



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

بررسی مسمخنی یادگیری فناوری برق بادی

گروه نوآوری و توسعه فناوری های برق و انرژی

خرداد ۱۳۸۹

مقدمه

نگرانی های زیست محیطی در خصوص اثرات مصرف سوخت های فسیلی و پایان پذیر بودن منابع این انرژی دولتمردان را وادار ساخته است تا به سایر جایگزین های دوستدار محیط زیست و تجدیدپذیر منابع انرژی نیز بیاندیشند. انرژی باد یکی از این منابع به شمار می رود که فناوری آن نسبتاً قدیمی است که طی دهه های اخیر قابلیت تجاری شدن یافته است. کاربرد این انرژی در میان کشورهای مختلف به دلیل وجود سیاست ها و شرایط بادخیزی، متفاوت بوده است. در طول دهه ۱۹۹۰، برق بادی سریع ترین رشد فناوری در بین فناوری های انرژی در جهان با نرخ میانگین سالانه حدود ۲۸٪ طی سال های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ را داشته است. این نرخ رشد در سال ۲۰۰۰ با اندکی کاهش به ۲۶٪ رسید.

در این گزارش به طور جداگانه به بررسی منحنی یادگیری جهانی مزارع باد و منحنی های یادگیری فناوری باد در سه کشور دانمارک، آلمان و انگلیس پرداخته شده است (منحنی یادگیری بیانگر ارتباط بین هزینه ها و تولید انبوه یا ظرفیت تجمعی می باشد).

منحنی جهانی یادگیری مزارع بادی

جهت اهداف ذیل می توان از منحنی های یادگیری استفاده نمود:

- از منحنی یادگیری می توان در سطوح مختلف جهت تخمین هزینه های آینده و انتخاب استراتژی مناسب استفاده کرد.
- سیاست گذاران را قادر می سازد تا تأثیرات سوبسیدهای اعطاء شده در گذشته مانند سوبسیدهای تحقیق و توسعه یا سرمایه گذاری را در سطح ملی مورد ارزیابی قرار دهند.

- منحنی های یادگیری همچنین در سناریوسازی توسعه انواع فناوری ها در سطح جهان نیز کاربرد دارند.

- مدل های انرژی و مدل های تغییر اقلیم نیز به طور فزاینده ای از این منحنی ها در برآورد میزان کاهش هزینه فناوری های تجدیدپذیر استفاده می کنند.

محدوده کاربرد منحنی های یادگیری از سطح یک کارخانه تا یک توربین باد (فناوری) و از چند سال تا افق های زمانی طولانی تر را در بر می گیرد. در این بخش منحنی یادگیری جهانی مزارع بادی و تغییر قیمت های آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش مناسب بود به جای استفاده از نرخ پیشرفت از نرخ یادگیری (PR-100) استفاده می شد. مزیت کاربرد واژه دوم این است که مقادیر بالاتر نرخ یادگیری به معنای کاهش سریع تر هزینه هاست در حالیکه مقادیر بالای نرخ پیشرفت بیانگر روند کندتری از کاهش هزینه ها می باشد. اما به دلیل کاربرد بیشتر نرخ پیشرفت، از این واژه در این بخش استفاده شده است.

عوامل بیشماری بر کاهش هزینه ها تأثیرگذارند که به برخی از آنها در ذیل اشاره می گردد:

- یادگیری با انجام کار¹ و یادگیری توسط کاربرد² منجر به افزایش اثربخشی نیروی کار، تخصصی شدن کار و روش های بهبود می گردد.

- نوآوری که در اثر تحقیق و توسعه (یادگیری با تحقیق)³ حاصل می گردد، به عنوان مثال منجر به کاربرد مواد جدید یا معرفی فرآیندهای جدید تولید می شود.

- بهبود ارتباطات متقابل بین مؤسسات تحقیقاتی، صنایع، مصرف کنندگان نهایی و سیاست گذاران و ... (یادگیری با ارتباط متقابل)¹ منجر به انتشار بهتر دانش می گردد.

¹ Learning by doing

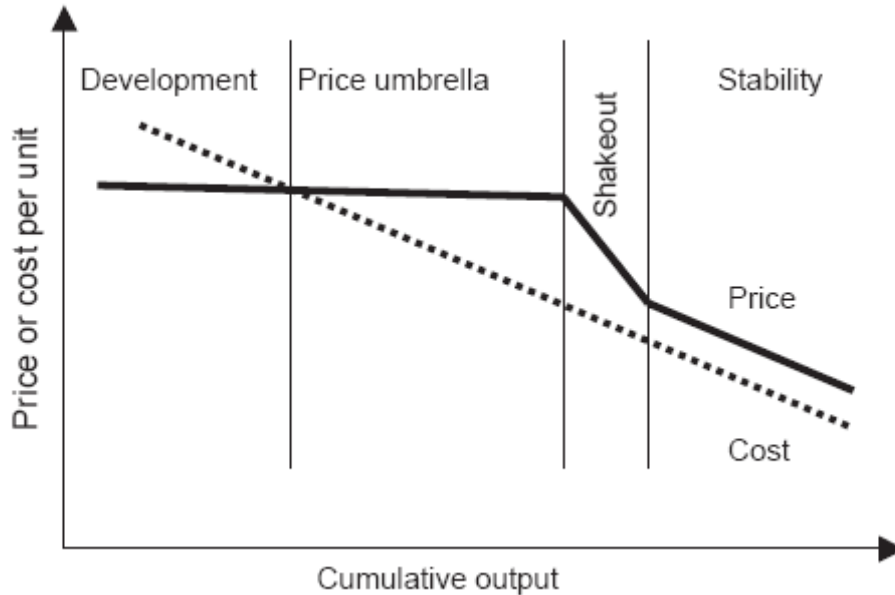
² Learning by using

³ Learning by searching

- استاندارد کردن محصول می تواند منجر به افزایش ظرفیت تولید (تولید انبوه) گردد.
- طراحی مجدد و افزایش یا کاهش ظرفیت محصول (مانند توربین باد که افزایش ظرفیت آن منجر به کاهش هزینه های ویژه هر توربین می گردد).

در بسیاری از موارد ترکیبی از عوامل فوق الذکر روی داده و منجر به توسعه محصول طی زمان می گردد. به عنوان مثال در مرحله اولیه توسعه، هزینه های $RD\&D$ ^۲ تأثیر چشم گیری بر کاهش هزینه ها خواهند داشت در حالی که در زمان نفوذ در بازار، تولید انبوه نقش اساسی را در کاهش هزینه ها ایفا می نماید. همچنین عوامل مذکور را نمی توان به کلیه محصولات ارتباط داد. در تحقیقات انجام شده تا کنون دو عامل تحقیق و توسعه و تولید انبوه به عنوان اصلی ترین عوامل کاهش هزینه شناخته شده اند.

ارتباط بین هزینه و قیمت در زمان معرفی محصول جدید در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: ارتباط بین هزینه و قیمت در زمان معرفی محصول جدید به بازار

¹ Learning by interacting

² Research and development & Demonstration

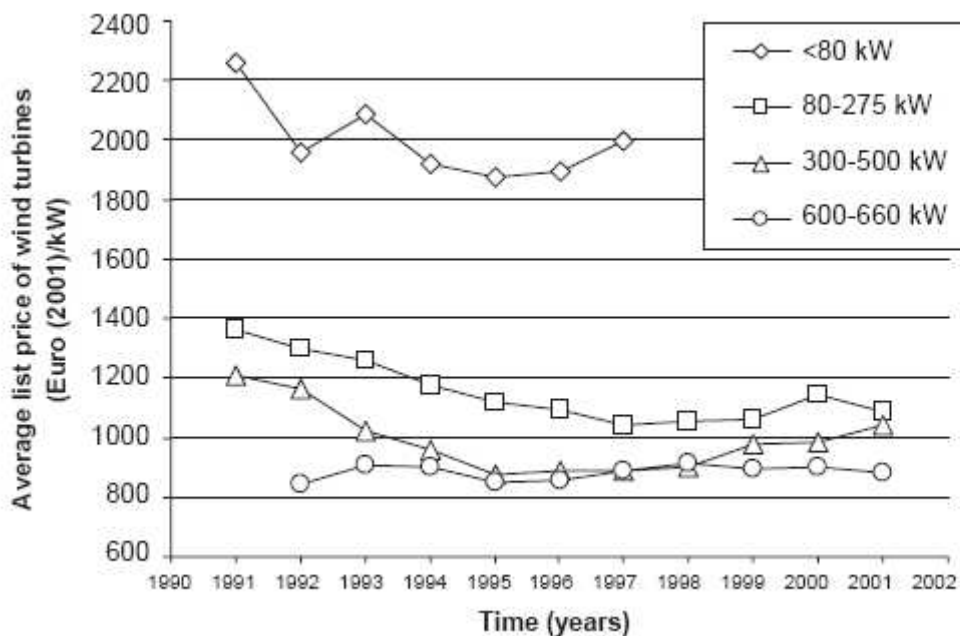
این مدل به ۴ بخش تقسیم شده است در بخش اول کارخانه سازنده محصول جدید را با قیمتی پایین تر از هزینه های انجام شده جهت ایجاد بازار، معرفی می نماید. با افزایش حجم تولید، هزینه ها به سرعت کاهش یافته در حالی که قیمت ها در پایین ترین نرخ خود باقی مانده است. طی این دوره که به چتر معروف است روند فزاینده سود نهایی منجر به جذب سایر رقبا جهت تولید محصول مشابه می گردد. به طور معمول تولید کننده اولیه موقعیت غالبی در بازار داشته و قادر به تعیین قیمت بازار در گستره مشخصی از زمان است. سپس رکودی روی داده و در یک دوره زمانی کوتاه، قیمت ها به شدت کاهش می یابند. در نهایت در مرحله پایداری قیمت ها و هزینه ها با سرعت مشابهی روند نزولی پیدا می کنند. در این مدل تنها در مرحله آخر شیب کاهش قیمت ها و هزینه ها با هم برابر بوده و در نتیجه می توان از قیمت ها جهت برآورد نرخ کاهش هزینه ها استفاده نمود. رسیدن به مرحله پایداری دائمی نبوده و بسته به عواملی نظیر تغییر میزان تقاضا، تغییر تعداد عرضه کنندگان یا کاهش حمایت های دولتی، دوره چتر یا رکود جدیدی روی خواهد داد.

از طرف دیگر در بسیاری از منحنی های یادگیری پس از چندین بار دو برابر شدن تولید تجمعی، حتی پس از تجاری سازی تغییر چشم گیری ایجاد نمی گردد. این مسأله به فرمول منحنی یادگیری باز می گردد که در آن زمان به عنوان متغیر در نظر گرفته نشده است. در این فرمول کاهش هزینه ها تنها به تنها به حجم تجمعی تولید وابسته است. در هر حال سرعت دو برابر شدن تولید تجمعی با افزایش نفوذ محصول در بازار کاهش خواهد یافت. به عنوان مثال در حالی که ظرفیت نصب شده برخی فناوری های نوین از قبیل باد هر ۳ تا ۴ سال دو برابر می گردد اما دو برابر شدن ظرفیت برخی فناوری ها مانند نیروگاه های زغال سوز به سال ها زمان نیاز دارد.

علل کاهش قیمت توربین های باد و مزارع بادی

عوامل شناخته شده در کاهش قیمت توربین های باد

طی دهه های گذشته هم هزینه های تولید توربین های باد و هم هزینه های تولید برق بادی به طور چشم گیری کاهش یافته که یکی از مهمترین دلایل آن افزایش اندازه و ظرفیت توربین های باد بوده است. هر کلاس جدید از توربین دارای هزینه های کمتری به ازای هر کیلووات برقی تولیدی نسبت به کلاس قبلی خواهد بود (شکل ۲).

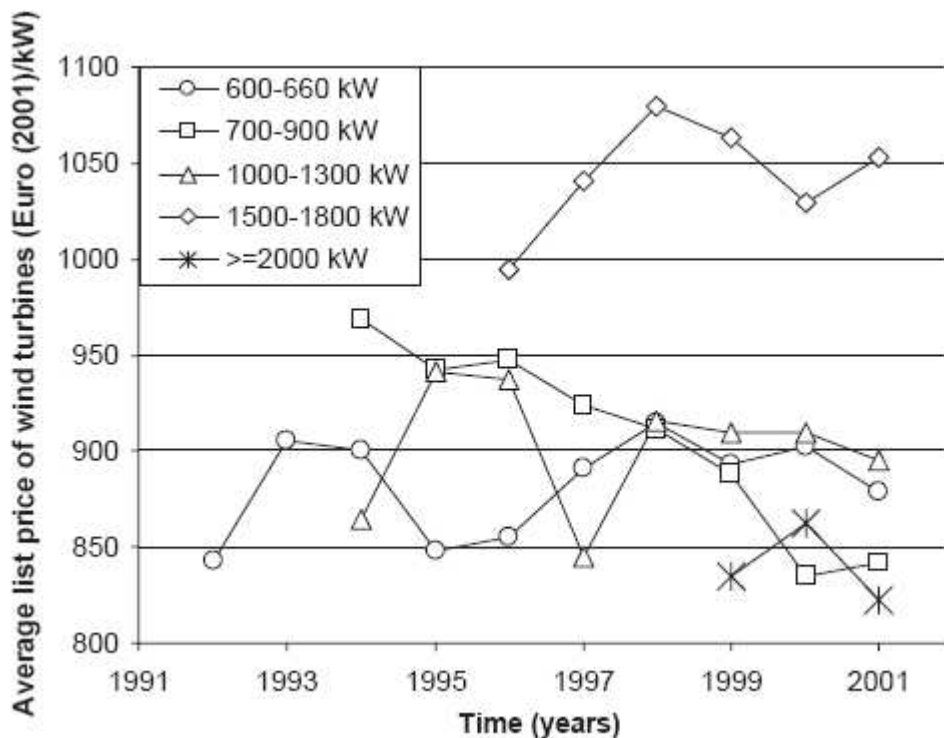


شکل ۲: میانگین قیمت توربین های کوچک و متوسط مقیاس باد طی سال های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۱

با افزایش ظرفیت نه تنها هزینه هر واحد نصب شده بلکه هزینه های تولید برق نیز کاهش می یابد.

وضعیت جاری

از زمان معرفی توربین های ۶۰۰ کیلووات در سال ۱۹۹۵ روند کاهش قیمت توربین ها ادامه داشته است. از آنجا که ظرفیت توربین ها پیوسته در حال افزایش است، کاهش مشخصی در قیمت هر کیلووات برق این توربین ها به ویژه در مقیاس بیش از مگاوات در مقایسه با توربین های ۶۰۰ تا ۷۵۰ کیلووات مشاهده نشده است (شکل ۳).



شکل ۳: میانگین قیمت توربین های متوسط و بزرگ مقیاس باد طی سال های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۱

اما در این بین استثنایی در بین توربین های ۱.۵ و ۱.۸ مگاواتی وجود دارد که دامنه قیمت آنها بین ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ یورو بر کیلووات بوده که به طور مشخصی بالاتر از توربین های مقیاس کوچکتر و بزرگتر می باشد.

در هر حال برای سرمایه گذاران هزینه برق تولیدی تعیین کننده میزان جذابیت اقتصادی مزارع بادی است. بنابراین در این گزارش هزینه های تولید برق با افزایش اندازه توربین نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در شرایط مرجع (میانگین سرعت باد برابر ۵.۵ متر بر ثانیه و ارتفاع ۳۰ متر بالاتر از سطح دریا) میزان کیلووات ساعت برق تولیدی در سال به ازای هر کیلووات ظرفیت نصب شده در کلاس های مختلف توربین بسیار متفاوت است. این عامل وابسته به قطر روتور و ارتفاع برج توربین می باشد. در این شرایط استاندارد، میزان متوسط برق تولیدی از یک توربین ۱.۵ مگاوات بین 1900 kWh/kW تا 3100 در سال متغیر است. اغلب توربین های ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوواتی در چنین شرایطی دارای تولید 1800 kWh/kW و 2900 در سال می باشند. در واقع هزینه های سرمایه گذاری بالاتر توربین های ۱۵۰۰ کیلوواتی لزوماً با تولید برق بیشتر جبران نمی گردد. در حقیقت توربین های ۶۰۰ تا ۹۰۰ کیلووات در شرایط برابر، عملکرد مناسب تری نسبت به توربین های ۱۵۰۰ کیلوواتی دارند.

رود آینده

تولید انبوه نقش اساسی در کاهش هزینه ها در آینده ایفاء خواهد نمود. در ۵ سال گذشته، مزارع بادی در اسپانیا و آمریکا با ظرفیت چندصد مگاوات ایجاد شده اند. در واقع می توان چنین نتیجه گیری نمود که کاهش قیمت توربین های باد عمدتاً به دلیل افزایش ظرفیت توربین ها ایجاد گردیده و انتظار می رود با ساخت توربین های مشابه در حجم انبوه، کاهش چشم گیری در قیمت ها در آینده روی دهد. بر اساس مطالعه ای که در سال ۲۰۰۰ انجام گرفته، کاهش هزینه ای برابر ۱۵٪ تا پایان سال ۲۰۰۴ در قیمت توربین ها روی داده است که ۳۵٪ از آن به دلیل بهبود طراحی (کاهش وزن) و

۵۰٪ آن به دلیل افزایش ظرفیت و بهینه سازی ساخت بوده است. همچنین در این گزارش ارزاترین

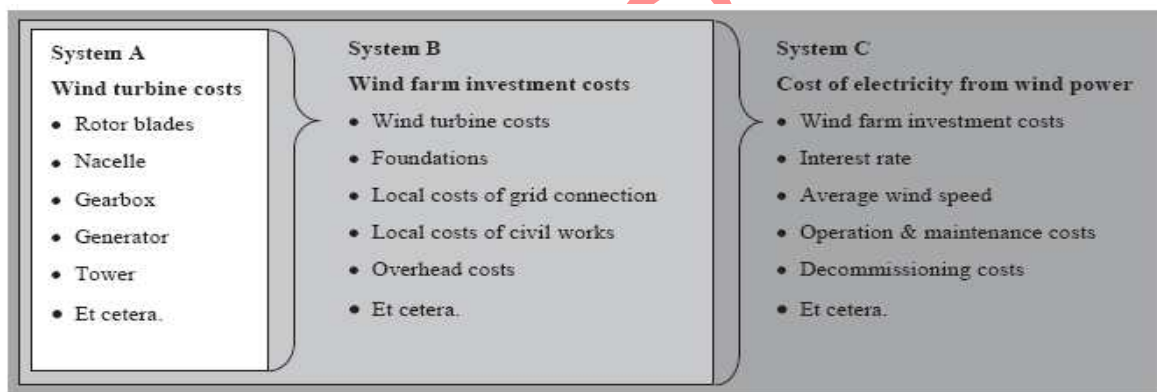
توربین ها تا پایان سال ۲۰۰۴ همچنان در ظرفیت ۷۵۰ و ۱۰۰۰ کیلووات خواهند بود.

در واقع منحنی های یادگیری چشم اندازی برای چگونگی تغییرات هزینه ها در آینده ایجاد خواهند نمود.

تجزیه و تحلیل روش مطالعه

الف: تعیین مرز سامانه و نوع منحنی یادگیری

نخست لازم است محدوده سامانه یادگیری به خوبی تعریف گردد. به عنوان مثال ممکن است منحنی یادگیری به ساخت توربین های باد تخصیص یابد. در این مورد هزینه های تولید هر کیلووات در برابر ظرفیت توربین در نظر گرفته می شود. سامانه یادگیری دیگری ممکن است هزینه های نصب مزارع بادی را به عنوان تابعی از نصب تجمعی توربین ها در مزارع بادی در نظر بگیرد. به طور معمول ۶۵٪ تا ۸۵٪ کل هزینه ها به هزینه توربین ها مربوط می گردند. سایر هزینه ها مربوط به احداث زیرساخت ها، اتصال به شبکه، مدیریت پروژه و ... می گردد (شکل ۴).



شکل ۴: محدوده سامانه برای سامانه های مختلف یادگیری انرژی باد (سامانه یادگیری A زیرسیستم سامانه

یادگیری B و سامانه یادگیری B زیرسیستم سامانه C می باشد)

بنابراین سامانه یادگیری توربین باد زیر سیستم سامانه یادگیری مزارع بادی می باشد. در واقع سامانه های یادگیری توربین های باد و مزارع بادی بر اساس تصویر فوق خود زیرسیستم سامانه تولید برق از انرژی باد محسوب می گردند. بنابراین بر اساس تئوری منحنی یادگیری در این مورد باید هزینه تولید برق در برابر تولید جمعی برق در نظر گرفته شود.

پس از مرور منابع مختلف، در مورد انرژی باد ۴ نوع متفاوت از منحنی یادگیری مندرج در جدول ۱ یافت گردید.

جدول ۱: انواع مختلف منحنی یادگیری در انرژی باد

نوع	محور X	محور Y
I	ظرفیت جمعی نصب شده یا تولید شده (kW)	قیمت ظرفیت ($€/kW$)
II	میزان جمعی kWh تولیدی	قیمت برق ($€/kWh$)
III	ظرفیت جمعی نصب شده یا تولید شده (kW)	قیمت برق ($€/kWh$)
IV	تعداد جمعی توربین های باد نصب شده یا تولید شده	قیمت برق ($€/kWh$)

در مرور منابع مختلف و به کارگیری انواع مختلف منحنی یادگیری جدول ۲ حاصل شده است.

جدول ۲: مروری بر منحنی یادگیری انرژی باد در مطالعات اخیر

Author	PR (%)	Time frame	Region	Cum MW ^{I, III} / TWh ^{II} installed ^a / produced ^b	Average annual growth rate	Cumulative doublings <i>n</i>	<i>R</i> ²
<i>Type I</i>							
Mackay and Probert (1998)	85.7	1981–1996	US	20–1750 (±) ^a	34.7%	6.5	0.945
Durstewitz and Hoppe-Kilpper (1999)	92	1990–1998	Germany	60–2850 ^a	62.0%	5.6	0.949
Neij (1999a, b)	92	1982–1997	Denmark	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Neij (1999a, b)	96 ^c	1982–1997	Denmark	2–3000 (±) ^b	63% (±)	10.6 (±)	n.a.
Neij (1997)	96 ^c	1982–1995	Denmark	2–1800 (±) ^b	69% (±)	9.8 (±)	0.83
Seebregts et al. (1998)	87/90 ^b						
	n.a.	Denmark	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Lund (1995)	85	n.a.	Denmark	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Neij et al. (2003)	92–94	1981–2000	4 countries ^d	Turbines produced in a country	n.p.	n.p.	n.p.
Milborrow (2002a)	84.7	n.a.	Danish manufacturers	60–8000 (±) ^b	n.a.	7.1.	n.a.
Neij et al. (2003)	89–117	n.a.	Several WT manufacturers	Produced wind turbines	n.p.	n.p.	n.p.
Neij et al. (2003)	89–96	1981–2000	4 countries ^d	Turbines installed in a country	n.p.	n.p.	n.p.
<i>Type II</i>							
IEA (2000), based on EU Atlas project data	82	1980–1995	EU	0.02–20 (±)	59% (±)	6.6 (±)	n.a.
IEA (2000), based on data from Kline and Gipe	68	1985–1994	US	2–30 (±)	35% (±)	3.9 (±)	n.a.
<i>Type III</i>							
Dannemand Andersen and Fuglsang (1996)	80	1981–1995	Denmark	7–2500 ^b	52.2%	8.5	n.a.
Neij (1997)	91 ^c	1980–1991	Denmark	7–1280 ^b	68.3%	7.5.	n.a.
Ibenholt (2002)	92–103	1991–1999	Germany	70–4400 (±) ^a	68% (±)	6.0 (±)	n.a.
Ibenholt (2002)	88–93	1984–1999	Denmark	15–1800 (±) ^a	34.8% (±)	6.9 (±)	n.a.
Ibenholt (2002)	75	1991–1999	United Kingdom	10–360 (±) ^a	56.5% (±)	5.2 (±)	n.a.
Neij et al. (2003)	87–88	1981–2000	4 countries ^d	Type III, for specific electricity production produced by a country	n.p.	n.p.	n.p.
Neij et al. (2003)	83	1981–2000	4 countries ^d	Type III, for levelized electricity production produced by a country	n.p.	n.p.	n.p.

±: data estimated from a figure, as exact numbers were not given; *n*: number of doublings of cumulative production on *x*-axis; *R*²: correlation coefficient; n.a.: data not available and I–III: see Table 1.

^aBased on the number of MW actually installed in the region.

^bBased on the number of MW produced in a country (of which part may be exported).

^cOnly four Danish producers; only turbines ≥ 55 kW.

^dBased on data from Denmark, Germany, Spain and Sweden. Depending on market perspective or production perspective, and different time periods, the range of PRs may differ. See for a complete overview (Neij et al., 2003, Chapter 8).

^eBased on data from Dannemand Andersen and Fuglsang (1996).

غالب منحنی های یادگیری در این منابع به تجزیه و تحلیل کاهش هزینه های توربین باد به ازای هر واحد ظرفیت پرداخته اند. لازم به ذکر است که نرخ پیشرفت برآورد شده در هر نوع منحنی یادگیری را مستقیماً با یکدیگر مورد مقایسه قرار داد.

الف: تفاوت های جغرافیایی:

مبحث دیگر مقایسه منحنی های یادگیری بر اساس تعداد توربین های نصب شده است. در این راستا مقایسه دو کشور ممکن است منجر به بروز اشتباهاتی در نتایج گردد. به عنوان مثال در آمریکا نرخ پیشرفتی برابر ۸۵.۷٪ و برای دانمارک حدود ۹۲ تا ۹۶٪ برآورد شده است. این مسأله قابل توجه است که در منحنی یادگیری دانمارک کل توربین های تولید شده و در آمریکا کل ظرفیت نصب شده مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت های عمده ای بین منحنی های یادگیری بر اساس توربین های تولید شده و توربین های نصب شده در یک کشور وجود دارد. به طور کلی می توان گفت در زمان وجود یک سامانه بزرگ یادگیری، تجزیه تحلیل بخش هایی از سامانه می تواند منجر به برآورد مقادیر غیرواقعی نرخ پیشرفت گردد.

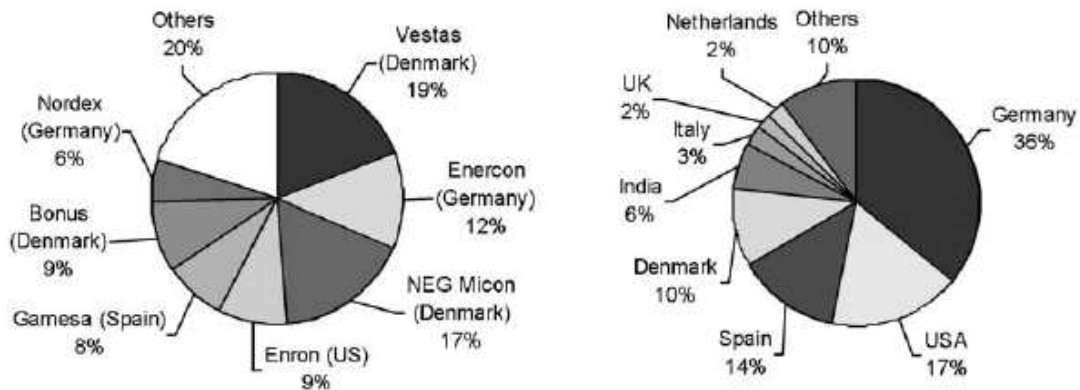
ب: تأثیر سیاست ها و اقدامات مختلف:

قیمت ها می توانند تحت تأثیر تغییر تقاضا و اقدامات حمایتی دولت دستخوش تغییر گردند.

منحنی یادگیری جهانی

الف: سامانه یادگیری جهانی

جهت کسب منحنی یادگیری جهانی، باید از یکنواخت بودن پراکندگی سامانه یادگیری به عنوان مثال در دسترس بودن نوآوری در کلیه مناطق جغرافیایی اطمینان حاصل نمود. بازار جهانی باد در دست ۷ سازنده توربین *Vestas*, *Enercon*, *NEG Micon*, *GE Wind*, *Gamesa*, *Bonus* و *Nordex* می باشد. تا سال ۲۰۰۲ شرکت های فوق الذکر حدود ۷۸٪ از بازار جهانی باد را در دست داشته اند (شکل ۵).



شکل ۵: پراکنش ظرفیت انرژی باد تولید شده در سطح جهان تا ابتدای سال ۲۰۰۲ بر اساس کشورها و سازندگان توربین باد

در میان کشورها، ۵ کشور آلمان، اسپانیا، دانمارک، آمریکا و هند طی دهه اخیر در زمره بزرگترین سازندگان توربین باد قرار گرفته اند. در این کشورها بیش از ۸۰٪ برق بادی جهان نصب گردیده است. کلیه تولیدکنندگان، مدل های توربین های باد در اندازه های مشابه (عمدتا ۶۰۰ کیلووات تا ۲ مگاوات) تولید کرده و در سراسر جهان آنها را توزیع می نمایند. به عنوان مثال توربین *Vestas V47(660 kW)*

در کشورهای نیوزلند، استرالیا، آمریکا، کره جنوبی، اسپانیا، آلمان، انگلستان و ایتالیا نصب شده است. بنابراین سازندگان بزرگ، توربین ها را در سراسر جهان توزیع کرده و از فناوری مشابهی استفاده می نمایند و می توان نتیجه گرفت که دانش و فناوری این شرکت ها در سطح جهان کاربرد یافته و می توان آن را به عنوان یادگیری جهانی لحاظ نمود. در مورد مزارع بادی سایر مؤلفه ها از قبیل احداث زیرساخت ها و اتصال به شبکه تا حدودی وابسته به یادگیری منطقه ای می باشد. از آنجاییکه غالب مزارع بادی توسط سازندگان توربین (مزارع بادی کلید در دست) احداث می گردد، بنابراین دانش این شرکت ها با مؤلفه های فوق الذکر نیز منتشر می گردد.

داده های مورد نیاز

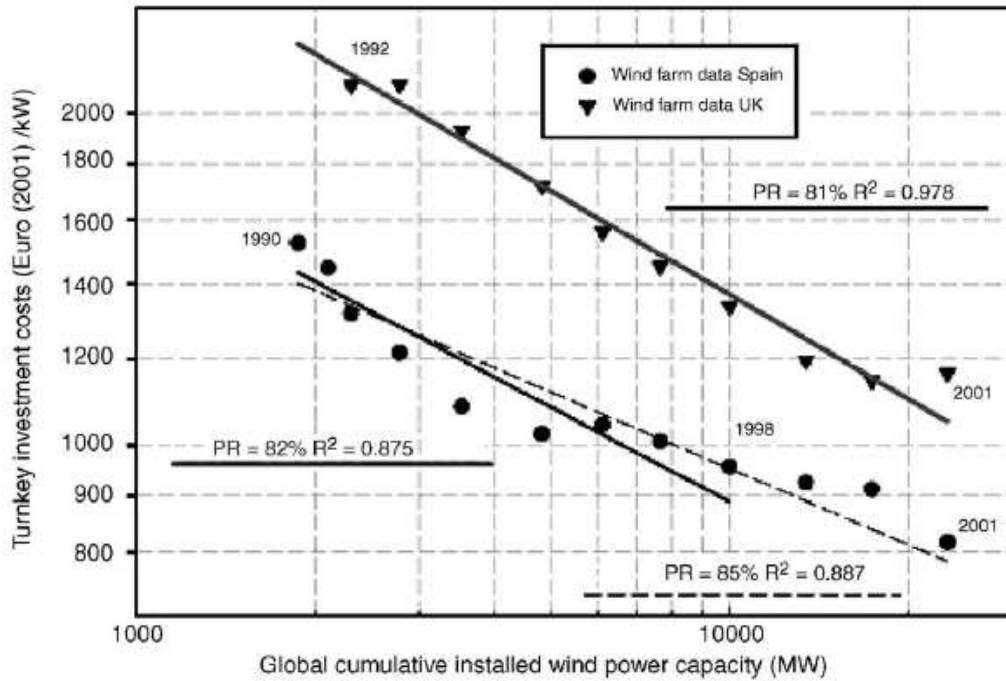
- مسئله مهم دیگر انتخاب داده های مناسب است. انتخاب دقیق داده ها جهت افزایش صحت منحنی یادگیری بسیار ضروری است. بنابراین پیشنهاد می گردد داده ها از ملزومات زیر برخوردار باشند:
- ۱- در هنگام استفاده از اطلاعات قیمت، اطلاعات مورد نظر از یک محیط رقابتی استخراج گردند.
 - ۲- زمان مورد مطالعه در مورد ظرفیت نصب شده حداقل ۵ سال یا بیشتر در نظر گرفته شود و حتی المقدور بین سری های زمانی فاصله وجود نداشته باشد.
 - ۳- بازار مورد نظر بین المللی باشد به این ترتیب که برای واردات از کلیه تولیدکنندگان عمده و محلی محدودیتی ایجاد نکند.
 - ۴- داده های کافی در هر سه موضوع وجود داشته باشد.

گزینه‌ها داده ها

به دلیل فقدان داده، تعیین منحنی یادگیری برای توربین های باد امکان پذیر نمی باشد. گرچه اطلاعاتی در مورد حجم توربین های سفارش داده شده در جهان وجود دارد اما این اطلاعات جهت رسم منحنی یادگیری توربین باد کافی نیست. همچنین به دلیل تفاوت سرعت باد بسته به شرایط سایت، نرخ بهره متفاوت و سایر عوامل، در مورد منحنی یادگیری هزینه برق بادی نیز داده های کافی وجود ندارد. اما در سال های اخیر هزینه های کلید در دست تعدادی از پروژه های مزارع بادی در کشورهای اسپانیا، آمریکا، استرالیا، انگلستان و .. در دست بوده است. بنابراین در این گزارش از این داده ها جهت برآورد منحنی یادگیری مزارع بادی استفاده گردیده است.

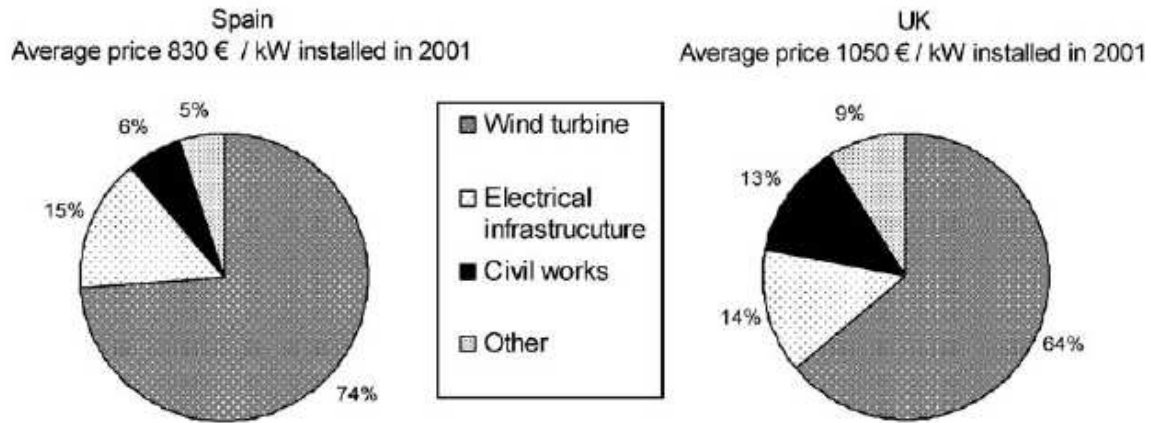
نتیجه

منحنی جهانی یادگیری بر اساس داده های کشورهای اسپانیا و انگلستان در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: منحنی جهانی یادگیری مزارع بادی بر اساس داده های مزارع بادی موجود در کشورهای انگلستان و اسپانیا (خط چین داده های مربوط به سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۱ و خط تیره داده های مربوط به سال ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۸ این کشور را نشان می دهند. داده های انگلستان از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۱ نشان داده شده اند).

نرخ پیشرفت محاسبه شده بر اساس داده های انگلستان ۸۱٪ و بر اساس داده های اسپانیا برابر ۸۵٪ بوده است. زمانی که تنها داده های محدوده زمانی سال های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۸ اسپانیا در نظر گرفته شود نرخ پیشرفت برابر ۸۲٪ خواهد بود. نتیجه حاصله این فرض را تأیید می نماید که کاهش هزینه ها در سال های اخیر نسبت به سال های اولیه از سرعت کمتری برخوردار بوده است. همانگونه که انتظار می رفت هزینه های سرمایه گذاری اسپانیا از هزینه های سرمایه گذاری انگلستان کمتر بوده است. این مسأله احتمالاً به دلیل بزرگ تر بودن میانگین اندازه مزارع بادی در اسپانیا بوده که منجر به میانگین هزینه کمتر برای عملیات عمرانی توربین ها و در نتیجه هزینه کمتر سرمایه گذاری در این کشور گردیده است (شکل ۷).



شکل ۷: میانگین هزینه های سرمایه گذاری کلید در دست مزارع بادی در کشورهای اسپانیا و انگلستان (داده های انگلستان بر اساس مزارع بادی ۵ مگاوات و داده های اسپانیا بر اساس مزارع بادی ۲۰ مگاوات بوده است. این اندازه ها بیانگر میانگین اندازه مزارع بادی در هر کشور بوده است).

لازم به ذکر است که نرخ های پیشرفت برآورد شده در این گزارش از مقادیر برآورد شده در سایر مطالعات به طور چشم گیری پایین تر است و علت آن است که در واقع کاهش قیمت ها سریع تر از چیزی بوده که در سناریوها و مدل ها پیش بینی شده است.

محدودیت های مطالعه

- هزینه های مزارع بادی عمدتاً بر اساس شرایط منطقه تعیین می گردد. عواملی نظیر دسترسی به اراضی مناسب، فاصله تا شبکه، میزان دسترسی و سرعت باد در بین مزارع مختلف بادی و همچنین کشورهای مختلف متفاوت می باشند. همچنین اندازه مزرعه بادی در تعیین هزینه ها مؤثر است.

- از آنجایی که بازار توربین های باد جهانی است، کاهش هزینه برای سایر مؤلفه ها همانند اتصال به شبکه، عملیات عمرانی، تأمین مالی پروژه و هزینه های تعمیر و نگهداری بیشتر به یادگیری در سطح محلی وابسته اند.
- مزارع بادی بزرگ نسبتاً ارزان ترند اما در مکان های پرجمعیت دسترسی به سایت های مناسب معمولاً امکان پذیر نیست که این مسأله از لحاظ اقتصادی دارای اثرات منفی بر پروژه می باشد.
- همانگونه که در گزارش ذکر گردید، نرخ پیشرفت مزارع باد و توربین های باد مستقیماً قابل مقایسه با یکدیگر نمی باشد. تنها هنگامی که نرخ کاهش هزینه سایر مؤلفه های یک مزرعه باد (از قبیل عملیات عمرانی و زیرساخت های الکترونیکی) با نرخ کاهش هزینه توربین برابر گردد، مقادیر نرخ پیشرفت قابل مقایسه هستند.

نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل ها نشان داد که انتخاب چارچوب زمانی، منطقه جغرافیایی، شاخص تورم و ... در منحنی یادگیری، منجر به ایجاد تفاوت های چشم گیری در نرخ پیشرفت می گردد. از آنجایی که منحنی یادگیری برای انواع مختلف فناوری های انرژی رسم گردیده و در هر کدام از منحنی ها از انواع داده های مربوط به کشورهای مختلف و در چارچوب زمانی مختلف استفاده شده، توصیه می گردد در به کارگیری آنها توجه ویژه ای به محدودیت ها و عدم قطعیت های موجود لحاظ گردد. در مورد مزارع باد، نرخ پیشرفت از ۷۷ تا ۸۵٪ بر اساس چارچوب زمانی، انتخاب کشور (اندازه مزارع باد) و شاخص تورم متفاوت است.

همانگونه که قبلا ذکر گردید، جنبه های اقتصادی افزایش ظرفیت، یکی از مهمترین عوامل کاهش هزینه در آینده خواهد بود. در حالیکه علوم جدید سهم زیادی در کاهش هزینه ها در آینده خواهد داشت، انتظار می رود مزارع بادی بزرگ مستقر در خشکی (و احتمالا مزارع بادی دریایی) از اثرات تولید انبوه منفعت بیشتری کسب نمایند (کاهش هزینه بیشتری را تجربه کنند).

علاوه بر موارد ذکر شده تجزیه و تحلیل ها نشان می دهد که حمایت دولت تأثیر زیادی بر کاهش قیمت توربین های باد دارد. ذکر این نکته ضروری است که سیاستمداران در هنگام استفاده از یک ابزار سیاستی جدید، اثر چتر را مد نظر قرار داده و از آن اجتناب کنند (به توضیحات مربوط به شکل ۱ مراجعه شود).

در تجزیه و تحلیل کاهش هزینه ها در آینده این گونه به نظر می رسد که مزارع بادی در مقیاس بزرگ به هزینه های سرمایه گذاری پایین تری نیاز دارند (به توضیحات مربوط به شکل ۷ مراجعه شود). بنابراین پیشنهاد می گردد سیاستمداران بیشتر بر توسعه مزارع بادی بزرگ هدف گذاری کنند که این امر نیازمند سیاست ها و بازیگران متفاوت است.

بررسی منحنی یادگیری فناوری باد در سه کشور دانمارک، آلمان و انگلستان

دانمارک

این کشور یکی از پیشگامان توسعه برق بادی در جهان به شمار می رود. در حال حاضر دانمارک بزرگ ترین تولیدکننده و صادرکننده توربین های باد بوده و در فاصله سال های ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۸ بیش از سه چهارم از ۵۵۰۰ مگاوات فناوری باد تولیدی این کشور صادر شده است.

دولت دانمارک با استفاده از سیاست های فشار تقاضا و فشار فناوری از توسعه برق بادی حمایت می کند. سرمایه گذاری در بخش تحقیق و توسعه، تأسیس و سرمایه گذاری در بخش آزمایشگاهی، استانداردها و ... مثال هایی از سیاست فشار فناوری^۱ محسوب می گردند. ابزارهای فشار تقاضا هم مشوق های مالی و هم اشکال مختلف قوانین را در بر می گیرد. طی سال های ۱۹۹۲ تا سال ۱۹۹۹ یارانه ای به مالکان توربین های باد در بخش خصوصی تعلق گرفت که میزان آن در سال ۱۹۹۹ به ۰.۲۷ کرون دانمارک بر کیلووات ساعت بالغ می گردید. اعطای یارانه منجر به تدوین قانونی گردید که طی آن مالکان نیروگاه های فسیلی موظف خواهند بود به مالکان توربین های بادی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی تا ۸۵٪ هزینه های تولید و انتقال را پرداخت نمایند.

آلمان

در این کشور ۲.۵٪ مصرف برق توسط برق بادی تأمین می گردد. سیاست این کشور در قبال برق بادی عمدتاً از طریق حمایت از سرمایه گذاری در بخش تحقیق و توسعه به ویژه در تحقیقات پایه، توسعه فناوری و پروژه های *demonstration* بوده است.

^۱ *Technology push*: از قدیمی ترین مدل های نوآوری به شمار رفته و بیشتر بر اساس فلسفه تولیدگرایی شکل گرفته است. در این مدل یک کشف جدید باعث پیش راندن فناوری می گردد. در این مدل تأکید زیادی بر تحقیق و توسعه وجود دارد. به عبارتی در این روش ابتدا فناوری به وجود آمده و نیاز به فناوری پس از خلق آن به وجود می آید.

در سال های اخیر قانونی اجرایی شده که بر مبنای آن تولیدکنندگان برق (از منابع فسیلی) موظف به خرید برق از منابع تجدیدپذیر و پرداخت درصد مشخصی از میانگین قیمت برق گردیده اند. در مورد انرژی باد با ظرفیت کمتر از ۵۰۰ کیلووات، نرخ بازگشت (سرمایه) ۹۰٪ است این بدان معناست که تولید کنندگان برق (فسیلی) موظفند ۹۰٪ از تعرفه میانگین مصرف کنندگان بخش خصوصی را به تولید کنندگان برق از منابع تجدیدپذیر پرداخت نمایند.

انگلستان

این کشور یکی از پهناورترین کشورهای قاره اروپا به شمار می رود اما برق بادی در این کشور از توسعه چندانی در آن برخوردار نمی باشد. برآورد شده که ۴۰٪ تا ۵۰٪ پتانسیل انرژی بادی در اروپا در این کشور واقع شده است. از سال ۱۹۸۹ قانونی مبتنی بر حمایت از تولید برق از منابع غیر فسیلی در این کشور اجرا می گردد. در این راستا تولید کنندگان مختلف برق جهت جذب حمایت دولت به ویژه در بخش برق بادی با یکدیگر به رقابت می پردازند.

هزینه تولید برق

میزان تولید برق از توربین باد در یک سال بسته به سرعت باد در محل نصب متفاوت خواهد بود. بنابراین با توجه به سرعت های مختلف باد، طیفی از هزینه های تولید برق از این منبع وجود خواهد داشت. هزینه ها مشتمل بر هزینه های سرمایه گذاری (هزینه های احداث نیروگاه و هزینه های اتصال به شبکه) و هزینه های تعمیرات و نگهداری خواهد بود. هزینه های سرمایه گذاری سهم بزرگی از کل

هزینه ها را در بخش برق بادی به خود اختصاص می دهند. گاهی این سهم به ۷۵٪ تا ۹۰٪ کل هزینه ها نیز بالغ می گردد. در هزینه تعمیرات و نگهداری نیز هزینه سوخت لحاظ نمی گردد. عوامل فنی و مالی مانند نرخ اجاره بها یا زمان بازگشت سرمایه بر نرخ برق تولید تأثیرگذار است. عوامل فنی تعیین کننده میزان برق تولیدی از یک توربین و چگونگی چیدمان توربین ها در یک مزرعه بادی خواهند بود. هزینه تولید برق بادی در میان کشورهای مختلف متفاوت می باشد اما روند آن نشان دهنده ارزان شدن برق بادی است. کاهش هزینه های برق بادی به دلیل بهبود فناوری توربین های باد (تولید ارزان تر توربین و بهره وری بیشتر) و بزرگ شدن توربین ها (افزایش ظرفیت) به معنای کاهش تعداد توربین های مورد نیاز جهت تولید همان میزان برق و در نتیجه کاهش هزینه های مربوط به زیرساخت ها می باشد. در ضمن تأمین منابع مالی نیز با توجه به اطمینان و اعتماد به این فناوری نیز با سهولت بیشتری انجام خواهد گرفت.

منحنی یادگیری برق بادی

عوامل تأثیرگذار بر نرخ یادگیری

به طور کلی کاهش هزینه در اثر ۵ عامل، پیشرفت فناوری، تغییر قیمت های ورودی (هزینه مواد اولیه به علاوه هزینه نگهداری)، افزایش راندمان، یادگیری توسط انجام کار و مقیاس (به عنوان مثال ظرفیت توربین باد) تعیین می گردد. جهت توضیح ارتباط بین هزینه ها و تولید انبوه (به عنوان اصلی ترین فرض)، α (نرخ یادگیری) به عنوان تابعی از چند عامل ذیل مشخص می گردد:

- سرمایه گذاری در بخش تحقیق و توسعه (توسط بخش خصوصی یا دولتی) به منظور افزایش

پیشرفت فناوری

• سایر سیاست ها و اقدامات انجام شده در راستای افزایش و بهبود فناوری و در نتیجه کاهش

هزینه ها (از قبیل سیاست های فشار فناوری)

• تغییر در قیمت های ورودی به منظور توسعه فناوری های بالادستی و افزایش سطح تولید انبوه

• رقابت در بازار که منجر به بهبود راندمان می گردد

• مسائل اقتصادی مربوط به مقیاس تولید

• سایر متغیرهای وابسته به فناوری

به این ترتیب خواهیم داشت:

$$\alpha = a(R, m, p)$$

که در آن R برابر بودجه های تحقیق و توسعه، m سیاست فشار فناوری و p برابر تغییر قیمت ها است.

دانمارک

منحنی یادگیری هزینه هر کیلووات ساعت برق بادی در این کشور طی دوره ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۹ نرخ

پیشرفتی^۱ برابر ۹۲.۲٪ داشته است. کاهش هزینه به ویژه در ابتدای دوره سریع تر بوده و هر چه به

انتهای دوره نزدیک می گردد از شدت آن کاسته می گردد. حاصل تقسیم منحنی یادگیری به دو دوره

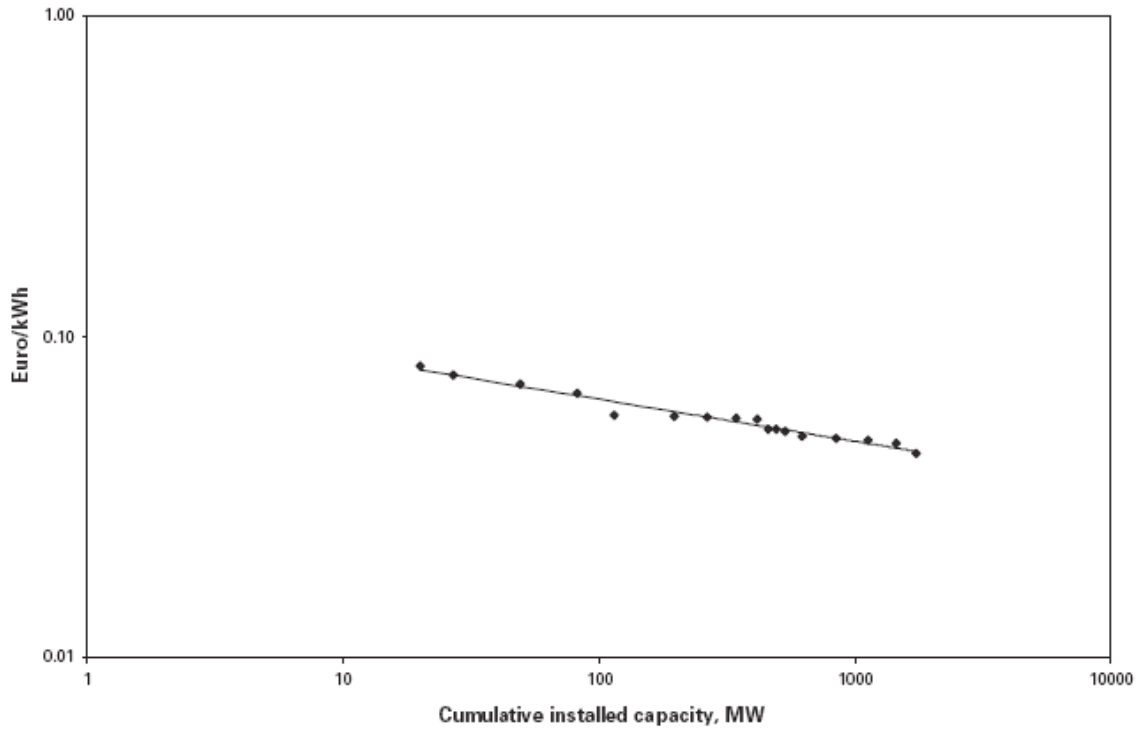
سال های ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۸ و ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۸ نرخ پیشرفتی برابر ۸۸.۳ و ۹۲.۵٪ خواهد داشت. این بدان

معنی است که در مورد فناوری برق بادی مستقر در خشکی، کشور دانمارک در بخش انتهایی منحنی

یادگیری قرار داشته و در نتیجه آن فناوری در مرحله بلوغ بوده، کاهش هزینه ها در اثر یادگیری با

انجام کار روی داده و کاهش بیشتری در هزینه ها پیش بینی نمی گردد (شکل ۸).

^۱ Progress ratio = 2^{-E}

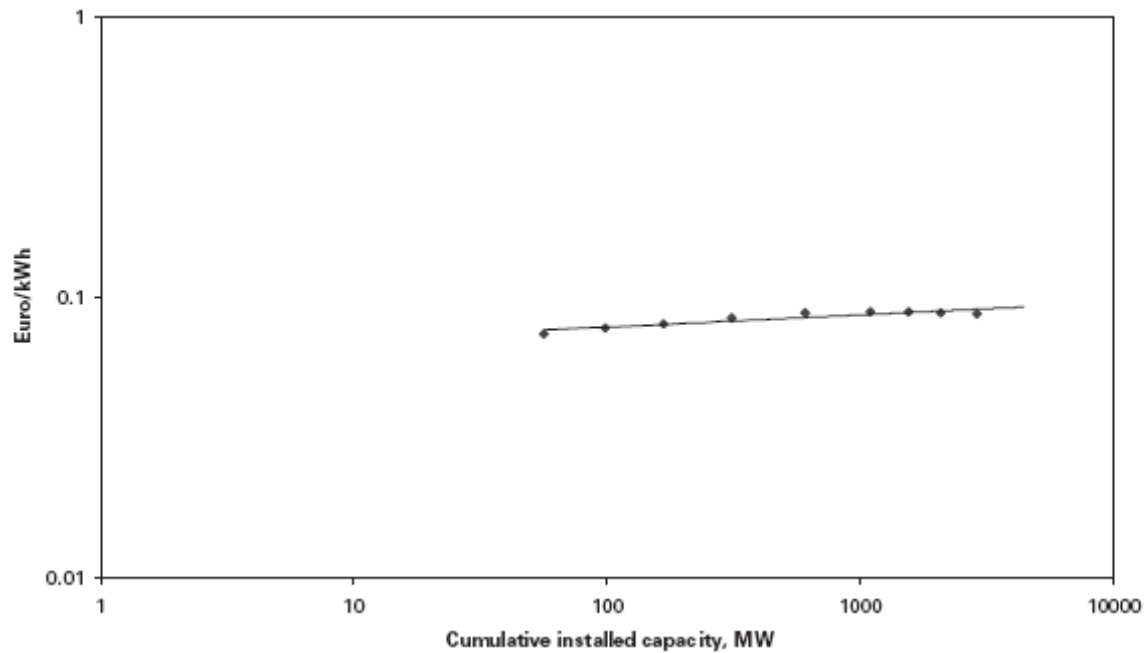


شکل ۸: روند هزینه های تولید برق بادی در هر کیلووات ساعت در کشور دانمارک بر اساس ظرفیت نصب شده طی دوره ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۹ (مقیاس لگاریتمی)

آلمان

به دلیل عدم وجود داده های کافی در مورد هزینه های تولید برق هر کیلووات ساعت، منحنی یادگیری برق بادی این کشور مستقیماً قابل مقایسه با منحنی یادگیری دو کشور دانمارک و انگلستان نیست. برآورد اولیه منحنی یادگیری توربین های بادی در آلمان طی دوره سال های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۸، نرخ پیشرفتی برابر ۹۲٪ داشته و این نشان دهنده کاهش سریع هزینه های تولید برق طی این دوره است. این منحنی یادگیری بیانگر نرخ پیشرفت کمتری نسبت به منحنی یادگیری کشور دانمارک می باشد. منحنی یادگیری این کشور به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات هزینه های تولید برق، با استفاده از تعرفه های پرداختی به تولیدکنندگان برق (بادی) به عنوان تخمینی از هزینه های تولید برق به دست

آمده است. استفاده از تعرفه ها منجر به پیش بینی نرخ پیشرفت ۱۰۳٪ گردید و این بدان معناست که هزینه ها با نرخ ۳٪ به ازای هر دو برابر شدن ظرفیت نصب شده افزایش خواهند یافت. نرخ پیشرفت بیش از ۱۰۰٪ هنگامی روی می دهد که سر جمع هزینه ها نتواند به سرعت هزینه های تغییرات طراحی و بهبود عملکرد محصول کاهش یابد (شکل ۹).

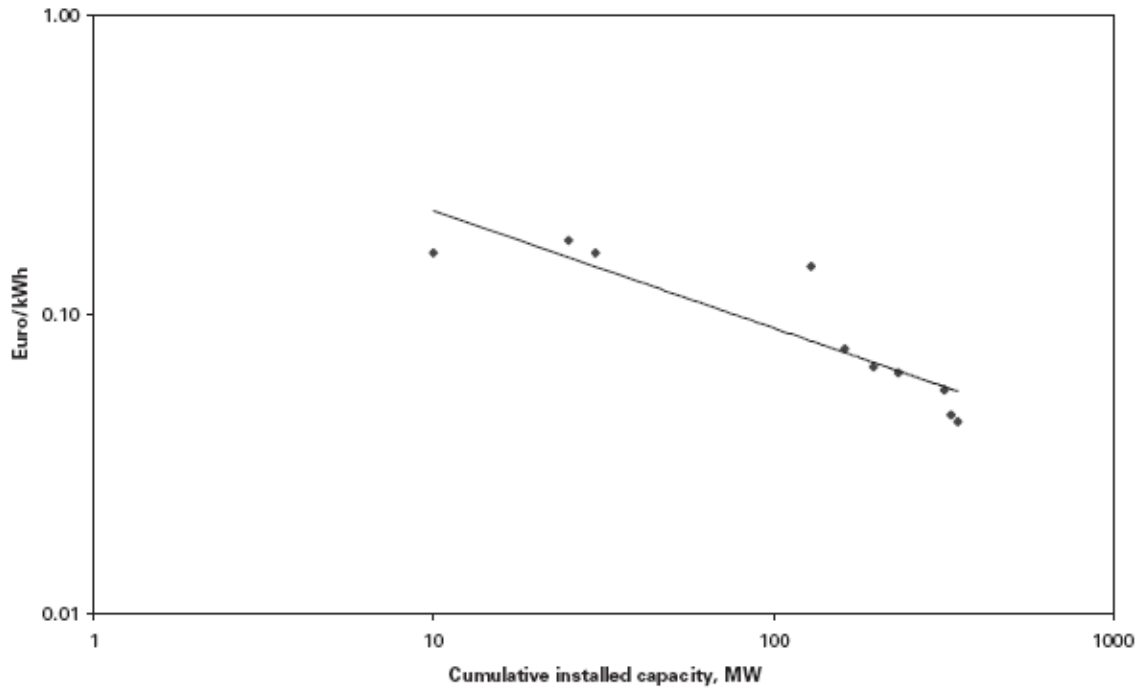


شکل ۹: روند تعرفه های پرداختی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی در بخش برق بادی آلمان بر اساس ظرفیت نصب شده طی سال های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۹ (مقیاس لگاریتمی)

انگلستان

در منحنی یادگیری این کشور به دلیل در دسترس نبودن هزینه ها، از قیمت پرداختی به تولیدکنندگان برق بادی استفاده شده است. در نتیجه منحنی یادگیری هزینه هر کیلووات ساعت برق بادی، نرخ

پیشرفت ۷۴.۹٪ را برای دوره سال های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ نشان داد که کمترین میزان نرخ پیشرفت در بین سه کشور مورد بررسی است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: روند هزینه های تولید هر کیلووات ساعت برق در بخش برق بادی انگلستان بر اساس ظرفیت نصب شده طی سال های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ (مقیاس لگاریتمی)

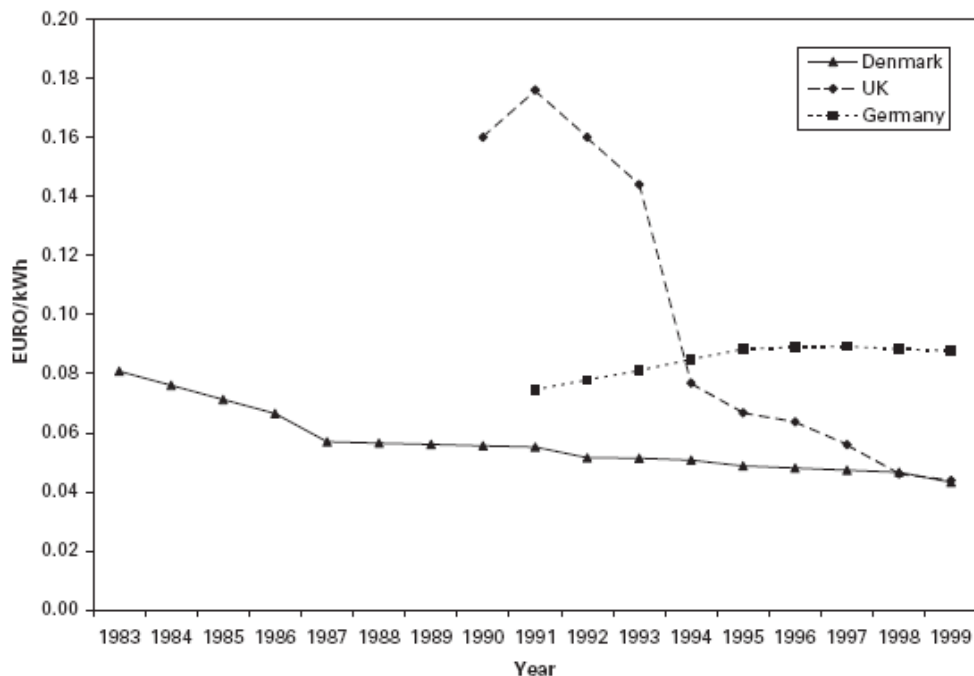
مقایسه منحنی های یادگیری

در جدول ۳: نرخ پیشرفت برآورد شده در سه کشور آورده شده است.

جدول ۳: تخمین نرخ پیشرفت فناوری باد در سه کشور مورد بررسی

کشور	دوره زمانی	نرخ پیشرفت	ظرفیت نصب شده تا سال ۱۹۹۹	سهم برق بادی (%)
دانمارک	۱۹۸۴-۱۹۹۹	۹۲	۱۷۳۳	۱۰
	۱۹۸۴-۱۹۸۸	۸۸		
	۱۹۸۸-۱۹۹۹	۹۳		
آلمان	۱۹۹۱-۱۹۹۹	۹۲-۱۰۳	۴۴۴۴	۲
انگلستان	۱۹۹۱-۱۹۹۹	۷۲	۳۵۰	

در شکل ۱۱ نیز روند قیمت ها در این سه کشور بر اساس یورو بر کیلووات ساعت با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۱: روند قیمت ها/ تعرفه ها در هر کیلووات ساعت برق بادی در سه کشور انگلستان، آلمان و دانمارک طی سال

های ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۹ (یورو بر کیلووات ساعت)

دلیل تفاوت منحنی های یادگیری و نرخ پیشرفت در کشورهای مختلف چگونگی حمایت از تحقیق و توسعه، سیاست های فشار فناوری، تغییر قیمت های ورودی، رقابت در بازار و ... خواهد بود. بر اساس تجزیه تحلیل انجام شده عوامل ذیل بر منحنی یادگیری تأثیر گذارند:

- تحقیق و توسعه: در این بخش حمایت های مستقیم دولت از برق بادی در نظر گرفته شده است (میانگین حمایت سالانه دولت به یورو).
- سیاست های فشار فناوری: به دلیل عدم وجود داده های مالی قابل مقایسه برای چنین سیاست هایی، از متغیر (۰) عدم وجود یا وجود اندک سیاست های فشار فناوری و (۱) در صورت انجام اقدامات مشابه استفاده شده است. برای دانمارک و آلمان این متغیر (۱) و برای انگلستان (۰) فرض شده است.
- تغییر در قیمت های ورودی: در مورد برق بادی، مهمترین قیمت ها، قیمت توربین های باد و نرخ بهره می باشد. در این خصوص دانمارک و آلمان به دلیل ساخت توربین های بزرگ باد از این مزیت برخوردارند.
- رقابت در بازار: این پارامتر برای دانمارک و آلمان، (۰) در نظر گرفته شده و این بدان معناست که رقابت در بازار برق بادی برای هر کشوری برابر است. برای انگلستان این پارامتر (۱) در نظر گرفته شده یعنی فرض شده که سیستم مناقصه میزان بالاتری از رقابت را در بازار برق بادی ایجاد می کند.
- اندازه توربین: مسائل اقتصادی مختلفی را می توان به اندازه توربین مربوط نمود. در این گزارش میانگین ظرفیت توربین مدنظر بوده است. این مقادیر در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول ۴: عوامل تأثیرگذار بر منحنی یادگیری

کشور	دوره زمانی	هزینه های تحقیق و توسعه (میلیون یورو)	فشار فناوری	رقابت	مقیاس توربین (کیلووات به ازای هر توربین)**	میزان یادگیری
دانمارک	۱۹۸۴-۱۹۹۹	۲.۴۹	*۱	۰	۱۳۰(۲۷۷)	-۰.۱۲
	۱۹۸۴-۱۹۸۸	۱.۳۹	*۱	۰	۶۴(۹۴)	-۰.۱۸
	۱۹۸۸-۱۹۹۹	۳.۴۳	*۱	۰	۱۷۷(۲۷۷)	-۰.۱۱
آلمان	۱۹۹۱-۱۹۹۹	۳.۰۱	۱	۰	۳۰۵(۵۶۴)	-۰.۱۲ تا ۰.۰۴
انگلستان	۱۹۹۱-۱۹۹۹	۳.۶۷	۰	۱	-(۴۶۸)	-۰.۴۰

* ایستگاه تحقیقاتی *Risoe* با هزینه ای بالغ بر ۱ میلیون یورو در سال تأمین اعتبار شده است.

** ارقام خارج پرائنتر بیانگر میانگین کل دوره و ارقام داخل پرائنتر میانگین آخرین سال را نشان می دهند.

از جدول ۴ چنین استنباط می گردد که رقابت عامل مؤثری در یادگیری به شمار می رود به همین دلیل کشوری مانند انگلستان با پایین ترین نرخ یادگیری از دو کشور دیگر متمایز می گردد. بر خلاف تصور، اثر منفی سیاست های فشار فناوری به عاملی مثبت و فزاینده نرخ یادگیری مبدل شده است. سرمایه گذاری دولتی در بخش تحقیق و توسعه تفاوت چندانی در بین کشورهای مورد مطالعه ایجاد نکرده است. در مورد عامل مقیاس توربین ها (بزرگی یا کوچکی اندازه) نیز اثر بر یادگیری ناچیز بوده است. متغیرهای وابسته به فناوری از قبیل سرعت باد نیز بر قیمت برق بادی مؤثرند. این متغیر بر روی شیب منحنی اثرگذار نیست اما موقعیت مکانی آن را تغییر می دهد به همین جهت در مقایسه کیفی منحنی ها در این گزارش این پارامتر لحاظ نشده است. اما به جهت درک اهمیت سرعت باد، میزان برق تولیدی (به کیلووات ساعت) به ظرفیت نصب شده (به وات) محاسبه و نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: عوامل تأثیرگذار بر منحنی یادگیری

کشور	$(kWh/W)^*$	نرخ یادگیری
آلمان ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۹	۱.۵۵(۱.۶۰)	۰.۰۴ تا ۰.۱۲-
دانمارک ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۹	۱.۶۸(۱.۹۳)	۰.۱۲-
انگلستان ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۹	۱.۷۷(۲.۶۶)	۰.۴۰-

* اعداد خارج پراتنز میانگین کل دوره و اعداد داخل پراتنز میانگین سال ۱۹۹۸ را نشان می دهند.

به نظر می رسد در سه کشور مورد مطالعه، کشورهای دانمارک و آلمان از مناسب ترین سایت های برق بادی خود قبلا بهره برداری کرده بنابراین نیروگاه های بادی جدید از ظرفیت تولید کمتر (به دلیل مکان نامناسب در مقایسه با سایت های اولیه) و در نتیجه هزینه های بالاتر تولید برخوردار باشند. به نظر می رسد در کشور انگلستان به دلیل وجود مقررات خاص، نسبت به دو کشور دانمارک و آلمان مقاومت بیشتری نسبت به استفاده از برق بادی وجود دارد.

عامل دیگری که می تواند تغییرات قیمت را تحت تأثیر قرار دهد، ظرفیت نصب شده است. توربین های باد باید در مکان های مشخص و محدودی نصب شوند. هزینه ها ممکن است به دلیل نصب توربین ها در مناطق دورافتاده و غیرقابل دسترس و یا به دلیل افزایش قیمت اراضی، افزایش یابند.

در واقع می توان گفت منحنی یادگیری فناوری باد در کشورهای مختلف دارای تفاوت های اساسی با یکدیگرند.

نتیجه گیری

بررسی عوامل تأثیرگذار بر منحنی یادگیری فناوری برق بادی در سه کشور آلمان، دانمارک و انگلستان نشان داد که سیاست های افزایش دهنده رقابت میان تولیدکنندگان برق می تواند مشوق کاهش هزینه ها قلمداد گردد. از سوی دیگر رقابت شدید نیز مانعی جهت گسترش فناوری محسوب می گردد که مثال آن کشور انگلستان است. کشورهای دانمارک و آلمان شرایط مساعد بازار را برای مالکان توربین های باد فراهم نموده اند و همین امر موجب افزایش ظرفیت نصب شده در این کشورها گردیده است.

نتیجه دیگر اینکه بر خلاف انتظار، به کارگیری زیاد سیاست های فشار فناوری همانند سرمایه گذاری مستقیم در بخش تحقیق و توسعه به جای کاهش هزینه منجر به افزایش آن می گردد. به عبارت دیگر سیاست هایی از این دست مشوق به کارگیری فناوری های پیشرفته است که چندان کم هزینه هم نیستند. لازم به ذکر است که به جهت محدودیت داده ها، نتایج حاصل از این گزارش را باید با احتیاط تفسیر نمود.

منابع و مراجع مورد استفاده

1. <http://www.radiotejarat.ir>
2. <http://www.msrt.ir>
3. <http://www.iran20.ir>
4. <http://seifd.blogfa.com>
5. M.Junginer, A.Faiij, W.C. Turkenburg. *Global experience curves for wind farms. Energy Policy 33 (2005) 133-150*
6. Karin Ibenholt. *Explaining learning curves for wind power. Energy Policy 30 (2002) 1181-1189*