعت در سال ۱۹۹۰ با رشد سالانه ۱.۶٪ به ۱۲۲.۲ تراوات ساعت در سال ۲۰۰۷ افزایش یافته است. پس از برق آبی و باد، زیست توده سومین منبع تولید برق از تجدیدپذیرها بوده و سهم ۷.۵٪ از تولید برق از منابع تجدیدپذیر در سال ۲۰۰۷ را به خود اختصاص داده است. آمریکا بزرگترین تولیدکننده برق از زیست توده جامد محسوب می گردد. این

^۱ *Solid Biomass* زیست توده جامد مشتمل بر مواد آلی و غیر فسیلی با منشأ زیستی است که به عنوان سوخت جهت تولید برق و حرارت کاربرد دارد. چوب، زایدات چوبی، فضولات حیوانی و زغال چوب در این دسته قرار می گیرند.

کشور ۳۴.۴٪ برق تولیدی خود را (۴۲ تراوات ساعت) از زیست توده جامد تولید می کند. دومین تولیدکننده بزرگ برق از این منبع ژاپن می باشد که ۱۵.۹٪ معادل ۱۵.۸ تراوات ساعت از برق تولیدی خود را از این منبع تأمین می کند. آلمان، فنلاند و سوئد نیز در زمره بزرگترین تولیدکنندگان برق از زیست توده جامد قرار می گیرند.

وضعیت تولید برق از ضایعات تجدیدپذیر شهری^۱ در سال ۲۰۰۷

ضایعات شهری تجدیدپذیر سهم ۱.۷٪ از تولید برق از منابع تجدیدپذیر در کشورهای OECD را به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۰۷، ۲۸.۶ تراوات ساعت از برق تولیدی از تجدیدپذیرها از این منبع تولید گردیده است. بزرگترین تولیدکننده برق در این سال از ضایعات شهری، آمریکا با ۹.۶ تراوات ساعت معادل ۳۳.۵٪ از تولید کشورهای OECD بوده است. آلمان و ژاپن به ترتیب با ۴.۱ و ۳.۴ تراوات ساعت، دومین و سومین تولیدکننده برق از این منبع در جهان محسوب می گردند.

وضعیت تولید برق از بیوگاز^۲ در سال ۲۰۰۷ در جهان

تولید برق از بیوگاز طی سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۷ از ۳.۶ تراوات ساعت به ۲۸.۵ تراوات ساعت افزایش یافته است. کشور آلمان با تولید ۸.۵ تراوات ساعت برق بزرگترین تولیدکننده برق از این منبع محسوب می گردد که در سال ۲۰۰۷ ایالات متحده آمریکا با تولید ۷.۴ تراوات ساعت برق را پشت سر

^۱ Renewable municipal waste ضایعات تجدیدپذیر شهری مشتمل بر بخش تجزیه پذیر زباله های شهری است که مستقیماً جهت تولید برق و حرارت استفاده می گردد (احتراق مستقیم).

^۲ بیوگاز عمدتاً محصول تخمیر بی هوازی زیست توده و ضایعات جامد است که جهت تولید برق و حرارت سوزانده می شود. گاز دفنگاه زباله، گاز حاصل از لجن فاضلاب در این گروه قرار می گیرند.

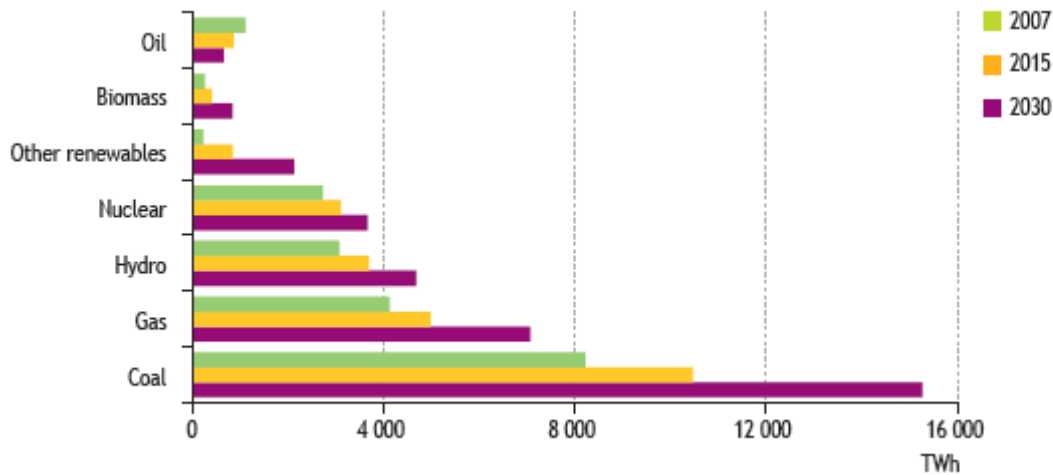
گذاشته است. بیشترین نرخ رشد تولید برق از بیوگاز طی سال های آخر دهه ۱۹۹۰ و سال های ابتدایی دهه ۲۰۰۰ رخ داده و پیش بینی می شود در آینده همچنان به رشد خود ادامه دهد.

وضعیت تولید برق از زیست توده مایع^۱ در سال ۲۰۰۷ در جهان

تولید برق از زیست توده مایع در سال ۲۰۰۷ در جهان به ۳.۶ تراوات ساعت بالغ گردیده است. بزرگترین تولیدکننده برق از این منبع کشور آلمان بوده که ۲.۹ تراوات ساعت از برق مصرفی خود را از این منبع تأمین نموده است [۴].

بر اساس گزارش چشم انداز انرژی در سال ۲۰۰۹، میزان تولید برق در جهان در سال ۲۰۰۷ و پیش بینی سال های ۲۰۱۵ و ۲۰۳۰ جهان بر اساس نوع سوخت مصرفی مطابق شکل ۱ می باشد. سهم زغال سنگ در تولید برق از ۴۲٪ سال ۲۰۰۷ به ۴۴٪ سال ۲۰۳۰ افزایش می یابد. استفاده از منابع تجدیدپذیر (زیست توده، باد، خورشید، امواج و جذرومد) به جز برقایی، سهم خود را در بازار افزایش داده و ۹٪ از کل تولید برق را در سال ۲۰۳۰ به خود اختصاص می دهند.

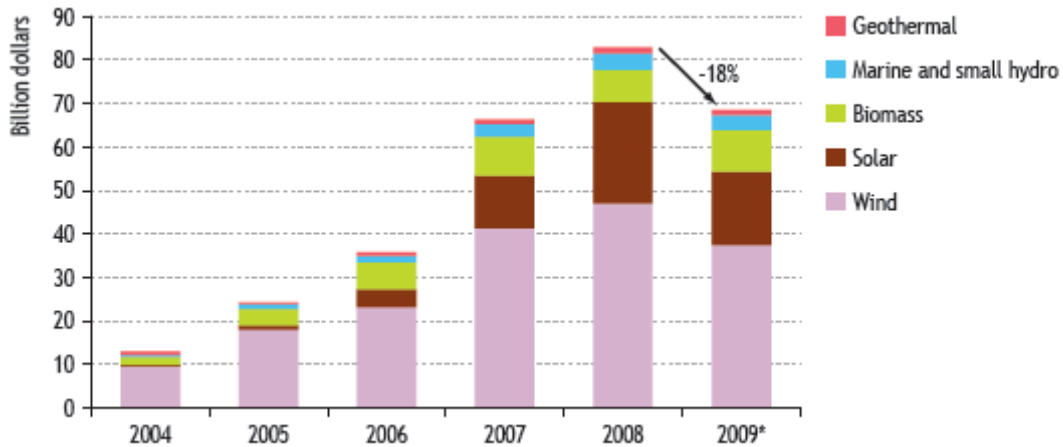
^۱ Liquid Biomass مشتمل بر سوخت ها و افزودنی های زیستی مانند بنزین زیستی، بیودیزل و سایر سوخت های زیستی مایع است.



شکل ۲: تولید برق در جهان بر اساس نوع سوخت مصرفی با روند فعلی

وضعیت سرمایه گذاری در فناوری های تولید برق از منابع تجدیدپذیر در جهان

میزان سرمایه گذاری در فناوری های تولید برق از منابع تجدیدپذیر تا سال ۲۰۰۸ از روند افزایشی در جهان برخوردار بوده که این روند تا نه ماهه نخست سال ۲۰۰۸ نیز ادامه داشته است اما پس از آن به دلیل بحران مالی، عدم تأمین مالی پروژه ها و پایین بودن بهای سوخت های فسیلی، انگیزه های لازم جهت سرمایه گذاری در بخش انرژی های تجدیدپذیر صورت نگرفت. در تصویر ۳ نشان داده شده که میزان سرمایه گذاری در سال ۲۰۰۹ نسبت به سال ۲۰۰۸ با ۱۸٪ کاهش مواجه بوده است [۵].



شکل ۳: میزان سرمایه گذاری انجام شده در جهان در فناوری های تولید برق از منابع تجدیدپذیر

هزینه های انرژی زیست توده

هزینه های استفاده از زیست توده در اثر یادگیری فناوری و به کارگیری واحدهای دارای ظرفیت بالاتر به تدریج در طول زمان کاهش یافته است. در سال ۲۰۰۸، هزینه تولید برق از زیست توده از ۶۲ تا ۱۸۵ دلار در هر مگاوات ساعت متغیر بوده که پیش بینی می گردد تا سال ۲۰۵۰ به ۴۹ تا ۱۲۳ دلار در هر مگاوات ساعت بالغ گردد. در جدول ۲ مشخصات برخی فناوری های تولید برق از زیست توده و هزینه های مترتب آن آورده شده است [۶].

جدول ۲: مشخصات برخی از فناوری های تولید برق از زیست توده

نوع فناوری	ظرفیت	راندمان	هزینه سرمایه گذاری
هضم بی هوازی	کمتر از ۱۰ مگاوات	۱۵-۱۰٪ برق ۷۰-۶۰٪ حرارت	
گاز دفنگاه	کمتر از ۲۰۰ کیلووات تا ۲ مگاوات	۱۵-۱۰٪ برق	
احتراق به منظور تولید حرارت	۵-۵۰ کیلووات خانگی	۲۰-۱۰٪ ^۱	۲۳ دلار بر کیلووات
	۱-۵ مگاوات صنعتی	۵۰-۴۰٪ ^۲	۳۷۰-۹۹۰ دلار بر کیلووات
		۹۰-۷۰٪ کوره	
احتراق به منظور تولید برق	۱۰-۱۰۰ مگاوات	۴۰-۲۰٪	۱۹۷۵-۳۰۸۵ دلار بر کیلووات
احتراق در CHP	۰.۱-۱ مگاوات	۹۰-۶۰٪	۳۳۳۳-۴۳۲۰ دلار بر کیلووات
	۱-۵۰ مگاوات	۱۰۰-۸۰٪	۳۰۸۵-۳۷۰۰ دلار بر کیلووات
احتراق توام با زغال سنگ	۵-۱۰۰ مگاوات در واحدهای موجود بیش از ۱۰۰ مگاوات در واحدهای جدید	۴۰-۳۰٪	۱۲۳۳-۱۲۳۵ دلار بر کیلووات + هزینه های نیروگاه
گازی سازی به منظور تولید حرارت	۵۰-۵۰۰ کیلووات	۹۰-۸۰٪	۸۶۴-۹۸۰ دلار بر کیلووات
گازی سازی به منظور تولید برق	۵-۱۰ مگاوات (نمونه صنعتی) ۲۰۰-۳۰۰ مگاوات واحدهای آینده	بیش از ۵۰-۴۰٪	۴۳۲۰-۶۱۷۰ دلار بر کیلووات ۱۲۳۵-۲۴۷۰ دلار بر کیلووات در واحدهای آینده
گازی سازی برای CHP با استفاده از موتورهای گاز	۰.۱-۱ مگاوات	۸۰-۶۰٪	۱۲۳۵-۳۷۰۰ دلار بر کیلووات
پیرولیز	۱۰ تن در ساعت (نمونه صنعتی)	۷۰-۶۰٪	۸۶۴ دلار بر کیلووات

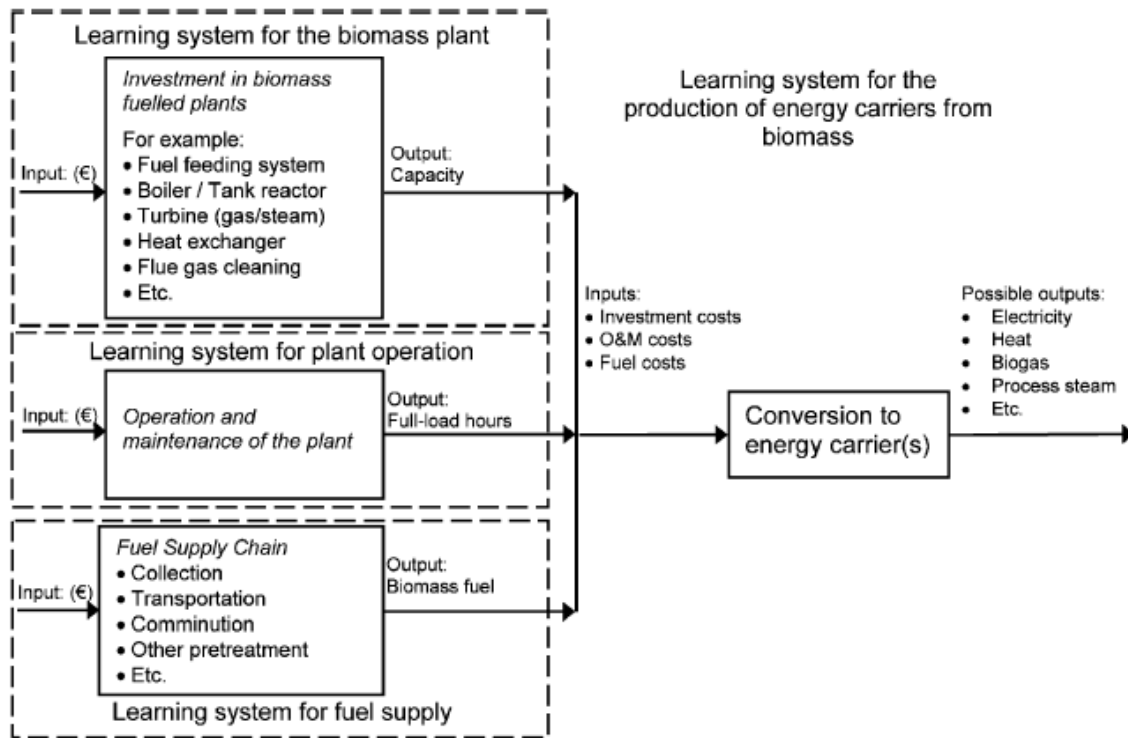
¹ Open fire

² Stove

منمنی یادگیری، یادگیری فناوری و سیستم های زیست – انرژی

در بحث انرژی، مفهوم منمنی یادگیری به کرات در مورد یادگیری محصولات مدولار از قبیل توربین های باد، پیل های سوختی و مدول های خورشیدی فتوولتائیک به کار گرفته شده است (در این راستا گزارشات مربوط به منمنی یادگیری فناوری های تولید برق بادی، خورشیدی و پیل سوختی نیز در این دفتر تهیه شده است). مفهوم یادگیری همچنین در مورد نیروگاه های زغال سوز و نیروگاه های اتمی با فناوری راکتور آب سبک نیز به کار رفته است. در بسیاری از مدل های جامع انرژی نیز نرخ یادگیری برای انواع فناوری های مصرف کننده سوخت بررسی می گردد. اما شمار این تحقیقات بسیار اندک می باشد.

سیستم های انرژی زیست توده به دلیل نیاز به سوخت با سایر فناوری های انرژی تجدیدپذیر دارای تفاوت هایی می باشند و این امر منجر به افزایش هزینه های تولید می گردد. این مسأله بر هزینه های سرمایه گذاری و تعمیرات و نگهداری نیز تأثیرگذار است. بر این اساس سیستم یادگیری نیروگاه های زیست توده را به ۳ بخش به شرح شکل ۴ تقسیم نمود.



شکل ۴: ساختار کلی سیستم یادگیری انرژی زیست توده

برای هر یک از این بخش ها می توان یک سیستم یادگیری مجزا تعریف نمود. استفاده از این روش زمانی پیشنهاد می گردد که روند هزینه های تولید برق باید مورد بررسی قرار گیرند. این روش در بررسی روند کاهش هزینه های سیستم های فتوولتائیک و مزارع بادی فراساحلی نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

در سال های اخیر تلاش هایی در جهت تعیین میزان یادگیری بر اساس دو عامل کاهش هزینه یعنی میزان تولید تجمعی و میزان بودجه های تحقیق و توسعه و ساخت نمونه صنعتی^۱ در دنیا انجام گرفته است. البته عاملی مانند اندازه (ظرفیت) نیروگاه را نیز می توان به عنوان متغیر دیگری در نظر گرفت. در حالیکه استفاده از این روش منجر به برآورد دقیق تری از روند گذشته و کاهش احتمالی هزینه ها

^۱ RD & D

در آینده ارائه می دهد اما به دلیل نیاز آن به داده های جزئی تر، در همه موارد کاربرد ندارد. در این گزارش از تجزیه تحلیل یک عامله جهت تعیین منحنی یادگیری استفاده خواهد شد.

تجزیه تحلیل هزینه های سرمایه گذاری با استفاده از منحنی یادگیری در نیروگاه های زیست توده در مقایسه با سایر فناوری های تجدیدپذیر با پیچیدگی هایی همراه است.

دلیل اول مقیاس نیروگاه های زیست توده در مقایسه با فناوری فتوولتائیک و باد و در نتیجه میزان تولید برق بیشتر در مقایسه با آنها است. به عنوان مثال یک نیروگاه زیست توده ۳۰ مگاواتی سالانه قادر به تولید همان میزان برقی است که در اثر بهره برداری از ۵۰ توربین باد ۱.۵ مگاواتی یا ۱.۵ میلیون پنل ۱۰۰ واتی فتوولتائیک حاصل می گردد. بنابراین دو برابر شدن ظرفیت جمعی در نیروگاه های زیست توده به عنوان مثال ایجاد ۲۰ نیروگاه در مقایسه با ۱۰ نیروگاه فعلی یعنی برابر ۱۰ نقطه داده است. اما دو برابر شدن ظرفیت در نیروگاه های بادی به عنوان مثال ساخت ۱۰۰۰ توربین در مقایسه با ۵۰۰ توربین فعلی یعنی ۵۰۰ نقطه داده است که در نتیجه با افزایش نقاط داده تجزیه تحلیل آماری جهت محاسبه میانگین هزینه های سرمایه گذاری تسهیل می گردد.

دوم اینکه هزینه های سرمایه گذاری در نیروگاه های زیست توده به شدت وابسته به شرایط محیطی است. در بسیاری از موارد این نیروگاه ها با توجه به نوع سوخت در دسترس، شرایط محیطی، زیرساخت های موجود، فضای در دسترس و طراحی می گردند. همچنین نوع سوخت عامل تأثیرگذاری در هزینه های سرمایه گذاری محسوب می گردد. در حال حاضر طیف وسیعی از انواع سوخت وجود دارد که از نظر محتوای رطوبتی، میزان خاکستر، اندازه و با هم تفاوت دارند. به علاوه سوخت های زیست توده را میتوان به همراه سایر سوخت ها از قبیل زغال سنگ و زباله های شهری نیز استفاده نمود. اگر نیروگاهی جهت استفاده از انواع سوخت طراحی گردد، هزینه های سرمایه گذاری به

مراتب بالاتر خواهد بود. لازم به ذکر است که هزینه های سرمایه گذاری تحت تأثیر عواملی چون مقررات زیست محیطی و هزینه های نیروی انسانی نیز قرار می گیرند.

سوم تأثیر مقیاس است که هزینه هر واحد ظرفیت را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. به کرات مشاهده شده به طور کلی با افزایش ظرفیت نیروگاه یا تجهیزات (از قبیل بویلر یا توربین) هزینه ها کاهش یافته است. تفاوت هزینه در نیروگاه های کوچک و بزرگ را می توان در فرمول ذیل مشاهده نمود:

$$\frac{\text{Cost}_{\text{Plant } x}}{\text{Cost}_{\text{Reference size}}} = \left(\frac{\text{Capacity}_{\text{Plant } x}}{\text{Capacity}_{\text{Reference plant}}} \right)^R$$

که در آن R عامل مقیاس است.

برای نیروگاه ها مقادیر R حدود ۰.۷ در نظر گرفته می شود. با لحاظ نمودن اندازه مرجع^۱، معادله فوق را می توان به فرمول ذیل تغییر داد:

$$\frac{\text{Cost}_{\text{Plant } x}}{\text{Capacity}_{\text{Plant } x}^R} = \text{Standardized plant cost.}$$

با این معادله می توان برآورد نمود که هزینه های احداث یک نیروگاه (یا تجهیزات به تنهایی) در اندازه مرجع به چه میزان خواهد بود. استفاده از این روابط و تبدیل کلیه نیروگاه ها به اندازه مرجع، داده های مناسب تری جهت استفاده در منحنی یادگیری تولید خواهد کرد. در هر حال افزایش ظرفیت یکی از سازوکارهای کاهش هزینه محسوب می گردد که منجر به تسطیح منحنی یادگیری (با فرض افزایش میانگین اندازه نیروگاه با پیشرفت فناوری) می گردد.

¹ Reference size

چهارم اینکه سیستم های انرژی زیست توده عمدتاً بیش از یک خروجی دارند که متداول ترین آن تولید برق و حرارت با استفاده از نیروگاه های *CHP* است. زیست توده در بخش حمل و نقل نیز هم به عنوان سوخت و هم به عنوان افزودنی کاربرد دارد.

تولید برق در نیروگاه های زیست توده *CHP* در سوئد

در این بخش به بررسی سیستم های *CHP* با سوخت زیست توده در سوئد پرداخته می شود. این سیستم ها بین سال های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۲ جهت تولید پراکنده حرارت در این کشور نصب گردیده اند. زیست توده در این کشور در زمره مهمترین منابع انرژی محسوب می گردد و عمده ترین کاربرد آن تولید حرارت و بخار در بخش صنعت و تولید پراکنده در بخش خانگی است. تولید همزمان برق و حرارت سابقه دوده ای در این کشور دارد. در سال ۲۰۰۱، ۴.۴ تراوات ساعت برق معادل ۱٪ از کل برق تولید شده در این کشور توسط نیروگاه های *CHP* با سوخت زیست توده تأمین گردیده است. در دهه گذشته به دلیل نصب ۱۸ نیروگاه جدید *CHP* و تبدیل سوخت ۵ نیروگاه *CHP* از فسیلی به زیست توده، تولید برق به روش تولید پراکنده در این کشور از رشد چشمگیری برخوردار بوده است. اغلب این نیروگاه ها از بقایای چوبی حاصل از فعالیت مرتبط با صنایع فرآوری چوب یا صنایع مرتبط با محصولات جنگلی به عنوان سوخت استفاده می کنند.

جهت بررسی چگونگی روند هزینه های تولید برق از نیروگاه های *CHP* با سوخت زیست توده در سوئد، هزینه های تعمیر و نگهداری و هزینه سوخت نیز مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است.

سامانه یادگیری تولید برق از نیروگاه های CHP با سوخت زیست توده در سوئد

برای این سیستم یادگیری، تولید برق از سیستم های CHP زیست توده، هزینه های برق در هر نیروگاه (در سال) با استفاده از فرمول ذیل قابل محاسبه است:

$$CoE = \frac{All(AC + OM + F)}{E}$$

که در آن:

CoE : هزینه تولید برق به یورو در کیلوواتساعت

All : $0 \leq All \leq 1$

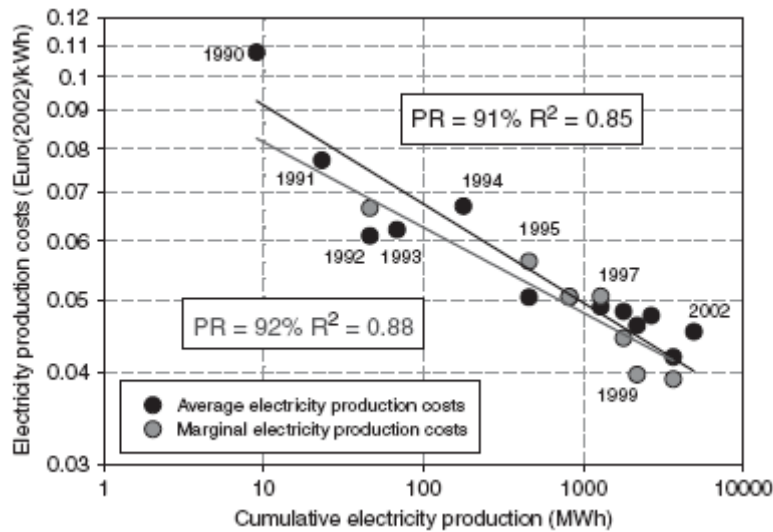
AC : هزینه های سرمایه گذاری سالانه به یورو در سال

OM : هزینه های تعمیرات نگهداری سالانه به یورو در سال

F : هزینه سوخت نیروگاه در سال به یورو در سال

E : میزان تولید برق سالانه

جهت استفاده از منحنی یادگیری در تولید برق، هزینه های تولید برق سالانه همه نیروگاه ها به تفکیک هر نیروگاه محاسبه گردیده است. این داده ها به تفکیک هر نیروگاه جمع آوری شده است. جهت تجزیه تحلیل هزینه های سرمایه گذاری، نرخ تورم ۱۰٪ و طول عمر نیروگاه ۲۰ سال فرض شده است. جهت محاسبه میانگین هزینه های تولید برق، هزینه تولید کلیه نیروگاه ها با استفاده از میزان تولید سالانه هر نیروگاه به طور وزنی میانگین گیری شده است. در شکل ذیل، میانگین هزینه های تولید در برابر تولید تجمعی برق نیروگاه های CHP نشان داده شده است.



شکل 5: منحنی یادگیری میانگین هزینه و هزینه نهایی تولید برق در نیروگاه های *CHP* زیست توده در سوئد طی

سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۲

این منحنی، نرخ پیشرفتی برابر ۹۱٪ و میزان همبستگی بالایی (۰.۸۵) را نشان می دهد. جهت محاسبه هزینه های نهایی برق، میانگین هزینه های تولید در ۲ تا ۴ سال فعالیت واحدهای تازه تأسیس *CHP* مدنظر قرار گرفته است. نرخ پیشرفت دو منحنی به دلیل وجود مقادیر بالای ضریب همبستگی چندان تفاوتی با یکدیگر نخواهند داشت.

لازم به ذکر است که هزینه های سرمایه گذاری در طول زمان کاهش یافته و سهم آن در کل هزینه های تولید برق از ۶۵٪ در سال ۱۹۹۰ به ۳۰٪ در سال ۲۰۰۲ کاهش یافته است. همچنین در دوره مورد بررسی هزینه های سوخت از روند ثابتی برخوردار بوده و تغییری نداشته است. از سوی دیگر با افزایش طول عمر، میزان تولید برق در هر نیروگاه از روند افزایشی برخوردار بوده به نحوی که میانگین ضریب بار هر نیروگاه از ۱۸٪ در نخستین سال بهره برداری به ۴۰٪ در ۱۰ سال اولیه بهره برداری

افزایش یافته است. در نهایت می توان چنین نتیجه گیری نمود که میانگین هزینه های تولید برق با همان سرعت کاهش هزینه های نهایی تولید، کاهش می یابد.

بررسی توسعه نیروگاه های زیست توده با فناوری بویلرهای بستر سیال^۱

اغلب نیروگاه های CHP زیست توده ای که پس از سال ۱۹۹۰ به ویژه در کشورهای اسکاندیناوی ساخته شده اند، از فناوری احتراق بستر سیال در بویلر استفاده می نمایند. از آنجایی که سایر مولفه ها از قبیل کل چرخه بخار و فعالیت های عمرانی تغییر چندانی نداشته اند، می توان این نوع بویلر را به عنوان فناوری جدید محسوب نمود. بویلرهای دارای احتراق بستر جهان در مقیاس جهانی توسعه یافته است. بنابراین در این بخش به تجزیه تحلیل چگونگی کاهش هزینه های تولید این نوع بویلر از سال ۱۹۷۵ پرداخته می شود.

فناوری احتراق بستر سیال توانایی سوزاندن سوخت هایی با کیفیت پایین و دارای ارزش حرارتی کم و محتوای بالای رطوبت و خاکستر را دارا می باشد. از سایر مزایای این فناوری می توان به انعطاف پذیری سوخت، میزان انتشار آلاینده ها، قابلیت استفاده از محصولات جانبی غیر خطرناک و امکان استفاده از آن در واحدهای فعلی^۲ اشاره کرد. با توجه به این نکته که این فناوری حدود ۳ دهه پیش معرفی شده، فناوری احتراق بستر سیال و زیرشاخه های آن (بستر سیال چرخان، بستر سیال حبایی و اشکال دوگانه) پیشرفت های زیادی را تجربه کرده اند. این فناوری عمدتاً توسط شرکت های آمریکایی، اسکاندیناوی و آلمانی توسعه یافته اما نیروگاه های استفاده کننده از آن در سراسر دنیا احداث شده اند.

^۱ Fluidized bed boiler

^۲ Retrofit

عمده ترین پیشرفت های ۲ دهه گذشته این فناوری افزایش مقیاس، کاهش انتشار آلاینده ها و انعطاف پذیری سوخت بوده است.

سیستم یادگیری هزینه های سزمايه گذاری

جهت انجام این تجزیه و تحلیل، پایگاه داده ای مبتنی بر داده های اقتصادی و فناوری ۴۹۱ پروژه^۱ تشکیل گردید. این داده ها از مجلات بازرگانی، مقالات کنفرانس ها، اطلاعات کارخانجات سازنده، پایگاه های داده عمومی و برنامه های پایش دولتی جمع آوری گردیده است. این پایگاه داده، حدود ۷۰٪ از کل ظرفیت نصب شده در جهان را شامل می گردد.

از ۵۰۰ پروژه موجود در پایگاه داده، درباره ۱۴۰ پروژه تنها برخی داده های مربوط به هزینه ها قابل استخراج بود که این داده ها به قیمت دلار سال ۲۰۰۳ تبدیل شدند. همانطور که در بخش های قبلی اشاره شد، هزینه های هر نیروگاه به سبب عواملی چون مقیاس، سوخت مصرفی، فناوری به کار رفته، کاربرد و منطقه بسیار متفاوت خواهد بود. به همین جهت دسته بندی ذیل صورت پذیرفت:

- پروژه هایی که تنها قیمت بویلر در آنها در نظر گرفته شده است.
- پروژه های EPC^۲ مشتمل بر سایر مولفه های نیروگاه مانند سیکل بخار، کنترل آلاینده ها، ابزار و فناوری کنترل و سایر تجهیزات
- پروژه هایی که کل هزینه را در بر می گیرند.

^۱ FBC (۳۱۱ پروژه CFB، ۱۴۶ پروژه BFB و ۳۴ پروژه دوگانه)

^۲ در این پروژه ها تمامی فعالیت های اجرای پروژه از مرحله طراحی و مهندسی تا تدارکات و ساخت نهایی توسط یک پیمانکار صورت می گیرد.

تفاوت بعدی بر اساس نوع فناوری، منطقه، کارخانه سازنده، نوع سوخت و نوع سفارش (نیروگاه جدید، بازتوانی، نصب تجهیزات جدید، تبدیل و ..) است. از نرخ شاخص قیمت نیز جهت محاسبه هزینه های سرمایه گذاری بویلر، پروژه های EPC و کل پروژه به $\$/kWe$ استفاده گردید.

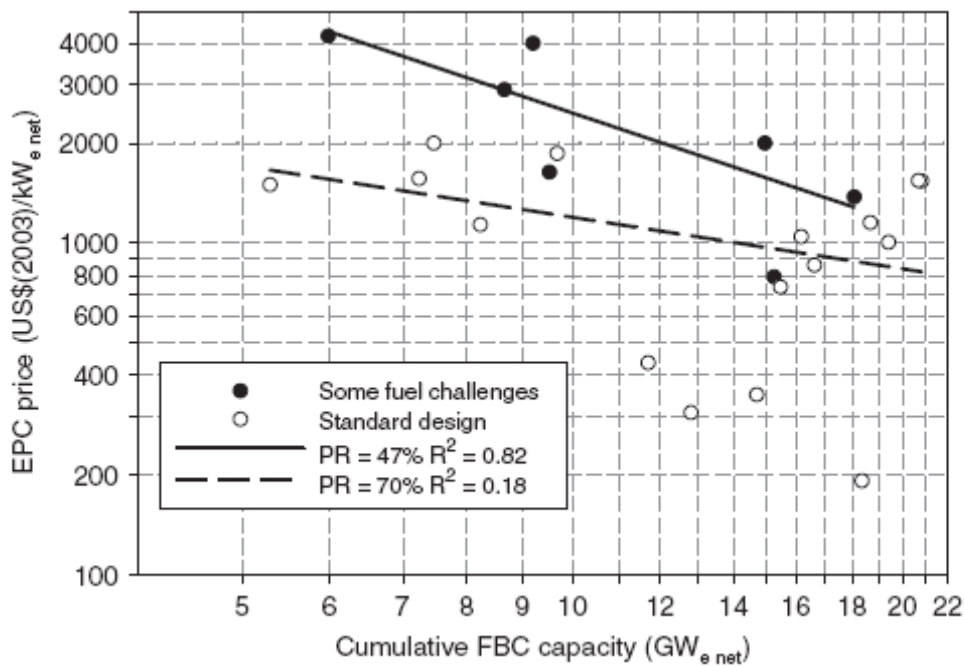
بررسی ها نشان داد در صورتی که متغیرهای دسته اول و دوم در نظر گرفته شوند (جدول ۳)، منحنی یادگیری حاصله ضریب همبستگی پایینی را جز در موارد معدودی که در جدول پررنگ شده نشان خواهند داد.

جدول ۳: مروری بر نرخ پیشرفت و ضریب همبستگی منحنی یادگیری بر اساس تفاوت سفارش فناوری CFB و BFB، نوع سوخت و منطقه جغرافیایی

	Selection method	PR	R^{2a}	Sample size
Project price	BFB	0.90	0.77	6
	CFB	1.02	0.00	15
	BFB, new plant (pilot plant excluded)	0.91	0.77	5
	CFB, new plant	0.91	0.06	11
	CFB, new plant, standard design	0.94	0.09	8
	CFB, new plant, standard design + no challenge	0.90	0.19	10
	CFB, new plant, standard design, power	0.93	0.61	7
EPC price	BFB	1.40	0.23	23
	CFB	0.93	0.09	56
	BFB, new plant	0.90	0.10	16
	CFB, repower	0.89	0.25	14
	CFB, add-on	0.90	0.31	9
	CFB new plant	0.62	0.17	29
	BFB, new plant, some challenges	0.78	0.26	14
	BFB, new plant, some challenges, Scandinavia, Cogeneration	0.79	0.48	7
	CFB, new plant, standard design	0.70	0.18	16
	CFB, new plant, some challenges	0.47	0.82	11
	CFB, new plant, no challenges + standard design, North-America	0.82	0.96	5
	CFB, repower, standard design	0.93	0.29	11
	CFB, repower, no challenges + standard design, North-America	0.90	0.95	5
	Boiler price	BFB	0.91	0.04
CFB		0.86	0.07	29
BFB, new plant		0.71	0.16	7
CFB, new plant		0.98	0.01	16
BFB, new plant, some challenges		0.71	0.16	7
BFB, new plant, some challenges, Scandinavia		0.52	0.42	5
CFB, new plant, standard design		0.42	0.85	10

^a R^2 of 0.8 and above are printed bold.

در مثال شکل ۶، دو منحنی یادگیری بر اساس تفاوت نوع پروژه (EPC)، نوع فناوری (CFB) نوع سفارش (نیروگاه جدید) و نوع سوخت ارائه گردیده است.



شکل ۶: منحنی یادگیری برای نیروگاه های جدید CFB با انواع مختلف سوخت.

(در طراحی استاندارد، انواع سوخت مشتمل بر کک نفتی، انواع زغال بیتومینه، لیگنیت و زغال نارس می گردد. بقیه انواع

سوخت مشتمل بر زیست توده چوبی و پلاستیک است)

همانطور که از شکل مشخص می گردد، نیروگاه هایی که از سوخت هایی نظیر زیست توده چوبی و ..

استفاده می کنند در کل هزینه های سرمایه گذاری بالاتری نسبت به سایر نیروگاه ها دارند. البته روند

هزینه های سرمایه گذاری در هر دو نوع نیروگاه روند کاهشی بوده است.

نیروگاه های بیوگاز در دانمارک

استفاده از فضولات دامی و زایدات آلی جهت تأمین انرژی، فناوری شناخته شده ای در کشور دانمارک است. در سال ۲۰۰۲، ۲۰ نیروگاه بیوگاز در حال بهره برداری و بیش از ۳۵ واحد نیروگاهی احداث گردیده است. در این نیروگاه ها با استفاده از فرآیند هضم زیست توده در شرایط بی هوازی (بدون اکسیژن)، بیوگاز تولید می شود. بیوگاز مخلوطی از گاز دی اکسید کربن و گاز قابل احتراق متان است که جهت تولید برق و حرارت کاربرد دارد. منبع تولید بیوگاز طیف وسیعی از مواد آلی را شامل می گردد. در دانمارک از راکتورهای $CSTR^1$ جهت فرآوری فضولات دامی مایع شده و ضایعات آلی صنعتی استفاده می شود. در این کشور نخستین نیروگاه بیوگاز در سال ۱۹۸۴ احداث گردیده است. از سال ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۸ تعداد نیروگاه ها ثابت بوده و از ۲۰ نیروگاه فراتر نرفته است. طی سال های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ نیز نیروگاه جدیدی احداث نشده است. در سال ۲۰۰۲، در این نیروگاه ها ۳۵۰ گیگاوات ساعت برق و ۱.۲۹ پتاژول حرارت تولید شده که در مجموع ۳٪ از کل فضولات دامی تولید شده در این کشور را مورد فرآیند قرار داده اند. این واحدها از سال ۱۹۸۹ به طور پیوسته پایش شده و این امر بخشی از برنامه تحقیق و توسعه این کشور محسوب می گردد. تمرکز این برنامه بر جمع آوری تجربیات و نقطه نظرات متخصصین، تولیدکنندگان نیروگاه های بیوگاز و کشاورزان می باشد. کارکرد و نحوه طراحی نیروگاه های بیوگاز در طول زمان با تغییرات زیادی مواجه بوده است. گرچه فرآیند هضم فضولات دامی و مواد آلی در سایر کشورها از قبیل آلمان و هلند نیز توسعه یافته اما تجربه و دانش اندکی در این زمینه در این کشورها وجود دارد. کلیه نیروگاه های بیوگاز در دانمارک توسط شرکت های دانمارکی ساخته شده است.

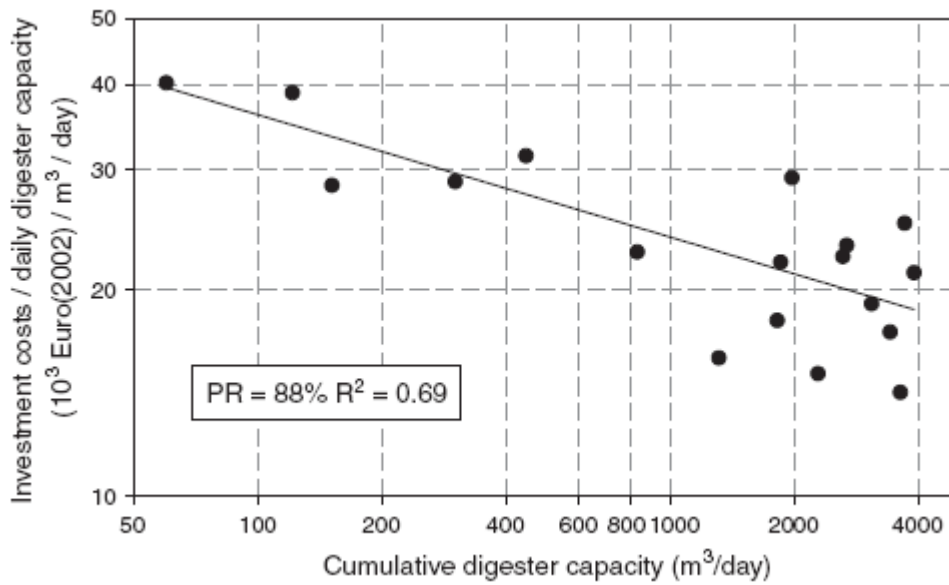
¹ Continuously Stirred Tank Reactor

روند کاهش هزینه های سرمایه گذاری

۲۰ نیروگاه مورد اشاره در بند قبل از جهاتی با یکدیگر متفاوتند. حدود دو سوم از آنها در شرایط ترموفیلیک و بقیه در شرایط مزوفیلیک بهره برداری می شوند (در شرایط مزوفیلیک نیروگاه در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد و با دوره بازگشت^۱ ۲۵ روز و در شرایط ترموفیلیک در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد و با دوره بازگشت ۱۵ روزه فعالیت می کنند). در برخی از این نیروگاه ها، زیست توده مستقیماً در بویلر استفاده می شود اما در بیشتر آنها بیوگاز تولیدی در سایر مناطق به نیروگاه های CHP حمل شده و جهت تولید برق و حرارت به صورت محلی استفاده می گردد. در چند نیروگاه نیز بیوگاز به همراه سوخت هایی نظیر نفت یا گاز طبیعی سوزانده می شود. همچنین در برخی نیروگاه ها امکان سوزاندن ضایعات چوبی نیز پیش بینی شده است. ظرفیت هاضم زیست توده در این نیروگاه ها از ۷۵۰ تا ۸۵۰۰ مترمکعب متفاوت است.

جهت مقایسه هزینه های سرمایه گذاری، سایر مؤلفه های CHP تا حد امکان کنار گذاشته شده اند. بر خلاف سایر نیروگاه ها، حداکثر ظرفیت نیروگاه های بیوگاز به عواملی چون ظرفیت هاضم، شرایط بهره برداری در حالت ترموفیلیک و مزوفیلیک، کیفیت فضولات و زایدات دامی دارد. در این بخش فرض بر آن قرار گرفته که ظرفیت هاضم و میانگین زمان ماند توسط حداکثر مقدار زیست توده که در روز قابل فرآیند است، تعیین می گردد. سپس هزینه های سرمایه گذاری هر نیروگاه به حداکثر ظرفیت روزانه فرآیند زیست توده در هاضم تقسیم شده است. در شکل ذیل این هزینه های سرمایه گذاری در برابر ظرفیت تجمعی هاضم های بیوگاز نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که تفاوت در شرایط محلی، تجهیزات و .. تفاوت هایی را در نتیجه حاصله ایجاد می نمایند.

^۱ متوسط زمان ماند زایدات در مخزن



شکل ۷: منحنی یادگیری نیروگاه های بیوگاز در دانمارک (هزینه های مؤلفه های CHP، تجهیزات سوزاندن چوب و ... در محاسبات لحاظ نشده اند)

نتیجه گیری

هدف اصلی این گزارش بر ارزیابی رویکرد منحنی یادگیری در سیستم های انرژی زیست توده قرار گرفته است. در جدول ذیل خلاصه ای از موارد مورد بحث در این گزارش آورده شده است.

جدول ۴: مروری بر پارامترها و نتایج مطالعه

پارامترها	نیروگاه های CHP سوئد	بویلرهای بستر سیال	نیروگاه های بیوگاز دانمارک
محدوده جغرافیایی	سوئد	جهان	دانمارک
چارچوب زمانی	۱۹۹۰-۲۰۰۲	۱۹۷۵-۲۰۰۲	۱۹۸۴-۲۰۰۲
تعداد نیروگاه	۱۸	۱۵۰ مورد از ۴۹۱ داده موجود	۲۰
نوع سوخت	عمدتاً زیست توده چوبی	انواع زیست توده و سوخت های فسیلی	فضولات دامی و ضایعات آلی
مقیاس	۳-۵۰ مگاوات (الکتریکی)	۱۰-۵۲۰ مگاوات (الکتریکی)	۲۲-۵۰۰ مترمکعب زیست توده فرآوری نشده در روز

فناوری	نوع منحنی یادگیری	نرخ پیشرفت (%)	ضریب همبستگی
نیروگاه های CHP سوئد	هزینه سرمایه گذاری	۷۵-۹۷	۰.۰۲-۰.۲۱
	هزینه سوخت	۸۵-۸۸	۰.۸۷-۰.۹۳
	هزینه تولید برق	۹۱-۹۲	۰.۸۵-۰.۸۸
بویلرهای بستر سیال	هزینه پروژه	۹۰-۹۳	۰.۶۱-۰.۷۷
	هزینه EPC	۴۹-۹۰	۰.۶۷-۰.۹۶
	بویلر	۴۲	۰.۸۵
نیروگاه های بیوگاز دانمارک	هزینه سرمایه گذاری	۸۸	۰.۶۹
	هزینه بیوگاز	۸۵-۱۰۰	۰.۹۷

از موارد مورد اشاره در جدول فوق می توان چنین نتیجه گیری کرد که تعیین منحنی یادگیری برای هزینه های سرمایه گذاری نیروگاه های زیست توده بسیار مشکل بوده و دلیل اصلی آن فقدان اطلاعات در خصوص این نوع نیروگاه ها می باشد. کلیه نمودارهای ارائه شده در این گزارش در خصوص هزینه ها روند نزولی را نشان می دهند که از لحاظ آماری به دلیل کمبود داده ها و غیر قابل دسترس بودن بسیاری از این داده ها قابل اثبات نیست.

سازوکارهای مختلف یادگیری برای موارد ذکر شده در جدول فوق وجود دارند. هنگام بررسی هزینه های سرمایه گذاری در هر سه مثال مورد مطالعه، هزینه های سرمایه گذاری (و هزینه حامل نهایی انرژی در موارد مربوط به دانمارک و سوئد)، روند نزولی دارند اما سازوکارهای یادگیری متفاوتی مسبب این کاهش هزینه هستند. در مورد نیروگاه هایی که از بویلرهای بستر سیال استفاده می کنند، اصلی ترین مرحله تحقیق و توسعه و ساخت نمونه صنعتی آن در دهه ۱۹۷۰ روی داده و تجاری شدن آن در مقیاس جهانی از سال ۱۹۸۰ در بازار آغاز گردیده است. در مورد نیروگاه های CHP سوئد، گرچه دانش فنی نیروگاه وجود داشته و از آن در طراحی و بهره برداری نیروگاه های جدید استفاده شده اما دلیل اصلی کاهش هزینه افزایش ظرفیت پیوسته فناوری و معرفی فناوری فشرده CFB بوده که عمدتاً خارج از محدوده یادگیری کشور سوئد رخ داده است. از سوی دیگر بخش اعظم پیشرفت فناوری هضم زیست توده به صورت محلی توسعه یافته است. بودجه های عمومی تحقیق و توسعه و ساخت نمونه صنعتی و احداث نیروگاه های پایلوت در نیمه دوم دهه ۱۹۸۰ نقش عمده ای در آغاز فرآیند یادگیری ایفا نموده اند. با شروع نفوذ فناوری در بازار در دهه ۱۹۹۰، یادگیری با کاربرد^۱ و یادگیری با تعامل^۲، نقش عمده ای در کاهش هزینه های سرمایه گذاری و تولید بیوگاز داشته اند.

^۱ Learning-by-using

^۲ Learning-by-interacting

از این موارد چنین نتیجه می توان گرفت که برای فناوری های نسبتا جدید که در مقیاس محلی و منطقه ای توسعه می یابند یادگیری با کاربرد و یادگیری با تعامل از عوامل مهم توسعه موفق به شمار می روند. در مورد توسعه فناوری ها در مقیاس جهانی، انتشار دانش محلی در خصوص بهره برداری نیروگاه و استراتژی های تأمین سوخت بسیار مثرتر خواهد بود [7].

Paper-mooe-org-ir

فهرست منابع و مراجع مورد استفاده

۱. راهنمای آمار انرژی، ۱۳۸۹، آژانس بین المللی انرژی، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی

وزارت نیرو

۲. زیست توده، ۱۳۸۲، سازمان انرژی های نو ایران وزارت نیرو

3. www.suna.org.ir

4. *International Energy Agency, 2009, Renewables information*

5. *International Energy Agency, 2009, World Energy outlook*

6. *International Energy Agency, 2008, Energy Technology Perspective*

7. *Junginger, M, et all, 2006, Technological learning in bioenergy systems, Energy policy (34) 4024-4041*