Fraunhofer
ISE

معهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية

تكلفة الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة في مصر

ديسمبر ٢٠١٦

funded by

Federal Foreign Office

شكر وتقدير

هذه الدراسة كانت مبادرة وتم تمويلها من سفارة جمهورية ألمانيا الاتحادية بالقاهرة ووزارة الخارجية الألمانية.
المؤلفون يشكرون الشريك المصري سولارايز إيجيبت وكل من ساهم من مجال الصناعة في مصر وألمانيا بإضافات أو مناقشات مثمرة.

تكلفة الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة في مصر

إصدار ديسمبر ٢٠١٦

نهى سعد حسين
محمد أبو كرش
كريستوف كوست
توماس شليجل

معهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية

المحتويات

الملخص	٣
١- الغرض من الدراسة	٦
٢- التطور التاريخي لتكنولوجيات الطاقة المتجددة في مصر	٨
٣- الخلفية والمنهجية والفرضيات	١١
٤- النتـــائج - حساب تكلفة إنتاج الكهرباء	١٩
٥- الملحق	٢٧
٦- المراجع	٢٩

الملخص

سعر الكهرباء من تكنولوجيات الطاقة المتجددة في مصر ديسمبر ٢٠١٦

استندت هذه الدراسة في المنهجية المتبعة لتكلفة إنتاج الكهرباء على الدراسات السابقة Kost, Schlegl December 2010، Kost et al. 2012 and Kost et al. 2013 بالنسبة للوضع في ألمانيا. تجرى الدراسة الحالية من أجل السوق المصرية آخذة في الاعتبار الاتجاه في تطور التكلفة.

تكلفة إنتاج الكهرباء تمثل القاعدة التي يتم عليها عقد مقارنة بين تكلفة كل نوع من التكنولوجيات المولدة للطاقة. وهذا المفهوم يجعل المقارنة بين التكنولوجيات المختلفة أكثر دقة وليس مناظرًا أو معادلاً لتعويض تغذية الشبكة أو يخدم كقرار كافي للاستثمار لكل نوع من محطات الطاقة. تحدد القيمة الفعلية للكهرباء في حالات العرض والطلب بناءًا على التغيرات اليومية والتغيرات في كل ساعة والتذبذبات المصاحبة للمناخ. لذلك فهي لا تُمثَّل بتكلفة إنتاج الكهرباء. يوجد معلومات عن منهجية حساب تكلفة إنتاج الكهرباء في ملحق الدراسة.

تم في هذه الدراسة تحليل تكلفة إنتاج الكهرباء في الربع الثالث من ٢٠١٦ . كما تم التنبؤ بتطور التكلفة المستقبلية حتى عام ٢٠٣٥ استنادًا إلى النطاق التاريخي للتعلم وسيناريوهات التطور في الأسواق.

تركز الدراسة على تكلفة إنتاج الكهرباء للفوتوفولتية والطاقة الشمسية المركزة وطاقة الرياح في مصر. وللأغراض المرجعية فإن تطور تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الطاقة التقليدية المبنية حديثًا (مولدات الديزل ومحطات الغاز بنظام الدورة المركبة) خضعت أيضًا للتحليل في هذه الدراسة.

الشكل رقم ١ يوضح تكلفة إنتاج الكهرباء لتكنولوجيات الطاقة المتجددة ومحطات الطاقة من الوقود النفطي المبنية في ٢٠١٦.

وتحصل المحطات الفوتوفولتية على تكلفة إنتاج الكهرباء بقيمة ٠,٠٧٩ و٠,١٨١ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في الربع الثالث من ٢٠١٦ اعتمادًا على نوع محطة الطاقة سواءًا أرضية أو على أسطح المباني والتي تحصل على أشعة شمسية ١٩٠٠ إلى ٢٧٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢ من الإشعاع الأفقي العالمي في مصر. تصل أسعار محطات الطاقة الفوتوفولتية من ١٣٠٠ - ٢٠٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات مع الأخذ في الاعتبار أن المحطات الفوتوفولتية الأرضية يكون الاستثمار النوعي بها أقل وبالتالي تكلفة إنتاج الكهرباء.

تتراوح تكلفة إنتاج الكهرباء من محطات الطاقة الشمسية المركزة باستثمار نوعي ٤٠٠٠ - ٥٢٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات ما بين ٠,١٢٥ و٠,٢١٨ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. ولا تدخل الحرارة الناتجة في حساب تكلفة إنتاج الكهرباء لهذه التكنولوجيا.

إن تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الطاقة المولدة من الرياح على اليابسة في المناطق التي تكون فيها قوة الرياح مواتية تكون أقل منها لمحطات الديزل ومحطات الغاز ذات الدورة المركبة. إن تكلفة إنتاج الكهرباء من محطات الرياح في المناطق الساحلية باستثمار نوعي ١١٠٠ إلى ١٥٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات تتراوح بين ٠,٠٤٥ و٠,١٠٢ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة.

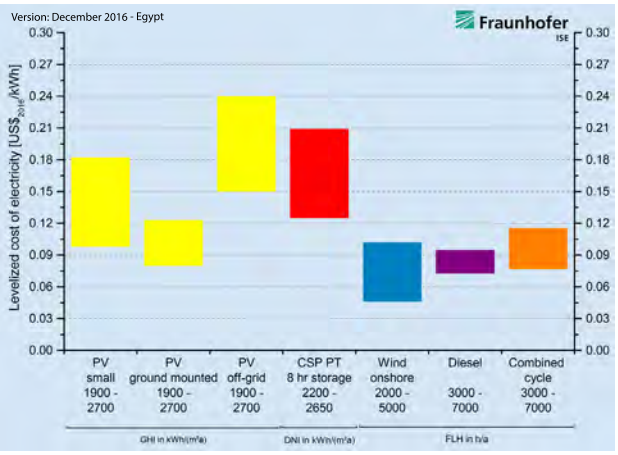

Figure 1: Levelized cost of electricity (LCOE) of renewable energy technologies and conventional power plants at locations in Egypt in 2016. The value under the technology refers in the case of PV to the global horizontal irradiance GHI in kWh/(m²a), for CSP the direct normal irradiance DNI kWh/(m²a), for the other technologies it refers to the number of full load hours for the plant per year. Specific investments are taken into account with a minimum and maximum value for each technology.

أما في حالة محطات الطاقة التقليدية فإن تكلفة إنتاج الكهرباء من محطات الغاز ذات نظام الدورة المركبة تتراوح بين ٠,٠٧٦ و٠,١١٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة . وفي حالة مولدات الديزل تكون

تكلفة إنتاج الكهرباء ٠,٠٧٢ و ٠,٠٩٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. يتم دمج عدد ساعات التحميل القصوى للمحطات التقليدية في حساب تكلفة إنتاج الكهرباء. كما يفترض أن سعر الوقود سوف يزيد في السنوات القادمة. وتعكس القيم في الشكل١ مستوى ساعات التحميل القصوى وتذبذب حجم الاستثمار في سنة ٢٠١٦.

تنبؤ تكلفة إنتاج الكهرباء في مصر حتى عام ٢٠٣٥

يبين الشكل ٢ نتيجة حساب التطور في مستقبل تكلفة إنتاج الكهرباء في مصر حتى عام ٢٠٣٥. ويعكس نطاق الأسعار النطاق الحالي لحساب العوامل وهي على سبيل المثال (أسعار المحطات والإشعاع الشمسي وأحوال الرياح وأسعار الوقود وساعات التحميل القصوى ... الخ). يمكن مشاهدتها في الجداول ١ إلى ٥. وسوف يتم شرح هذه المنهجية لنطاق سعر المحطات الفوتوفولتية: الحد الأقصى لتكلفة إنتاج الكهرباء من مجموع محطة طاقة فوتوفولتية ذات قيمة شرائية عالية في موقع يتمتع بإشعاع شمسي منخفض مثل في شمال مصر. وعلى عكس هذا فإن الحد الأدنى للأماكن المفضلة للمحطات الشمسية يُحدَّد حيث الإشعاع الشمسي مرتفع وذلك في جنوب مصر. وبطريقة مماثلة يتم تطبيق هذه العملية بالقيم المرجعية المطابقة لطاقة الشمس المركزة وطاقة الرياح وكذلك محطات الطاقة التقليدية.

تشمل الحسابات القيمة التمويلية في السوق والرسوم الإضافية المرتبطة بالمخاطر بالتفصيل وذلك لكل التكنولوجيات. ويمثل ذلك مقارنة واقعية لمواقع المحطات ومخاطر التكنولوجيا وتكلفة التطوير. ويكون لمستوى القيمة المالية تأثيرًا ملحوظًا على تكلفة إنتاج الكهرباء وأيضا تنافسية التكنولوجيا. بالإضافة إلى هذا، تحسب كل التكاليف ونسب الخصم في هذه الدراسة بقيمة حقيقية وذلك بالدولار الأمريكي (مرجع ٢٠١٦).

تم حساب الاستثمار النوعي للمحطات بناءًا على دراسة السوق ودراسات التكلفة.

إن تطور سوق الفوتوفولتية يؤدي إلى نسبة تقدم بقيمة ٨٥٪ (بالتطابق مع معدل تعلم ١٥٪). الأمر الذي سيؤدي إلى مزيد من انخفاض الأسعار. فبحلول ٢٠٣٥ سنجد أن تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الفوتوفولتية الأرضية ستنخفض إلى ٠,٠٥٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. وعندها ستنافس المحطات الأرضية محطات توليد الطاقة من الرياح وكذلك تكلفة إنتاج الكهرباء المتزايدة من محطات الغاز ذات نظام الدورة المركبة (٠,٠٧٨ إلى ٠,٠٨٧ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة) وأيضا مولدات الديزل (٠,٠٩٠ إلى ٠,٠٩٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة). وتصل استثمارات مولدات الديزل إلى ١٧٠ - ٣٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات. أما محطات الفوتوفولتية الأرضية فسوف تنخفض انخفاضا ملحوظا في مصر بحلول ٢٠٣٥

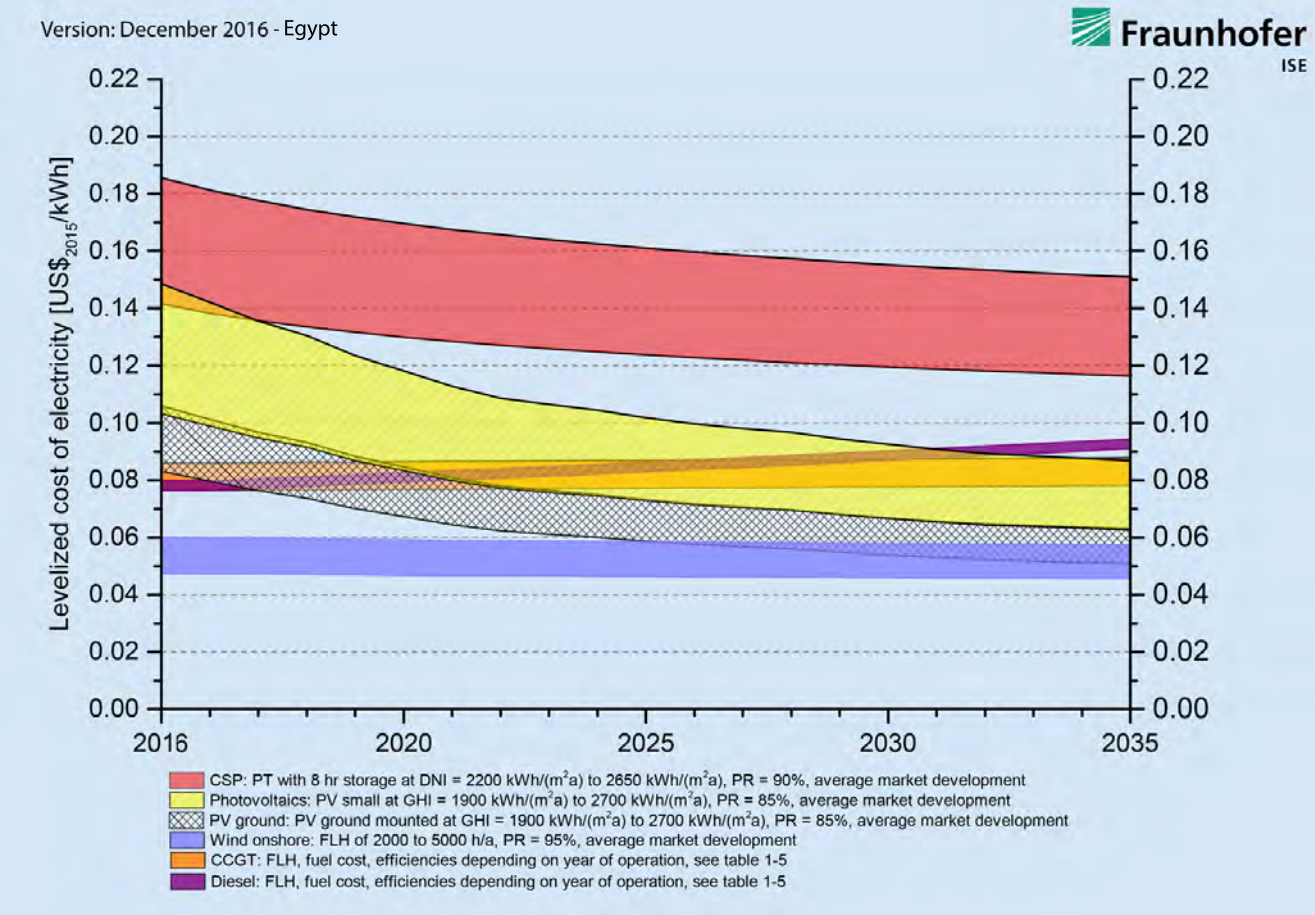

Figure 2: Learning-curve based predictions of the levelized cost of electricity of renewable energy technologies and conventional power plants in Egypt by 2035. Calculation parameters in Tables 1 to 5.

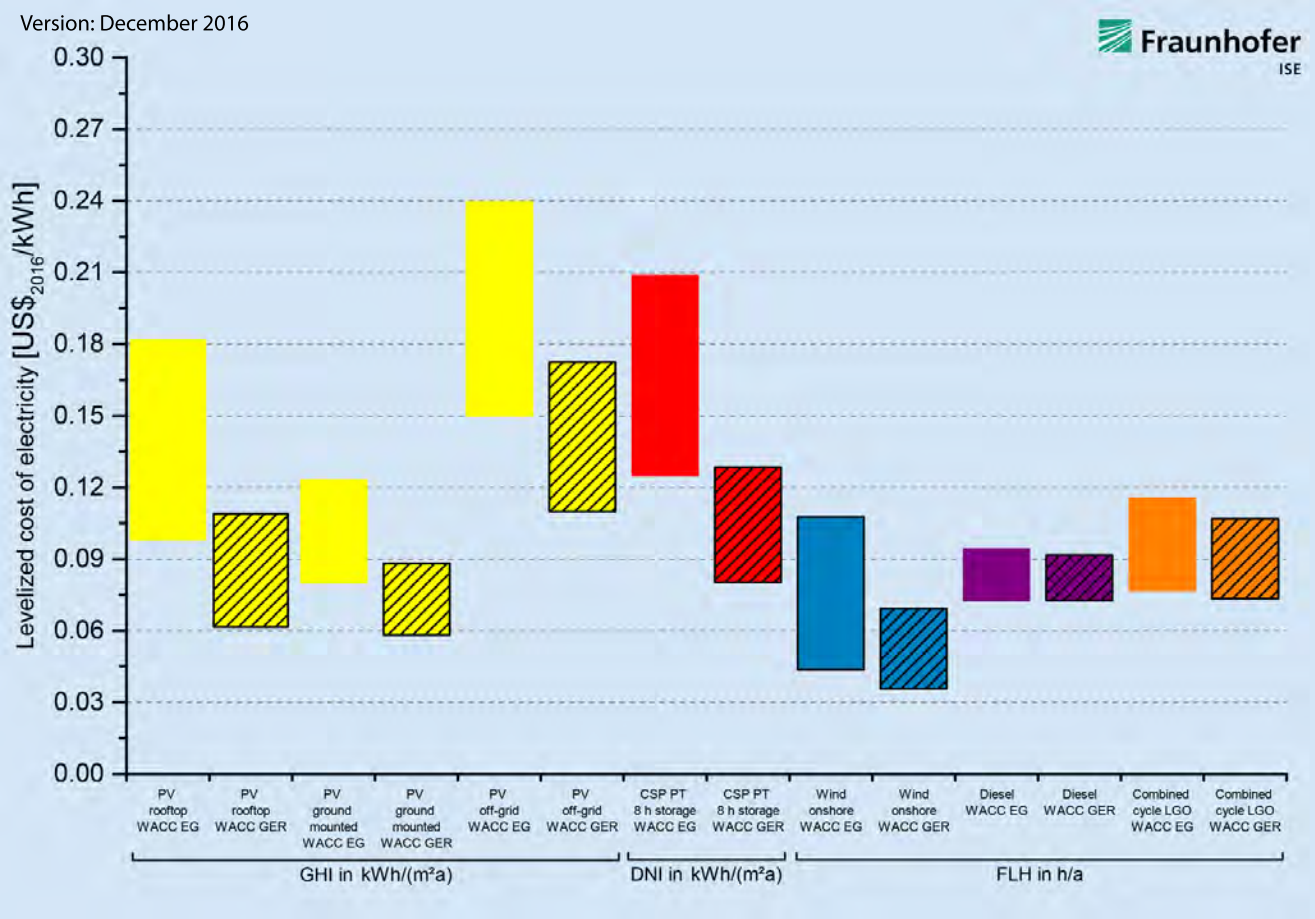

Figure 3: LCOE of renewable energy technologies and conventional power plants at locations in Egypt in 2016. The dashed bars show the level of LCOE under the assumption of financing costs like in Germany.

وتصبح تكلفة إنتاج الكهرباء أقل من جميع المحطات ذات الوقود النفطي.

نجد اليوم أن تكلفة إنتاج الكهرباء من محطات طاقة الرياح على الساحل منخفضة جدًا وسوف تنخفض إلا أنها ستنخفض بدرجة قليلة في المستقبل. ويُتوقَع تحسن بالدرجة الأولي على هيئة زيادة عدد ساعات التحميل القصوى وتطوير مواقع جديدة مع توربينات رياح متخصصة. ويعود الفضل في ذلك إلى ارتفاع الأسعار لمحطات الوقود النفطي. وستواصل تنافسية محطات الرياح الساحلية التحسن. فبدءًا من ٢٠٢٧ ستحدد الظروف المحلية إذا ما كانت محطات الرياح الساحلية سوف تنتج كهرباء بتكلفة أقل من تلك المنتجة من محطات الفوتوڤولتية.

تعتبر تكلفة إنتاج الكهرباء أكثر حساسية للعوامل المالية في الأماكن المحددة ولكل نوع من التكنولوجيا. التكلفة التمويلية المرتفعة نسبيًا في مصر تؤدي إلى تكلفة إنتاج الكهرباء عالية من الفوتوفولتية والطاقة الشمسية المركزة بالرغم من الإشعاع الشمسي العالي جدًا في مصر.

بافتراض شروط مالية مناسبة في سوق ناضجة بالنسبة للطاقات المتجددة مثل ألمانيا. فإننا نجد أن تكلفة إنتاج الكهرباء تتناقص بدرجة ملحوظة. الشكل ٣ يبين تأثير تحسن الظروف التمويلية في مصر عند تطبيق شروط تمويل لسوق طاقة متجددة ناضجة مثل الوضع في ألمانيا.

١- الغرض من الدراسة

إن تكلفة إنتاج الكهرباء لكل تكنولوجيات الطاقة المتجددة شهدت انخفاضًا مستمرًا لعصور كثيرة وذلك في المقابل من التوجه لزيادة أسعار الطاقة المولدة من المواد البترولية والأخرى النووية، وأيضا رفع الدعم التدريجي عن المواد البترولية. هذا التطور نشأ عن ابتكارات تكنولوجية مثل استخدام مواد أفضل وأرخص والاستهلاك الأقل للمواد، وعمليات الإنتاج الأكثر فاعلية، وأيضا زيادة الفاعلية والكفاءة مع التوسع في الأنظمة.

لهذا السبب فإن الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحليل التكلفة في الوقت الحالي وفي المستقبل وعلى وجه الخصوص لتكنولوجيات الطاقة المتجددة ومقارنتها بالأخرى المعتمدة على التكنولوجيا التقليدية.

المحتوى المركزي للدراسة

- تحليل الوضع الحالي والمستقبلي لتطور كل من محطات الفوتوفولتية والطاقة الشمسية المركزة ومحطات توليد الطاقة من الرياح في مصر.
- النمذجة الاقتصادية لتكلفة إنتاج الكهرباء (الوضع في لربع الثالث سنة ٢٠١٦) وذلك للأنواع المختلفة من المحطات والظروف المحلية (مثل الإشعاع الشمسي وحالة الرياح) استنادًا إلى ظروف السوق.
- تقييم التكنولوجيات المختلفة والمؤشرات الاقتصادية وذلك اعتمادا على حساسية التحليلات لكل تكنولوجيا على حدة.
- تنبؤ المستقبل لتكلفة إنتاج الكهرباء لتكنولوجيات الطاقة المتجددة خلال عام ٢٠٣٥ استنادًا إلى نماذج منحنيات التعلم وسيناريوهات التنبؤ بالأسواق.
- التوزيع الجغرافي في تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات المثالية بمصر.

تُقيَّم وتُقارَن التكنولوجيات استنادًا على منحنيات التعلم الموثقة تاريخيًا وعلى التكلفة المالية للأسواق التقليدية. وتحسب قيمة تكلفة إنتاج الكهرباء الحالية والمستقبلية لحقول الطاقة التقليدية (مولدات الديزل وحقول الغاز) كمرجعية.

لكي ترصد بدقة التغيرات العادية في أسعار السوق والتقلبات مع ساعات التحميل القصوى للتكنولوجيات فإنه ينبغي التعرف على حدود الأسعار العليا والدنيا، آخذين في الاعتبار خصائص كل تكنولوجيا والتي لا يمكن تمثيلها في تكلفة إنتاج الكهرباء مثل ميزة عدد ساعات التحميل القصوى، إنتاج الطاقة اللامركزي، والتحميل التالي لقدرة التشغيل والتوافر على مدار الساعة، وسهولة إدماج التخزين. كل هذه العوامل لم تؤخذ في الاعتبار في حين أن تأثير ساعات التحميل القصوى وتكلفة رأس المال والشروط المالية تم تمثيلها في تحليل الحساسية.

ويعتمد مستوى تكلفة إنتاج الكهرباء المولدة من الطاقة المتجددة إلى حد كبير على العوامل الآتية:

الاستثمارات المتخصصة

إن بناء وتشييد محطات الطاقة بحديها الأعلى والأدنى إنما يتم تحديده بناءًا على معطيات السوق.

الظروف المحلية

تعني أحوال الإشعاع والرياح للمناطق المختلفة وعدد ساعات التحميل القصوى في نظام الطاقة.

تكلفة عمليات التشغيل

وذلك خلال مدة عمر المحطة وهي تعمل.

مدة عمل وتشغيل المحطات

شروط التمويل

إن العائدات المحتسبة على أساس السوق المالية وفترات النضج تعتمد على الرسوم الزائدة لمخاطر التكنولوجيا والأحوال الاقتصادية للدولة واضعين في الاعتبار سياسات التمويل الخارجية وتلك الخاصة بإعادة التوازن الاقتصادي الداخلي.

وقد تمت دراسة التكنولوجيات المولدة للطاقات التالية وذلك حسب تكلفة إنتاج الكهرباء المولَّدة في الظروف المحلية في مصر.

المحطات الفوتوفولتية

وحدات الخلايا الشمسية القائمة على السيليكون البللوري

- محطات صغيرة فوق أسطح البنايات (حتى ١٠ كيلو وات طاقة)
- محطات كبيرة فوق أسطح البنايات (من ١٠ حتى ١٠٠٠ كيلو وات طاقة)

- محطات أرضية كبيرة (أكبر من ١٠٠٠ كيلو وات طاقة٠ حتى المحطات الفوتوڤولتية على مستوى المرافق العامة)
- المحطات الفوتوڤولتية غير المربوطة الشبكة

تم افتراض تحديد المناطق المناسبة للمحطات الفوتوڤولتية بمصر (من ١٩٠٠ وحتى ٢٧٠٠ كيلو وات طاقة للمتر المربع)

محطات توليد الطاقة الشمسية المركزة

- محطات توليد الطاقة ذات تقنية القطع المكافئ الاسطواني (١٠٠ ميجاوات) وذلك بوجود أو عدم وجود تخزين حراري.
- محطات توليد باستخدام تكنولوجيا الفرينلز الحرارية مع التخزين الحراري (١٠٠ ميجاوات)
- محطات الأبراج الشمسية المركزة (١٠٠ ميجاوات) مع التخزين الحراري.

تمت دراسة ثلاثة أنواع من كل أنواع تكنولوجيات توليد الطاقة الشمسية المركزة وهي محطات ذات تقنية القطع المكافئ الاسطواني وأنظمة الفرينلز والأبراج الشمسية المركزة.

محطات توليد الطاقة من الرياح

تم تحليل عملية تشغيل توربينات الرياح بسعة ٢-٣ ميجاوات لسرعة الرياح القوية والضعيفة مع الأخذ في الاعتبار نطاق ما بين ٢٠٠٠ إلى ٥٠٠٠ ساعات تحميل قصوى للمحطات على اليابسة.

محطات الطاقة التقليدية

تم تحليل تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات التقليدية المعتمدة على الديزل والغاز الطبيعي لساعات تحميل قصوى مختلفة.

مولدات الديزل
مولدات صغيرة أقل من ٥٠ كيلو وات
مولدات كبيرة أكثر من ١٠ ميجاوات

محطات الغاز وزيت الوقود الثقيل/زيت الوقود الخفيف (توربين غازي بدورة مركبة)
توربين غازي بدورة مركبة - محطات ذات كفاءة عالية ٥٠ - ٦٠٪
توربين غازي بدورة مركبة - محطات ذات كفاءة أقل ٤٠ - ٥٠٪

٢- التطور التاريخي لتكنولوجيات الطاقة المتجددة في مصر

إن الاقتصاد المصري يواجه عدة تحديات في العموم وفي قطاع توليد الطاقة خصوصًا وفي أبرز صوره حين تعجز السعة المولّدة (٢٨ جيجاوات) في مواجهة الاستهلاك المرتفع وخاصة في فصل الصيف والذي يعزي إلى غياب هامش الاحتياطي (الشركة القابضة لكهرباء مصر ٢٠١٥). وحيث أن الزيادة السنوية للحاجة للكهرباء يُتوقّع لها أن تزيد خلال الخمس سنوات القادمة بنسبة ٥-٦٪ فإنه يصبح من الضروري زيادة الاستثمار في قطاع توليد الطاقة وبصورة عاجلة (Mitscher et al. 2015)

إن التدهور في إنتاج البترول الخام في السنين الأخيرة وأيضا المخاوف من تناقص احتياطي الغاز الطبيعي بمصر يجعل محتمًا الاهتمام بالطاقة المتجددة لمواجهة النمو المتزايد في الاحتياج للكهرباء (Paltitcianas 2011). ولقد أدركت الحكومة المصرية هذا الأمر ووضعت خطة طموحة لإنتاج ٢٠٪ من مجمل إنتاج الكهرباء من الطاقة المتجددة في سنة ٢٠٢٠. وتتمثل هذه النسبة كالآتي: ١٢٪ (٧٢٠٠ ميجاوات) من طاقة الرياح، ٦٪ (٢٨٥١ ميجاوات) طاقة مولدة من المياه، و٢٪ (١٣٢٠ ميجاوات) من الطاقة الشمسية (Razawi, Hose 2012). وبسبب تطورات الأحوال السياسية فإنه تم تأجيل الهدف إلى سنة ٢٠٢٢ (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة ٢٠١٥). خلال العقد الأخير، تمت عدة مشروعات خصوصًا في مجالي الرياح والطاقة الشمسية وذلك بغرض الالتقاء مع أهداف الحكومة المصرية بشأن تطور الطاقة المتجددة كما هو موضح بالشكل ٤.

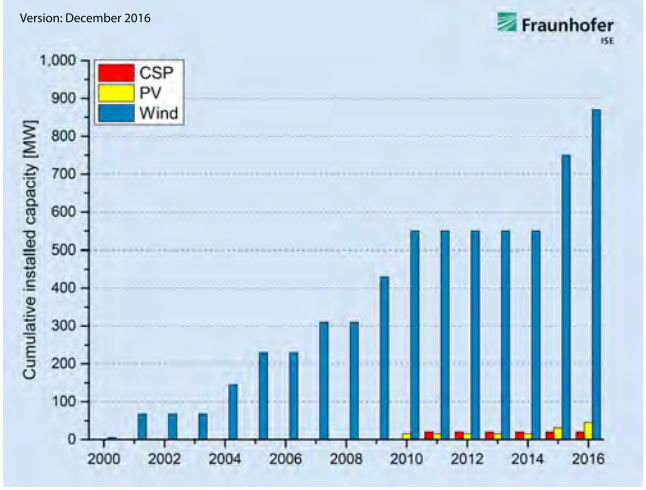

Figure 4: Egypt cumulatively installed capacity 2000-2016 of CSP, PV and wind power (Whiteman et al. 2015)

ولقد لعب توليد الكهرباء باستخدام القوة المائية دورًا حيويًا في مصر لعقود كثيرة. ففي عام ١٩٦٠ أنشأت الحكومة سد أسوان بطاقة ٢٧١ ميجاوات وأتبعته بالسد العالي بطاقة ٢١٠٠ ميجاوات في سنة ١٩٦٧ ثم خزان أسوان ٢ بطاقة ٢٧٠ ميجاوات سنة ١٩٨٥. وفي عام ١٩٩٣ وبالتعاون مع وزارة الري تم بناء محطة إسنا للقوة المائية بطاقة ٨٥,٦٨ ميجاوات. ونجع حمادي بطاقة ٦٤ ميجاوات في سنة ٢٠٠٨ (الشركة القابضة لكهرباء مصر ٢٠١٠).

يخبرنا أطلس الرياح المصري إن مصر لديها إمكانات واعدة بشأن الرياح وخصوصًا في منطقة ساحل البحر الأحمر. وتتراوح سرعة الرياح في مصر من ٥ متر/ثانية إلى ١١ متر/ثانية وذلك في خليج الزيت (Gylling Mortrnsen 2009) . وبأخذ الإمكانية الواعدة لقوة الرياح في الاعتبار بدأت مصر برنامج الطاقة المولدة من الرياح في سنة ١٩٩٣ حيث أنشأت محطة توليد في الغردقة بطاقة ٥ ميجاوات. وتتكون المحطة من ٤٢ وحدة بطاقات مختلفة تتراوح بين ١٠٠ و٣٠٠ كيلو وات (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة سنة ٢٠٠٥) ولقد تخطت مصر المرحلة التجريبية بمشروع الغردقة خلال الاتصال بشبكة كبيرة بالزعفرانة بسعة ٥٤٥ ميجاوات وذلك على امتداد ساحل البحر الأحمر. وتشمل محطة رياح الزعفرانة ٧٠٠ توربينة بموديلات مختلفة (٦٠٠، ٦٦٠ و ٨٥٠ كيلو وات). وقد تم إنشاء محطة الزعفرانة على عدة مراحل وذلك على فترة عشرة سنوات (٢٠٠١ - ٢٠١٠). مراحل محطة الزعفرانة طبقا لهيئة الطاقة الجديدة والمتجددة ٢٠٠٥ و (Fried, Qiao 2015):

- محطة ١٤٠ ميجاوات (٢٠٠١ - ٢٠٠٤)
- محطة ٨٥ ميجاوات ٢٠٠٥
- محطة ٨٠ ميجاوات ٢٠٠٧
- محطة ١٢٠ ميجاوات ٢٠١٠
- محطة ١٢٠ ميجاوات ٢٠١٠

وبالإضافة إلى هذا فإن الحكومة المصرية تخطط لبناء محطات أخرى كبيرة بسعة ١٣٤٠ ميجاوات في جبل الزيت بخليج السويس وذلك بالضفة الغربية للنيل حتى ٢٠١٨. وتتكون محطة جبل الزيت من ثلاثة مراحل:

- المرحلة الأولى وتبلغ طاقتها ٢٠٠ ميجاوات وقد تم افتتاحها فعليًا سنة ٢٠١٥.
- المرحلة الثانية وطاقتها ١٢٠ ميجاوات وسينتهي العمل بها سنة ٢٠١٦.

- المرحلة الثالثة وطاقتها ٢٢٠ ميجاوات وسينتهي العمل بها في ٢٠١٧.

أما محطة توليد الكهرباء من الرياح بخليج السويس وتبلغ طاقتها ٦٠٠ ميجاوات فسوف يتم افتتاحها سنة ٢٠١٨ وذلك بالتعاون مع بنك التشييد الألماني KfW وبنك الاستثمار الأوربي EIB ، مصدر Masdar والوكالة الفرنسية (AFD). وبالإضافة إلى ذلك فإن المحطة المزمع إنشائها غرب النيل سيتم الانتهاء منها في نفس السنة بالتعاون مع الحكومة اليابانية (الوكالة اليابانية للتنمية (JICA)) (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة).

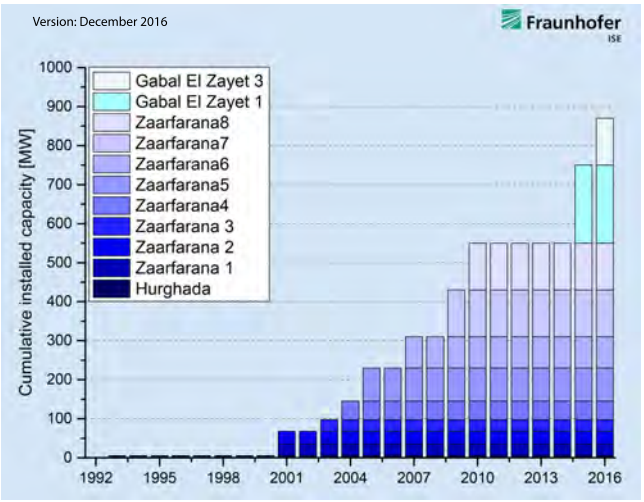

Figure 5: The cumulative installed capacity of wind farms in Egypt till the end of 2016

وبالرغم من أن هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة تملك كافة المواقع كما هو مبين بالرسم ٥، فإن الحكومة المصرية تشجع القطاع الخاص على المشاركة عن طريق الحوافز مثل تعريفة التغذية للطاقة المتجددة أو المشاركة في المنافسة في المناقصات العامة. وفي سنة ٢٠١٣ أعلنت الهيئة عن مناقصة تنافسية من نوع «ابن - امتلك - قم بالتشغيل» BOO بطاقة ٢٥٠ ميجاوات (Fried, Qiao 2015). وبالإضافة إلى هذا فإن اتفاقية حق الانتفاع قد وُقّعت مع شركة مصرية في سنة ٢٠١٤ لتشييد حقل توليد طاقة عن طريق الرياح بسعة كلية ٦٠٠ ميجاوات (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة).

وطبقا لأطلس الإشعاع الشمسي المصري (Shaltout 1991) فإن مصر لديها وفرة من الطاقة الشمسية حيث أن الأشعة العرضية العالمية تتراوح بين ٢٠٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢ إلى ٢٧٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢. ويرتفع الإشعاع المباشر للشمس من ١٩٧٠ كيلو وات ساعة/متر٢ إلى ٢٥٩١ كيلو وات ساعة/متر٢، وذلك بمتوسط قدره عشرة ساعات من سطوع الشمس مع وجود سحب خفيفة. ولهذا فإن مصر تحمل فرصا كبيرة للتوسع في مجال تكنولوجيا الطاقة الشمسية وتطبيقاتها. وبالرغم من هذا فقد ظل استخدام الطاقة الشمسية محدودا حتى سنة ٢٠١٤ فقط لعدد قليل من أنظمة الفوتوفولتية الغير متصلة بالشبكة بطاقة كلية ٢٠ ميجاوات بالكريمات (El-Khayat 2012). ويدفع الاتجاه المتنامي لرفع الدعم عن الكهرباء خلال الخمسة أعوام القادمة إلى التوسع في استخدام الأنظمة الفوتوفولتية (M. James April 2015). وقد أنشأت مصر سبعة أنظمة فوتوفولتية هجين بسعة ٣٠ ميجاوات وذلك بالبحر الأحمر والوادي الجديد. وكان القسط الأكبر هو محطة بسعة ١٠ ميجاوات بسيوة. ويولد هذا المشروع أكثر من ١٧٥٥٥١ ميجاوات ساعة/سنة وهو الذي يغطي حوالي ٣٠٪ من احتياج هذه المنطقة (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة ٢٠١٥). ويبين الشكل ٦ تفاصيل قدرات المحطات الفوتوفولتية في مصر حتى نهاية سنة ٢٠١٦.

وبالإضافة للأنظمة الهجين، فقد أقامت الشركة الإماراتية ٧٠٠٠ محطة خارج الشبكة في أماكن نائية بمصر، وذلك بالتعاون مع وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة، ويتكون كل نظام من لوحين يعملان بالطاقة الشمسية بطاقة تخزينية تكفي يومين (Mancheva 2016).

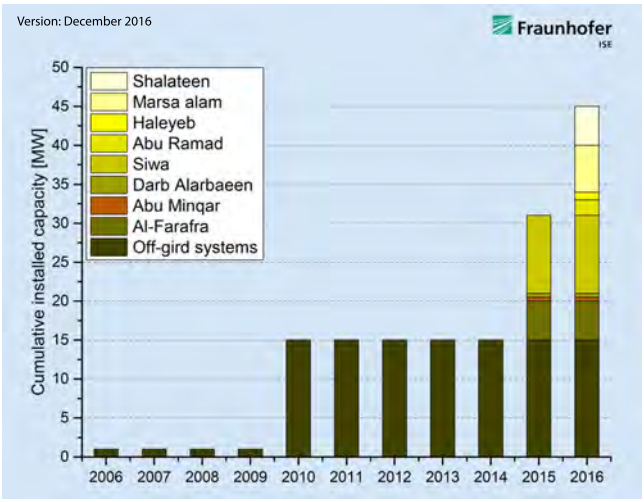

Figure 6: The cumulative installed capacity of PV systems in Egypt till the end of 2016

وقد قام برنامج «الطاقة الذكية بأوروبا» بالاتحاد الأوروبي بعمل سيناريو للتنبؤ بتراكمية تكنولوجيات الطاقة المتجددة حتى سنة ٢٠٥٠ في مصر كما هو مبين بالشكل ٦ (Trieb et al. 2015). ويعكس هذا السيناريو المفترض النمو الأسي لتكنولوجيات الطاقة المتجددة خلال العقود القادمة وخصوصا الطاقة الشمسية المركزة والفوتوفولتية والطاقة المتولدة من الرياح. فمن ٢٠١٠ حتى ٢٠٣٠ فإن نمو تشييد وإقامة تكنولوجيا الطاقة المتجددة سيكون بطيئًا حيث يكون نصيب الطاقة الشمسية المركزة والفوتوفولتية وطاقة الرياح ٢,٣٪، ١٢,٤٪ و٩,٢٪ من كل القدرات المقامة بالتوالي.

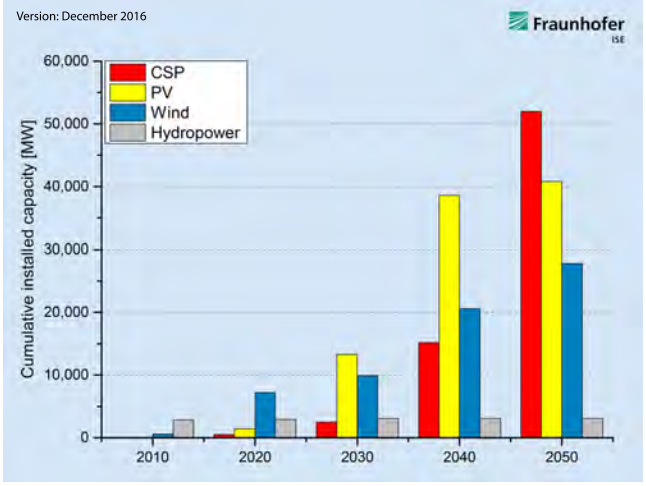

Figure 7: Market Forecasts for the cumulative renewable energy technologies in Egypt through 2010 and 2050 according to (Trieb et al. 2015)

وخلال ٢٠٤٠ إلى ٢٠٥٠ فإن حاجة السوق من الطاقة الشمسية المركزة والفوتوفولتية ستشهد نموًا قويًا وخاصةً في ٢٠٥٠ حيث تصل نسبتهما إلى ٢٧,٢٪ و٢١,٣٪ بالتوالي. بينما تصل حصة الطاقة المولدة من الرياح إلى ١٤٪ من المجموع الكلي. وحسب التوجه الحكومي فإنه لا يوجد نية للتوسع في إنتاج الطاقة عن طريق المياه. ,هذا لقلة موارده. لذلك فإن هذه الدراسة لن تتطرق إلى تحليل الطاقة المولدة من المياه بعد ذلك.

٣- الخلفية والمنهجية والفرضيات

المنهجية

تحسب تكلفة إنتاج الكهرباء حسب كل نوع من أنواع التكنولوجيات المستخدمة على حدة، واضعين في الاعتبار التكنولوجيات المختلفة في مصر الآن ومستقبلاً حتى سنة ٢٠٣٥. وعلى هذا الأساس يتم تحديد تكلفة الاستثمارات الحالية من خلال تحليل دقيق للسوق ويتم حساب تكلفة الاستثمار في المستقبل من خلال معدل التعلم التاريخي المطابق والتنبؤ بتطور الأسواق وتحسب تكلفة إنتاج الكهرباء بتطبيق التكنولوجيا النوعية والعوامل المالية.

الفوتوفولتية

تطور وتنبؤ الأسواق

تعد تكنولوجيا الفوتوفولتية الشمسية من أسرع تكنولوجيات الطاقة المتجددة نموًا في السنوات الأخيرة مدفوعة بالسياسات المحفزة من الحكومة بما في ذلك تعريفة التغذية في الشبكة والتخفيضات الضريبة (IRENA June 2012). وبالإضافة، فإن الفوتوفولتية الشمسية تملك خاصية المركزية واللامركزية مما يمنحها مرونة في الإنشاء. وقد تضاعفت سعة الفوتوفولتية العالمية بعامل ٣٦ وذلك في العشر سنوات الأخيرة. وقد وصلت إلى ٢٤٢ جيجاوات في نهاية سنة ٢٠١٥ (Agora energiewende 2015) (FraunhoferISE October 2016). إن التوسع السريع في سعات المحطات الفوتوفولتية يخفض التكلفة بصورة كبيرة وتنخفض تكلفة التصنيع بنسبة ٢٠٪ كلما تضاعفت السعة المشيدة (Fraunhofer ISE October 2016).

بنهاية سنة ٢٠١٥، تزيد السعة الفوتوفولتية التراكمية بنسبة ٢٦٪ بالمقارنة بالسنة السابقة (REN21 2016). ويعد الاتحاد الأوروبي أكثر المناطق تقدمًا وذلك بسعة كلية ٩٦ جيجاوات (SolarPower-Europe 2016). إلا أن هناك نمو ملحوظ في المنشآت الفوتوفولتية في آسيا في مقابل ركود في المنشآت الأوروبية نتيجة لخفض الدعم وجدول الحوافز والصعوبات في إعادة التلاؤم مع تكلفة المشروعات في أوروبا (REN21 2016).

في العام ٢٠١٥ أضافت الصين ١٥ جيجاوات للسعة الكلية البالغة ٢٨ جيجاوات بالمقارنة للسعة الحالية ,التي تقدر ب ٤٣ جيجاوات، وبالتالي فقد تخطت سيادة ألمانيا الطويلة. وفي اليابان أضيف ١١ جيجاوات إلى الشبكة الكهربائية لتصل السعة الكلية للفوتوفولتية إلى ٣٣,٣ جيجاوات بنهاية عام ٢٠١٥. وفي أماكن أخرى من آسيا، نرى حكومة الهند قد أضافت ٢ جيجاوات كجزء من خطة طموحة للوصول إلى ١٠٠ جيجاوات عام ٢٠٢٢. وتبعتها جمهورية كوريا الجنوبية التي أضافت ٠,٣ جيجاوات للسعة الكلية وهي ٢,١ جيجاوات. أما في خارج آسيا، في قارة أمريكا الشمالية فقد أضافت الأخيرة ٧,٨ جيجاوات حيث بلغ نصيب الولايات المتحدة الأمريكية ٧,٣ جيجاوات بينما كندا ٠,٥ جيجاوات. وفي إفريقيا والشرق الأوسط، فإن نشر الفوتوفولتية الشمسية مرتبط بانخفاض التكلفة ووفرة مصادر أشعة الشمس والتزايد السريع في الحاجة إلى الطاقة. أقيمت مشروعات عدة خارج وداخل الشبكة في إفريقيا مع الجزائر وجنوب إفريقيا حيث أضافت الجزائر ٠,٣ جيجاوات وجنوب إفريقيا ٠,٢ جيجاوات في سنة ٢٠١٥. وبالرغم من هذا فإن القدرات المُشيَّدة مازالت محدودة بالشرق الأوسط. وقد أعلنت كل من الأردن والإمارات في عام ٢٠١٥ عن عدة مناقصات تنافسية لتشييد محطات فوتوفولتية بعطاءات منخفضة القيمة (REN21 2016).

ولقد طور معهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية Fraunhofer ISE بالإنابة عن Agora Energiewende (Agora Energiewende 2015) سيناريوهات لسوق الفوتوفولتية حتى عام ٢٠٥٠ مبينا سلوك متنامي في السنوات القادمة كما هو مبين بالشكل ٨. وتشمل السيناريوهات الثلاثة، المتفائل والوسطي والمتشائم. وتم تصور السيناريو المتشائم على أساس ٥٪ معدل

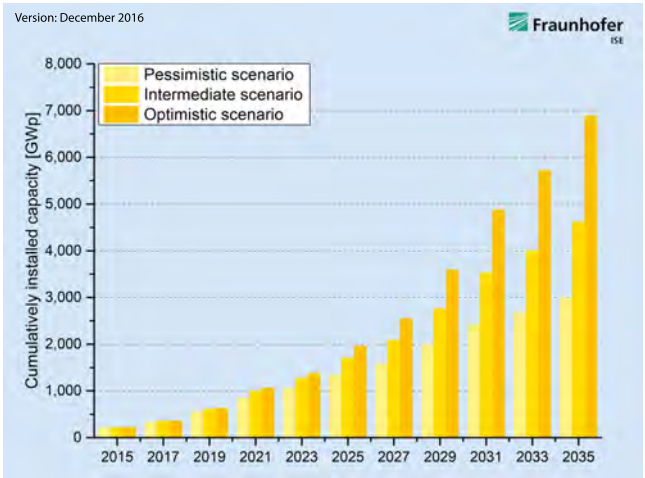

Figure 8: Market forecast for global cumulative power plant capacity for PV 2015-2035 according to Fraunhofer ISE

نمو سنوي مركب بعد ٢٠١٥. وتكَوَّن هذا المعدل على أساس تطور السوق البطيء. أما التصوران الوسطي والمتفائل فتم وضعهما على أساس ٧,٥٪ و١٠٪ معدل نمو سنوي مركب في الفترة ما بين ٢٠١٥ و٢٠٣٥. وهذه السيناريوهات الثلاثة أقل من التطور التاريخي لسوق الفوتوفولتية العالمي والذي كان ٥٠٪ بين عامي ٢٠٠٠ و٢٠١٣ حيث أن المعدل المرتفع للتطور يمكنه الثبات في الأسواق الشابة نسبيًا. واستنادًا إلى السيناريوهات المطروحة، فإن نشر المحطات الفوتوفولتية سيتراوح بين ٣٠٠٠ و٦٩٠٠ جيجاوات بنهاية عام ٢٠٣٥.

أسعار السوق – الوضع الراهن والتطور

تواصل صناعة الفوتوفولتية الشمسية النمو في ٢٠١٥ نتيجة الطلب العالمي المتزايد وانخفاض سعر الفوتوفولتية. وقد انخفض سعر وحدة الفوتوفولتية أكثر في ٢٠١٥ كما هو مبين في الشكل ٩، ولكن أيضا بدرجة أقل بالمقارنة بالفترة بين ٢٠٠٨ و٢٠١٢ (REN21 2016). وقد انخفض أيضا سعر الوحدات البلورية بحوالي ٨٪ خلال السنوات الماضية ليصل إلى ٠,٥٣ دولار/وات في الربع الثالث من عام ٢٠١٦. وقد ركزت الصناعة على تحسين التكلفة الناعمة من خلال تحفيز كفاءة الفوتوفولتية وتطوير المخرجات المثلى (Fraunhofer ISE October 2016). وفي ٢٠١٥ استمرت القارة الآسيوية في مركز الصدارة للإنتاج من الوحدات عالميًا بنسبة ٨٧٪ واستحوذت الصين على ٦٧٪ من الإنتاج على مستوى العالم. ويعد هذا الأمر على وجه الخصوص محل جدل كثير على مستوى صناعة الفوتوفولتية الدولية، حيث أن المنتجين الصينيين والمدعومين من الحكومة الصينية قد تم اتهامهم بخفض الأسعار لكي يضمنوا السيطرة على السوق. وعلى ضوء الأحوال الحالية فقد أصبح المنتجون قادرين على تصنيع الخلايا والوحدات بهامش ربح إيجابي. وبالإضافة إلى هذا، فهناك العديد من الدول (ومنها الجزائر والبرازيل ومصر وايران وجنوب إفريقيا وتايلاند) بدأت في إنشاء مرافق صناعية خلال ٢٠١٥ لمواجهة النمو العالمي للحاجة للطاقة ولتقليل الحاجة إلى استيراد الوحدات الفوتوفولتية (REN21 2016).

وقد أدى الانخفاض القوي في أسعار الوحدات الشمسية إلى انخفاض في أسعار الفوتوفولتية. كما أن أسعار المحولات ومكونات الحقول مثل أنظمة التجميع والأسلاك وأيضا التركيب لم تنخفض إلى نفس الدرجة (Fraunhofer ISE October 2016). بينما في ٢٠٠٥ كانت الوحدات الشمسية تمثل حوالي ٧٥٪ من تكلفة النظام، أما اليوم فهي من ٤٧٪ إلى ٥٠٪ فقط. واستنادًا إلى بيانات الأسواق والدراسات المجراة في معهد فراونهوفر فإن هناك نسبة تقدم تقدر بحوالي ٨٥٪ للفوتوفولتية.

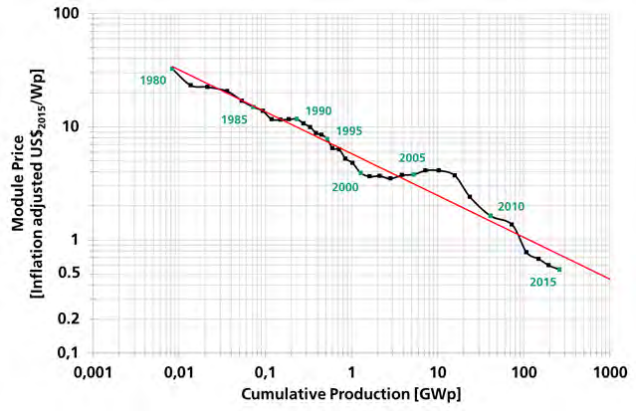

Figure 9: Historical price experience curve of PV modules since 1980. Source: ©Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 4 November 2016 Learning curve based on EuPD data (Fraunhofer ISE October 2016)

الجدول رقم ١ يبين مدى الأسعار لحقول الطاقة الفوتوفولتية ذات الأحجام المختلفة في مصر. تتراوح أسعار الأنظمة الفوتوفولتية الصغيرة (١٠ كيلو وات طاقة) ما بين ١٧٠٠ و٢٠٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات. أما الأنظمة الأكبر حتى ١٠٠٠ كيلو وات طاقة فإن الأسعار تتراوح من ١٢٠٠ إلى ١٥٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات. وبالنسبة للأنظمة الفوتوفولتية خارج الشبكة فإن الأسعار حاليا تتراوح بين ٢٤٥٠ و٢٦٥٠ دولار أمريكي/كيلو وات، وهذه القيم تتضمن كل تكاليف المكونات والتشييد لوحدات الفوتوفولتية.

محطات الطاقة الشمسية المركزة

تطور وتنبؤ الأسواق

نتيجة لخواصها التكنولوجية، فإنه يمكن تشغيل الطاقة الشمسية المركزة بكفاءة في الأماكن الغنية بمصدر الأشعة الشمسية حيث الإشعاع العادي المباشر يزيد سنويا عن ٢٠٠٠ كيلو وات ساعة/ متر٢ (Kost et al. November 2013). إن استخدام أنظمة تخزين طاقة حرارية تميز الطاقة الشمسية المركزة عن طاقة الرياح وأيضًا الفوتوفولتية. ولهذا فقد جذبت هذه التكنولوجيا الحكومات في أسبانيا والولايات المتحدة الأمريكية لدعم العديد من مشروعات الطاقة الشمسية المركزة.

لقد بدأ انتشار الطاقة الشمسية المركزة في النمو بمعدلات عالية منذ ٢٠٠٤ حيث زادت السعة العالمية السنوية بحوالي ٥٠٪ في السنة وذلك بالمقارنة بالسنوات السابقة (REN21 2014). وفي ٢٠١٥ زادت النسبة على مستوى العالم بنسبة ٦٪ فقط ما يعادل ٠,٢٧ جيجا وات لتصل السعة الكلية إلى ٤,٦٥ جيجاوات. وتحتل أسبانيا مركز الصدارة للطاقة الشمسية المركزة بسعة ٢,٣ جيجاوات وتليها الولايات المتحدة الأمريكية بسعة كلية تصل إلى ١,٧ جيجاوات. وبالإضافة إلى ذلك نجد أن هناك نموا ملحوظا في تشييد محطات الطاقة الشمسية المركزة في بلدان أخرى (Whiteman 2015). ومثال على هذا النشاط في السنوات الأخيرة: فإن المغرب قد قامت بتشييد محطة للطاقة الشمسية المركزة سعة ١٦٠ ميجاوات في ٢٠١٥ كجزء من خطة متعددة المراحل لمحطات الطاقة الشمسية المركزة بسعة إجمالية تصل إلى ٥٠٠ ميجاوات . من المتوقع أن ينتهي هذا المشروع بنهاية عام ٢٠١٨. وفي مصر فإن محطة للطاقة الشمسية المركزة سعتها ٥٠ ميجاوات ذات دورة مركبة قد تم إنشاؤها في ٢٠١١. وفي جنوب إفريقيا تم افتتاح أول محطة للطاقة الشمسية المركزة في ٢٠١٥ بسعة ١٠٠ ميجا وات وأتبعه آخر أيضا بسعة ١٠٠ ميجاوات في ٢٠١٦. وبالإضافة للمشروعات الحالية فإن بعض المشروعات في طريقها للتنفيذ في شمال إفريقيا. ففي الجزائر أعلنت الحكومة عن إنشاء محطات للطاقة الشمسية المركزة بسعة ٢ جيجاوات بنهاية ٢٠٣٠. بينما تخطط مصر لزيادة الكمية بـ ٥٠ ميجاوات بنهاية ٢٠٢٠ (REN21 2016).

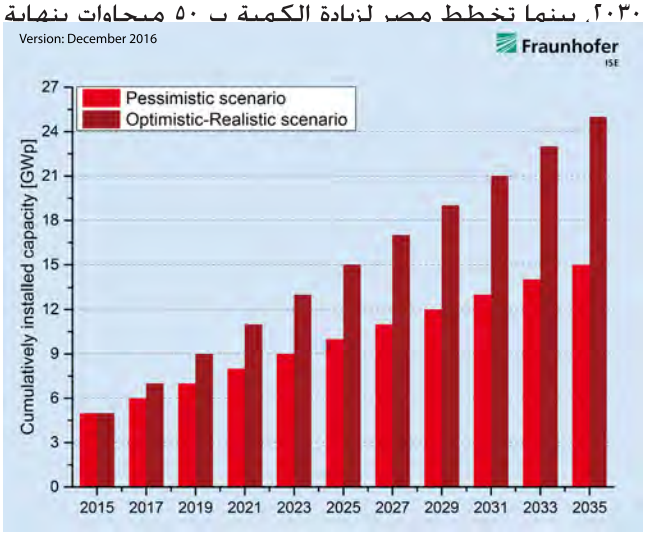

Figure 10 Global market forecast for cumulative power plant capacity for CSP 2015-2035 (Hashem 2015)

تنبؤ تطور سوق الطاقة الشمسية المركزة اليوم يُنبِّئ بزيادة مطردة في المحطات المقامة بدأً من ٥ جيجاوات في سنة ٢٠١٥ (Hashem 2015). وهناك ثلاثة سيناريوهات موضوعة في هذه الدراسة (متشائم ومتحفظ ومتفائل). الدراسة الحالية لن تشمل السيناريو المتفائل حيث أن تطور التكنولوجيا يصعب أن يصل إلى هذا المقياس. في السيناريو المتشائم هناك تصاعد خطي مفترض لحوالي ٥٠٠ ميجاوات، مما يعني أن ١٥ ميجاوات سعة مشيدة قد نصل اليها بحلول ٢٠٣٥. وبما إن الطاقة الشمسية المركزة اليوم تنبأت حتى العام ٢٠١٥ فإن القيم حتى ٢٠٣٥ يمكن استقراؤها.
أما السيناريو المتحفظ فيفترض زيادة سنوية تبلغ ١٠٠٠ ميجاوات وتصل إلى ٢٥ جيجاوات في ٢٠٣٥. ملخص انتشار وحدات الطاقة الشمسية المركزة حتى عام ٢٠٣٥ يوجد في الشكل ١٠. إن معدل التطور لتكنولوجيات الطاقة الشمسية المركزة يفترض أن يكون ٩٠٪. يبين الاستثمار النوعي لتكنولوجيات الطاقة الشمسية المركزة في الجدول ١. إن محطة الطاقة ذات القطع المكافئ الاسطواني ذات ١٠٠ ميجاوات بدون أنظمة تخزين حراري تمثل استثمار خاص لـ ٢٩٠٠ إلى ٤٤٥٠ دولار أمريكي/كيلو وات. ومع إضافة أنظمة تخزين فإن التكلفة تصل إلى ٤٦٠٠ وحتى ٥٨٥٠ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة (FRENELL 2016).

محطات توليد الطاقة من الرياح

تطور وتنبؤ الأسواق

من بين تكنولوجيات الطاقة المتجددة نجد أن قوة الرياح والفوتوفولتية لهما السبق حاليًا نتيجة لسعرهما التنافسي مع محطات الطاقة التقليدية (GWEC 2016). في الولايات المتحدة الأميركية وأوروبا تعد الطاقة المولدة من الرياح هي المصدر الأسبق لتوليد الطاقة الجديدة بينما تعد هي المصدر الثاني في الصين (REN21 2016).

بنهاية ٢٠١٥ فإن السعة العالمية المشيدة لمحطات الرياح زادت إلى ٤٣٢ جيجاوات، لتمثل نمو السوق التراكمي أكثر من ١٧٪ (GWEC ٢٠١٦). وتعتبر آسيا هي السوق الأكبر لطاقة الرياح حيث تمثل ٥٣٪ من السعة المشيدة ويليها الاتحاد الأوروبي بسعة ٢٠,١٪ ثم أمريكا الشمالية بقدة ١٦٪ (REN21 2016).

تحتل الصين مركز الصدارة في تشييد محطات توليد الطاقة من الرياح حيث أنه أضيفت ٣٠,٨ جيجاوات طاقة في ٢٠١٥ لتصل السعة الكلية إلى ١٤٥ جيجاوات. إن سوق طاقة الرياح الصينية تُدفع مدعومة من الحكومة بغرض الحد من التلوث وتأمين الطاقة. وقد تقدم أيضا الاتحاد الأوروبي في مجال تشييد محطات طاقة الرياح ويعزى هذا التقدم إلى الحجم الكبير المشيد في ألمانيا وحدها. ففي ٢٠١٥ زادت ألمانيا السعة ب ٦جيجاوات مما جعل الاتحاد الأوروبي يصل إلى سعة كلية ١٤٧,٧ جيجاوات. وتجيء الولايات المتحدة الأمريكية في المرتبة الثانية في تشييد الطاقة من قوة الرياح بسعة تصل إلى ٨٨,٧ جيجاوات (GWEC 2016).
بينما الدول غير المدرجة بالمنظمة الاقتصادية للتعاون والتنمية Non-OECD تمتلك عددا محدودًا من محطات توليد الطاقة من

الرياح. فإنه ثمة أسواق جديدة تفتح في أمريكا اللاتينية وإفريقيا والشرق الأوسط. في نهاية ٢٠١٥ وفي أمريكا اللاتينية كانت السعة الكلية المشيدة ١٢,٢ جيجاوات وكانت حصة البرازيل ٥٧٪ من السعة الإجمالية (GWEC 2016). نتيجة للأزمات الاقتصادية في إفريقيا، كان النقص في حجم المحطات المشيدة بسعة وصلت إلى ٣,٢٩ جيجاوات فقط. وبالرغم من هذا فإن الأنشطة رهن التنفيذ في مصر والمغرب سوف تحسن حصتها من الطاقة المولدة من الرياح في السنوات القليلة القادمة. أما في الشرق الأوسط فقد كانت السعة الكلية للطاقة المولدة عن طريق الرياح ٢٤٤ ميجاوات مع وضع إيران والأردن في مراكز الصدارة (GWEC 2016).

ولقد قدم مجلس الطاقة الرياح العالمي وهيئة السلام الأخضر العالمية (GWEC November 2014) تصورًا لمستقبل طاقة الرياح مستندين إلى ثلاثة سيناريوهات رئيسية: سيناريو السياسات الجديدة وسيناريو معتدل وسيناريو متطور. في السيناريو الأول يقَيم التنبؤ بالأسواق استنادًا إلى التوجه الحالي للسياسات المناخية الإقليمية والدولية بدون الاعتماد على القوانين الرسمية. أما السيناريو المعتدل فإن نموذج التنبؤ المقترح يماثل في خصائصه ذلك المعتمد في سيناريو السياسات الجديدة. إلا أن هذا السيناريو يأخذ في الاعتبار كل السياسات الداعمة لتكنولوجيا طاقة الرياح. أما السيناريو المتطور فهو ذلك الطموح حيث تسن الحكومات قوانين وسياسات داعمة لإقامة محطات توليد الطاقة من الرياح بالتوازي مع سياسات داعمة أيضا للحد من الانبعاثات الكربونية.

وتتنبأ الدراسة الحالية بمستقبل للسوق بسعة كلية ما بين ١٠٢٥ و٢٥٠٦ جيجاوات في ٢٠٣٥ كما هو مبين في الشكل ١١. وذلك استنادًا على البيانات التاريخية والعالمية فيفترض نسبة تقدم ٩٥٪ في هذه الدراسة. يبين الجدول نطاق الأسعار لمحطات توليد الطاقة من الرياح في مناطق عدة بمصر. ويتراوح الاستثمار النوعي بمحطات طاقة الرياح ما بين ١١٠٠ و١٦٠٠ دولار/كيلو وات (Kost November 2013). في المناطق ذات سرعة رياح عالية جدًا وعدد ساعات تحميل قصوى سوف يكون هناك زيادة في الاستثمار النوعي.

محطات الطاقة التقليدية

تطور وتنبؤ الأسواق

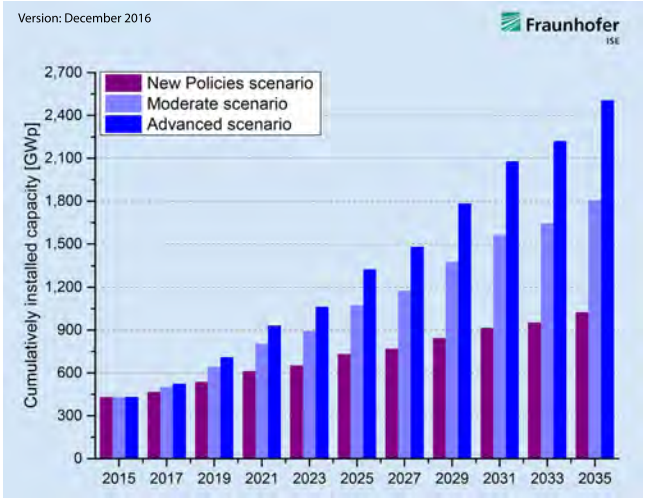

Figure 11: Global market forecasts cumulative wind power 2015-2035 according to GWEC (2015)

لقد تغير في العقود الأخيرة حجم الكهرباء المولدة باستخدام الأنواع المختلفة من الوقود بشكل كبير. إلا أنه يظل الفحم هو المصدر الأول للوقود المستخدم في محطات توليد الطاقة التقليدية. ولكن أيضًا هناك زيادة في استخدام محطات توليد الطاقة باستخدام الذرة أو الغاز منذ العام ١٩٨٠. نتيجة للانخفاض الحاد في استخدام البترول لتوليد الكهرباء مما كان نتيجة لأزمة البترول في سنة ١٩٧٠. وفي سنة ٢٠٠٠ زاد الاهتمام بشأن ظاهرة الاحتباس الحراري وانبعاث الغازات الأمر الذي زاد الاهتمام بتطوير محطات تعمل بالغاز الطبيعي حيث أنه يولد ثاني أكسيد الكربون بدرجة أقل من تلك التي تدار بالفحم أو البترول (EIA May 2016).

تعد محطات الطاقة التي تعمل بالغاز الطبيعي ثاني أكبر مصدر لتوليد الكهرباء على مستوى العالم بعد تلك التي تعمل بالفحم. وتنتج المحطات التي تعمل بالغاز الطبيعي ٥١٥٥ تيراوات ساعة. وجدير بالذكر أن ٢٢٪ من المحطات التي تعمل بالغاز الطبيعي موجودة في الولايات المتحدة الأمريكية تليها روسيا بحصة ١٠,٣٪ ثم اليابان ٨,١٦٪ وجمهورية إيران الإسلامية ٣,٨٪ (IEA 2016). إن التوقعات المنتظرة حسب منظمة معلومات الطاقة EIA تشير إلى نمو مطرد في المحطات المشيدة والتي تعمل بالغاز الطبيعي في العقود التالية لتصل إلى ٢٨٪ من ناتج الكهرباء الكلي المولد حتى نهاية ٢٠٤٠ (EIA May 2016). وطبقًا لتقدير الغاز الطبيعي لمنظمة معلومات الطاقة فإن حصة الغاز الطبيعي ستواصل الازدياد حتى ٢٠٢٠ بمعدل زيادة سنوية نحو ٢٪ (EIA 2015).

وتلعب محطات توليد الطاقة بالبترول دورًا صغيرًا في إنتاج الكهرباء العالمية حيث لا تزيد حصتها عن ٤,٣٪ من إجمالي إنتاج الكهرباء (IEA 2015). إلا أنها مازالت تلعب دورًا حيويًا في عدد من بلاد الشرق الأوسط وشمال إفريقيا حيث أنه مازال لديهم احتياطي كبير من البترول. في المملكة العربية السعودية نجد أن إجمالي الكهرباء المولدة تعتمد على محطات مدارة بالبترول (Aoun, Nachet March 2015). وتتوقع منظمة معلومات الطاقة أن تتراجع المحطات المدارة بالبترول على مدار العقود المقبلة لتصل إلى ٢٪ فقط سنة ٢٠٤٠. ويعزى هذا التراجع إلى زيادة أسعار البترول على المدى البعيد بالمقارنة بمصادر الوقود الأخرى المستخدمة في توليد الكهرباء (EIA 2016).

تطور وتنبؤ السوق المصري

يعتمد إنتاج الكهرباء في مصر عام ٢٠١٥ في معظمه على محطات الطاقة التقليدية حيث تمثل ٩٤٪ من إجمالي الكهرباء المولدة، والذي يشكل ١٤٥ تيراوات ساعة. ويمكن تصنيف محطات الطاقة التقليدية حسب التكنولوجيا المستخدمة أكثر من تصنيفها حسب نوع الوقود المستخدم حيث أن معظم محطات الطاقة التقليدية تخلط الغاز الطبيعي مع الزيت الثقيل وذلك حسب درجة التوافر في السوق. وتقوم مصر حاليا بتشييد ثلاث توربينات غاز بدورة مركبة CCGT جديدة بسعة ٤,٨ جيجاوات لكل واحدة على حدة. وتعتمد هذه المحطات بنسبة كبيرة على الغاز الطبيعي أكثر من الزيت الثقيل نظرًا للاحتياطي الكبير من الغاز

الطبيعي في مصر (Siemens 2016). إن معدل استهلاك الغاز الطبيعي والزيت الثقيل سنويا ٢١٢١٥ و٧٧٦٠ كيلوطن من المكافئ النفطي بالترتيب. واستنادًا على التصنيف التكنولوجي فإن محطات الطاقة التقليدية تقسم إلى دورات مركبة ودورة البخار ومحطات توربينات الغاز. وتنتج المحطات المدارة بالبخار أعلى قسط من الكهرباء ٤٣٪ يتبعها تلك ذات الدورة المركبة ٣٣٪ وأقلهم هي تلك المحطات ذات توربينات الغاز ١٤٪ (الشركة القابضة لكهرباء مصر ٢٠١٥).

إن برنامج «الطاقة الذكية لأوروبا» المنبثق عن الاتحاد الأوروبي اقترح سيناريو لإنتاج الكهرباء في مصر (Trieb 2015) وجد أن في هذا السيناريو سيكون هناك انخفاض هائل في استخدام محطات الطاقة التقليدية بحلول عام ٢٠٤٠ حيث تمثل المحطات التقليدية ٣٧٪ فقط من الطاقة الكلية المولدة. وبالإضافة إلى هذا فإن الغاز الطبيعي سيصبح مصدر الوقود الرئيسي بينما سيختفي استخدام الزيت الثقيل من محطات الطاقة التقليدية. والدافع وراء تبني هذا السيناريو هو النقص السنوي في مصادر النفط الخام وتلازم هذا مع الاهتمام الملحوظ بالاستهلاك العالي للغاز الطبيعي (Patlitzianas 2011) و (Ibrahim 2011).

التكنولوجيا وعوامل التمويل

التفسير المفصل لمنهجية تكلفة إنتاج الكهرباء توجد في الملحق بهذه الدراسة. وبما أن العملة المصرية تمر بحالة شديدة من زيادة التضخم فإن هذه الدراسة ستعتمد على الدولار الأمريكي تفاديًا لعدم الدقة نتيجة معدلات التضخم. وسعر التحويل في هذه الدراسة يرجع لأول أكتوبر ٢٠١٦ حيث كان الدولار الأمريكي يعادل ٩ جنيهات مصرية.

وقد تم حساب قيم الأسعار العظمى والصغرى والتي لم تأخذ في الاعتبار القيم المتطرفة لكل التكنولوجيات استنادًا إلى البيانات المجمعة. وتتراوح قيم السوق العادية بين هذه القيم. ويفترض هنا تكلفة الاستثمار لكل الأماكن. وفي الواقع يجب أن يوضع في الاعتبار أن تكلفة الاستثمار في المحطات وذلك في الأسواق الناشئة تزيد بنسبة ملحوظة. يبين جدول ١ حجم الاستثمار بالدولار الأمريكي/كيلو وات (السعة الاسمية) لكل التكنولوجيات. وتقدر تكلفة الاستثمار استنادًا إلى دراسة السوق بالنسبة للمحطات الموجودة حاليا بمصر واضعين في الاعتبار دراسات السوق الخارجية في نفس الوقت. وفي داخل التكنولوجيات نفسها فإن تكلفة النظام تختلف حسب حجم الوحدة ومواصفتها.

تقسم الأنظمة الفوتوفولتية إلى : محطات صغيرة تصل إلى ١٠ كيلو وات طاقة، ومحطات فوق الأسطح كبيرة تصل إلى ١٠٠ كيلو وات طاقة، ومحطات أرضية تصل إلى ١ ميجاوات طاقة، ومحطات خارج الشبكة. وتعطي كل شريحة حدود لتكلفة الاستثمار. وعلى أساس هذه المحددات فإنه يمكن حساب تكلفة إنتاج الكهرباء لمعدل الاستثمار في ٢٠١٦. ويقدر زمن التشغيل للوحدات الفوتوفولتية ب ٢٥ سنة على الأقل وهو افتراض متحفظ ((Fraunhofer ISE 2016).

تقسم محطات توليد الطاقة من الرياح على اليابسة حسب أماكن المحطات واذا ما كانت الرياح مواتية أو غير مواتية. وتتم التفرقة والتمايز على أساس حجم الدوار وحجم المولد وعدد ساعات التحميل القصوى والموقع وكذلك التكلفة الافتراضية للمحطة. ويتم تجميع بيانات محطات توليد الكهرباء من الرياح على اليابسة من المشاريع المكتملة مثل مشروع الزعفرانة.

بالنسبة للطاقة الشمسية المركزة فإن هذه الدراسة تبحث محطات القطع المتكافئ بحجم ١٠٠ ميجاوات والتي تصمم بوجود أو بدون وحدات تخزين حراري (٨ ساعات). بالإضافة الي ذلك فقد تم نمذجة أبراج الطاقة الشمسية (بتخزين) ومحطات الفرينلز (بتخزين). المعلومات بالنسبة لمحطات الطاقة القياسية, الإشعاع

	PV small	PV large	PV ground mounted	PV off grid	CSP PT	CSP PT with 8h storage	Wind onshore	Diesel small	Diesel large	CCGT-LE	CCGT-HE
Investment 2016 low	1700	1300	1200	2400	2900	4600	1100	170	150	600	900
Investment 2016 high	2000	1600	1500	2650	4450	5850	1600	240	170	900	1200
share of equity	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Share of debt	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Return on equity	13%	16%	16%	13%	18%	18%	18%	16%	16%	16%	16%
Interest rate on debt	8.5%	8.5%	8.5%	8.5%	9.5%	9.5%	9%	8.5%	8.5%	9%	9%
WACC nominal	9.8%	10.8%	10.8%	9.85%	12%	12%	11.1%	10.8%	10.8%	11.1%	11.1%
WACC real	8.8%	9.7%	9.7%	8.8%	10.9%	10.9%	10%	9.7%	9.7%	10%	10%

Tabele 1: Investments and financial parameters for current power plants

الخاص بمكان المحطة وقدرتها كلها تعطي أساسا لتكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الطاقة الشمسية المركزة.

المعطيات التي تمت مناقشتها يتم تضمينها في حسابات معدل تكلفة إنتاج الكهرباء للربع الثالث من ٢٠١٦ (جدول ١ و ٢). وقد تم تحليل المعطيات المالية بالتفصيل وتمت ملاءمتها للمخاطر وهيكل الاستثمار لكل التكنولوجيات في مصر، حيث معدلات الخصم المختارة لها تأثير على تكلفة إنتاج الكهرباء المحسوبة. وفي دراسات عديدة لم تتم دراسة هذا الجانب بدرجة كافية. وهناك خصومات مشابهة لكل التكنولوجيات والأماكن. وقد يؤدي هذا إلى انحراف عن تكلفة إنتاج الكهرباء الفعلية.

إن نسبة التخفيض في هذه الدراسة تحدد لكل تكنولوجيا من خلال تقدير رأس المال العادي في السوق وذلك لكل من الاستثمارات وهي جزئيا تمثل سعر الدين وسعر الأسهم (متوسط التكاليف المرجحة لرأس المال WACC).

محطات توليد الطاقة الكبيرة والتي تم بناؤها وتشغيلها بمستثمرين في مؤسسات كبيرة ونتيجة العائد المرتفع للاستثمار والمطلوب من المستثمرين فإن متوسط التكاليف المرجحة لرأس المال (WACC) يزيد أكثر من المحطات الصغيرة والمتوسطة والتي تنشأ بواسطة أفراد أو شراكات بين رجال الأعمال. أما عائد الاستثمار الذي ينتظره المستثمرون لهذه التكنولوجيات ذات التاريخ القصير في السوق مثل الطاقة الشمسية المركزة فيظل أعلى من التكنولوجيات الراسخة. وقد يتوقع البعض أن المؤشرات المالية سوف تتساوى بعد فترة زيادة مقابلة في المحطات المنشأة، حيث أن مخاطر الرسوم الإضافية للتكنولوجيات الجديدة سوف تتناقص مع زيادة الخبرة.

بما إن متوسط التكاليف المرجحة لرأس المال يأتي من معدلات الفائدة العادية والعائد المتوقع من السوق والتي تعطي القيمة الإسمية، وعليه فيجب أن تحسب القيمة الإسمية أولاً ثم تحول هذه القيمة الإسمية إلى قيمة فعلية حقيقية وذلك بوضع نسبة مفترضة ١٪ كنسبة تضخم في الاعتبار.

العامل المحدد لحسابات تكلفة إنتاج الكهرباء هو تدفق المدفوعات بافتراض كونها قيمة إسمية أو فعلية. ولا يُسمَح بالخلط بين القيمتين. ويعد خلطهما خطأً. ولاستكمال الحساب على أساس القيمة الإسمية فإنه يجب التنبؤ بالتضخم السنوي حتى ٢٠٣٥. وحيث أن التنبؤ بمعدلات التضخم على المدى البعيد يعد أمرًا غير دقيق فإن التنبؤ لمدة طويلة عادة ما يستكمل باستخدام القيم الحقيقية. وعلى هذا فإن كل القيم المذكورة في هذه الدراسة تعود على القيم الحقيقية لسعر الدولار الأمريكي من ٢٠١٦. أما المعلومات عن تكلفة إنتاج الكهرباء للسنين التالية والمبينة في الأشكال للسيناريوهات المختلفة فهي دومًا تشير إلى المحطات الجديدة في السنوات اللاحقة. أما في المحطات التي تم إنشاؤها بالفعل فإن متوسط تكلفة الكهرباء يظل ثابتًا على مدار مدة التشغيل.

أما العامل الثاني الذي يؤثر على عائد الاستثمار فهو المخاطر الخاصة بالمشروع: فكلما زادت المخاطر الافتراضية كلما زاد المطلوب من عائد الاستثمار من قبل المستثمرين. ولكي تبقى تكاليف رأس المال منخفضة فإنه يفضل استجلاب أكبر قدر ممكن من رأس المال الخارجي. ولكن هذا أيضا محدود بالمخاطر الخاصة بالمشروع بمعنى أنه كلما زادت المخاطر كلما قلت مصادر التمويل الخارجي مثل البنوك.

وعند مقارنة المواقع العالمية فليكن معلومًا أن التمويل سيختلف بالضرورة كما تختلف الأحوال البيئية مثل إشعاع الشمس وأحوال الرياح. وعلى وجه الخصوص في حالة مشروعات الطاقة المتجددة والتي تعتمد كفاءتها الاقتصادية بشدة على تعويض تغذية الشبكة والذي تتحكم فيه الحكومة. ومن المخاطر الأساسية لهذه المدفوعات مثل إفلاس الدولة يجب أن توضع في الاعتبار. وهناك

	PV small	PV large	PV ground mounted	PV off grid	CSP PT	CSP PT with 8h storage	Wind	Diesel small	Diesel large	CCGT-LE	CCGT-HE
lifetime [in years]	25	25	25	25	30	30	20	30	30	30	30
Annual operation cost [US$/kWh]					0.02	0.02	0.018	0.01	0.01	0.02	0.02
Annual fixed operation cost [US$/kW]	34	26	24	47	22	22		30	30	22	22
Degradation	0.9%	0.9%	1.0%	1.0%	0.4%	0.4%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%
Fuel cost [US$/kWh]								0.018	0.018	0.019	0.019
Efficiency								30%	35 %	40 - 50 %	50 - 60 %
Progress ratio	85%	85%	85%	85%	90%	90%	95%	100%	100%	100%	100%

Table 2: Input parameters for calculation of economic efficiency

عامل آخر وهو توافر القروض المدعومة بنسبة فائدة مناسبة. إن مصر حتى الآن لا توفر الشروط الإطارية الملائمة للاستثمار في محطات توليد الطاقة المتجددة. حقيقة أن المواقع في مصر والعديد من دول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا لها مكانة متميزة في الإشعاع الشمسي ولكن وضع مقارنة واقعية لتكلفة إنتاج الكهرباء فإن الملاحظ أن الظروف الاقتصادية ليست الأكثر ملائمة وهو أمر يجب أيضا أن يؤخذ في الاعتبار. ونظرا لارتفاع حد المخاطر والتذبذب الكبير في قيمة الجنيه المصري الأمر الذي رفع التكلفة المالية بدرجة كبيرة.

دراسة الظروف المحلية

الإشعاع – ساعات التحميل القصوى

إن كمية الكهرباء الناتجة من مواقع محطات الطاقة تعد عاملا هاما مؤثرا في تكلفة إنتاج الكهرباء لتكنولوجيات الطاقة المتجددة. في حالة تكنولوجيات الطاقة الشمسية فإن كمية الإشعاع المباشر أو غير المباشر تلعب دورًا اعتمادًا على التكنولوجيا (فوتوفولتية أو شمسية مركزة). أما بالنسبة لمحطات توليد الطاقة من الرياح فيمكن حساب ساعات التحميل القصوى من أحوال الرياح في موقع المحطة بحساب سرعة الرياح.

ولهذا السبب فإنه تجب دراسة الأماكن المثالية ذات ساعات تحميل قصوى لمحطات طاقة الرياح وكذلك الأماكن ذات مصادر الأشعة الشمسية لتوليد طاقة من أشعة الشمس (جدول ٣). في أماكن نموذجية في مصر هناك إشعاع أفقي عالمي (GHI) ويتكون من أشعة مباشرة وغير مباشرة في مدى ما بين ١٩٠٠ و٢٥٠٠ كيلو وات/متر٢ على السطح الأفقي. وهذا يتطابق مع ١٦٠٠ و١٨٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢ لمحطة طاقة فوتوفولتية نموذجية.

أما محطات الطاقة الشمسية الحرارية فهي تركز أشعة الشمس المباشرة فقط في بؤرة حيث تحولها إلى كهرباء أو حرارة. ولهذا السبب فإن الأماكن التي تسقط عليها أشعة شمس مباشرة سنويا من ٢٠٠٠ و٢٥٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢ مثل تلك في مصر تعد مناسبة لتشييد محطات الطاقة الشمسية المركزة ويجب أن تؤخذ في الاعتبار.

تعتمد حالة الرياح أيضا على الموقع. فنجد أن محطات طاقة الرياح على اليابسة تنتج عدد ساعات تحميل قصوى ٢٠٠٠ ساعة فقط وذلك في المواقع الفقيرة بالرياح. بينما مستوى عدد الساعات القصوى للتحميل قد يصل الى ٣٠٠٠ ساعة في أماكن معينة بجوار ساحل البحر الأحمر في مصر. ولكي نستكمل مواصفات المحطات فإنه يحسب للمحطات ساعات تحميل قصوى تصل الى ٤٠٠٠ ساعة/سنة مراعين تصميم المحطات بالنسبة للموقع ذو رياح مواتية (Gylling Mortensen 2006) . المواقع التي لديها سرعات رياح مرتفعة وبالتالي عدد ساعات تحميل قصوى مرتفع والتي تحسب مستخدمين بيانات للمحطات ذات ظروف رياح مواتية (سرعة رياح عالية). ولقد كان متوسط القيمة لكل المحطات المولدة للطاقة

PV System	Irradiation (GHI)	Electricity output per 1kWp
Northern Egypt (Alexandria)	2021 kWh/(m²a)	1600 kWh/a
Cairo	2070 kWh/(m²a)	1630 kWh/a
Sinai	2370 kWh/(m²a)	1820 kWh/a
East of Egypt (Marsa Alam)	2330 kWh/(m²a)	1800 kWh/a
Western Desert (Siwa)	2100 kWh/(m²a)	1650 kWh/a
Upper Egypt (Aswan)	2300 kWh/(m²a)	1790 kWh/a
CSP - Parabolic with storage (100 MW)	**Direct normal irradiation**	**Electricity output per 1kW**
Northern Egypt (Alexandria)	2150 kWh/(m²a)	3900 kWh/a
Sinai	2600 kWh/(m²a)	4560 kWh/a
East of Egypt (Marsa Alam)	2650 kWh/(m²a)	4700 kWh/a
Western Desert (Siwa)	2300 kWh/(m²a)	4270 kWh/a
Upper Egypt (Aswan)	2500 kWh/(m²a)	4570 kWh/a
Wind power	**Full load hours of wind**	**Electricity output**
Low (Hurghada, wind speed 6.7 m/s))	2000 kWh/(m²a)	2000 kWh/a
Medium (ZRas Sudr, wind speed 7.3 m/s)	3000 kWh/(m²a)	3000 kWh/a
High (Gulf of El Zzeit, wind speed 11m/s)	4000 kWh/(m²a)	4000 kWh/a
Max	5000 kWh/(m²a)	5000 kWh/a

Table 3: Annual yields at typical locations of PV, CSP and wind power (source: Fraunhofer ISE)

عن طريق الرياح والتي على اليابسة في مصر ما بين سنة ٢٠٠٠ إلى ٢٠١٦ يتراوح بين ٢٠٠٠ و٣٠٠٠ ساعات تحميل قصوى في السنة (مع تذبذب عالي محتمل). وبالرغم من هذا وطبقا هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة فإن محطات طاقة الرياح على اليابسة ٤٠٠٠ و٥٠٠٠ ساعات تحميل قصوى في خليج الزيت رهن التنفيذ (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة ٢٠١٥).

وبالمقارنة لمعظم تكنولوجيات الطاقة المتجددة فإن الطاقة السنوية المنتجة وعدد ساعات التحميل القصوى لمحطات الطاقة التقليدية تعتمد على احتياجات معينة وسعر الوقود النفطي وتنافسية التكنولوجيا في نظام الطاقة. في الوقت الحالي فإن عدد ساعات التحميل القصوى لمحطات الغاز ذات الدورة المركبة في مصر يقع في متوسط ٥٢٠٠ ساعة (Breyer 2012). وبالنسبة لمولدات الديزل فإن المدي يكون واسعًا جدًا ويعتمد على تطبيق المحطة. فإذا كان مولد الديزل يستخدم لأغراض منزلية فإن ساعات التحميل القصوى تكون ضئيلة وذلك بالمقارنة بساعات التحميل القصوى لمولدات الديزل الكبيرة كتلك المستخدمة في الفنادق. واعتمادا على هذه المعلومات فإن هذه الدراسة تظهر مدى واسع لساعات التحميل القصوى لكل من التكنولوجيتين. وتقسم مولدات الديزل إلى فئتين (الصغيرة والكبيرة) بقدرات من ٣٠ إلى ٣٥٪ على التوالي. ساعات التحميل القصوى تمثل في جدول ٤. الأمر نفسه ينطبق على محطات الغاز ذات دورة مركبة. ولتغطية كل الاحتمالات للتكنولوجيات المختلفة فقد قسمت التكنولوجيات لقسمين. الأول محطات ذات سعة عالية تصل إلى ٥٥٪ وساعات تحميل قصوى ٥٠٠٠ - ٧٠٠٠. أما الثاني فهي محطات ذات سعة منخفضة ٤٥٪ وساعات تحميل قصوى ٣٠٠٠ - ٥٠٠٠ ساعة. وتستطيع ساعات التحميل القصوى الأعلى تخفيض تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الوقود النفطي لو كانت البيئة التنافسية والحاجة تسمح بهذا. وبنفس الطريقة فإن تخفيض عدد ساعات التحميل القصوى سيرفع تكلفة إنتاج الكهرباء.

	Full load hours (FLH) conventional power plants	Diesel	CCGT
2016	High	7000	7000
2016	Low	3000	3000

Table 4: full load hours of conventional power plants

تكاليف الوقود

قامت الحكومة المصرية بعمل دعم كبير على مدى عقود في مجال الطاقة مستهدفة الطبقة المتوسطة وأصحاب الدخول المنخفضة. وقد زاد عبء هذا الدعم في العقود القليلة الأخيرة نتيجة الزيادة في أسعار الطاقة العالمية. في ٢٠١٣/٢٠١٤ بلغ حجم دعم الطاقة ٢١ بليون دولار أمريكي والذي يمثل ٨,٥٪ من إجمالي الناتج المحلي. وقد كان دعم الطاقة في مصر غير فعال وبلا جدوى حيث أن مقاصة الأسعار المنخفضة الخاضعة للرقابة في السوق زودت المنتجين بأقل من تكاليف المدخلات مما أدى إلى زيادة الاستهلاك وتشوه أسواق السلع وخدمات غير مجدية وشكاوى هائلة من الموارد العامة. في يوليو ٢٠١٤ قامت الحكومة المصرية بخطة إصلاح شاملة لأسعار الطاقة من وقود نفطي وكهرباء على عدة مراحل. وقد دعم هذه الخطة الانخفاض الحاد في أسعار البترول العالمية. إن سعر البترول حاليًا أرخص بنسبة ٤٠٪ عن السنين القليلة السابقة. وهذا الانخفاض ساعد على تقليص الفجوة المغطاة بالحكومة وبالتالي خلق حالة من الدعم لخطة الحكومة للإصلاح في مجال الطاقة.

واعتمادًا على خطة إصلاح الحكومة فقد زادت الأسعار الرسمية بنسبة ملحوظة. وقد كان أكبر زيادة في معدل الأسعار هي تلك التي حدثت للغاز الطبيعي حيث كانت الزيادة ١٢٢٪ للمواصلات و١٠٠٪ للمنازل و٧٩٪ لتوليد الكهرباء. هذا وقد زادت أيضا أسعار الديزل ب ٥٥٪. وفي بعض الأحيان كما هو في حالة الزيت الثقيل ظلت الأسعار ثابتة. وملخص أسعار الوقود بناءًا على خطة الحكومة للإصلاح تبين في جدول ٥. وبالرغم من هذه الخطة فإن دعم الطاقة تقلص إلى ١٤ بليون دولار أمريكي وهو ما يمثل ٦٪ من إجمالي الناتج القومي. ويظل دعم الكهرباء أمرًا ملحوظًا.

Fuel price [US$2016/kWh]	2016		2020		2025		2035	
	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
Natural gas	0.0102	0.0273	0.0140	0.0283	0.0205	0.0307	0.0242	0.0427
Heavy oil	0.02197		-	-	-	-	-	-
Diesel	0.01803		0.0351	0.0442	0.0407	0.0542	0.0553	0.0829

Table 5: Assumptions about fuel prices (World Bank Commodities 2015) (CEDIGAZ Februrary 2015) (Egyptian Ministry of Petroleum and Mineral Resources 2014)

٤- النتـــائج - حساب تكلفة إنتاج الكهرباء

مقارنة عامة

لمقارنة التكنولوجيات في الدراسة الحالية نجد أن تكلفة إنتاج الكهرباء لتكنولوجيات الطاقة الجديدة والمتجددة للفوتوفولتية والطاقة الشمسية المركزة وطاقة الرياح في عدة مواقع في مصر تحدد حسب بيانات السوق والاستثمارات النوعية وتكلفة التشغيل ومتغيرات فنية ومالية.

الحسابات المرجعية للطاقة التقليدية (ديزل والدورة المركبة) تزودنا بقيم مقارنة والتي تخضع بدورها للفحص والدراسة لمختلف مواصفات المحطات وأيضا للافتراضات المختلفة لتشييد وتشغيل المحطات كما هو مبين في الشكل ١٢.

إن تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الفوتوفولتية الصغيرة (فوق الأسطح) تحسب ذات قيمة مختلفة للإشعاع الشمسي برأس مال متغير ما بين ١٣٠٠ و٢٠٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات. واستنادًا إلى هذه الفرضيات تُظهر النتائج أن تكلفة إنتاج الكهرباء للفوتوفولتية فوق الأسطح تتراوح بين ٠,٠٩٨ و٠,١٨١ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. أما في الأماكن ذات الإشعاع الشمسي المرتفع (٢٧٠٠ كيلو وات/متر٢) في جنوب مصر فإن تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات الصغيرة فوق الأسطح تكون ٠,٠٩٨ و٠,١٤١ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. في شمال مصر حيث الإشعاع الشمسي يكون أقل (١٩٠٠ كيلو وات/متر٢) فتتراوح تكلفة إنتاج الكهرباء من ٠,١٢٦ إلى ٠,١٤٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة.

أما المحطات الأرضية فقد تصل القيم فيها ما بين ٠,٠٧٩ و٠,٠٩٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في جنوب مصر و ٠,١٠٢ إلى ٠,١٢٣ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في شمال مصر وتتراوح قيمة النفقات الرأسمالية ما بين ١٢٠٠ و١٥٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات طاقة. وهذا يعني أن تكلفة إنتاج الكهرباء لكل أنواع محطات الفوتوفولتية داخل الشبكة في مصر تقع تقريبًا في حدود السعر الوطني للكهرباء للتعريفة الخاصة بالشريحة العالية للأفراد وللشركات التجارية. (٠,١٠٧ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة) (وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة ٢٠١٦).

بالنسبة للأنظمة الفوتوفولتية خارج الشبكة فإن تكلفة إنتاج الكهرباء تتراوح بين ٠,١٤٩ و ٠,١٨٦ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في جنوب مصر (أسوان) ومن ٠,١٩٢ إلى ٠,٢٣٩ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في شمال مصر. وتمثل النتائج على أساس الاستثمارات والتي افتُرضت بين ٢٠٠٠ و٢٦٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات طاقة.

وبالنسبة لأنظمة الطاقة الشمسية المركزة ذات التخزين الحراري والتي تغطي ٨ ساعات تحميل باستخدام الطاقة المخزونة فقط. فإن تكلفة إنتاج الكهرباء تتراوح بين ٠,١٢٤ و٠,١٥٢ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة وذلك في مواقع ذات إشعاع شمسي مباشر ٢٦٠٠ كيلو وات/متر٢. بينما الأماكن ذات إشعاع شمسي مباشر بقيمة ٢١٠٠ كيلو وات/متر٢ فإن تكلفة إنتاج الكهرباء تقع بين ٠,١٦٩ و٠,٢٠٨ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة.

أما محطات توليد الطاقة من الرياح ذات تكلفة تشييد بين ١١٠٠ و١٦٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات . تظهر أقل تكلفة إنتاج الكهرباء من بين جميع تكنولوجيات الطاقة المتجددة لتصل ٠,٠٤٦ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة وذلك للمحطات على اليابسة وعند ساعات تحميل قصوى سنوية مرتفعة جدًا حوالي ٤٠٠٠. إلا أن هذه المواقع محدودة في مصر. ولهذا السبب فإن تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات ذات المواقع الأكثر تواضعًا تختلف لتصل إلى ٠,٠٧٩ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. أنظر الشكل ١٢. وذلك اعتمادًا على الاستثمارات النوعية بالإضافة إلى عدد ساعات التحميل القصوى السنوية في هذا الموقع (انظر جدول ٣).

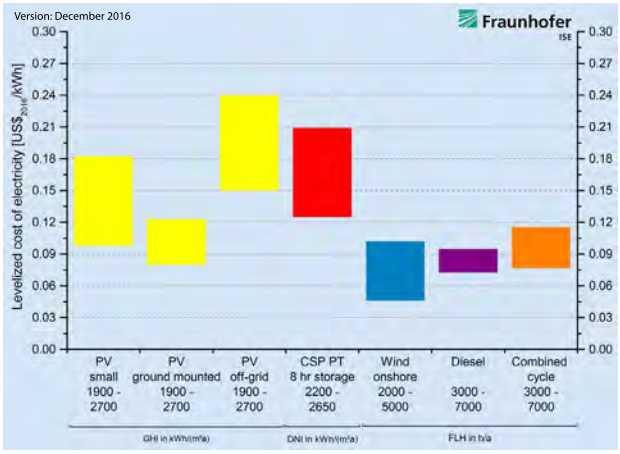

Figure 12: LCOE of renewable energy technologies and conventional power plants at locations in Egypt in 2016. The value under the technology refers in the case of PV to global horizontal irradiance (GHI) in kWh/ (m²a); for CSP to the DNI, in the case of other technologies it reflects the number of full load hours of the plant per year. Specific investments are taken into account with a minimum and maximum value for each technology. Additional assumptions in Table 1-5

وفي ظل الظروف الحالية لمحطات الطاقة التقليدية في سوق الكهرباء ومع اعتبار ساعات التحميل القصوى وأسعار الوقود فإن تكلفة إنتاج الكهرباء التالية لكل تكنولوجيا تحسب كالآتي: تكلفة إنتاج الكهرباء لمولدات الديزل الصغيرة لمتغيرات التشغيل المختارة من ٠,٠٩٣ إلى ٠,١٠٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. أما في حالة مولدات الديزل الكبيرة فهي أقل وتقع بين ٠,٠٧٢ و ٠,٠٧٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. واليوم محطات الطاقة بنظام الدورة المركبة تصل إلى قيم ٠,٠٧٧ و ٠,١١٥ دولار أمريكي وهذا يعكس بجلاء الموقف الحالي تجاه تجميد هذه المحطات والذي تسبب فيه أسعار الطاقة المدعومة في مصر وبالتالي صعوبة إعادة التمويل.

ويجب أن نضع في الاعتبار أن حساب تكلفة إنتاج الكهرباء لا تشمل احتمال مرونة تكنولوجيا الطاقة المولدة أو قيمة الكهرباء المولدة. فمثلا تختلف الطاقة المولدة موسميًا ويوميًا لكل تكنولوجيا على حدة. ونذكر أيضا أن الفروق الناشئة عن مرونة التشغيل للمحطات أو إمدادات خدمات النظام لا توضع في الاعتبار عند حساب تكلفة إنتاج الكهرباء.

وكما أسلفنا فإن تكلفة إنتاج الكهرباء حساسة إلى درجة كبيرة للمتغيرات المالية في أماكن محددة أو حسب نوع التطبيقات. فعند فبافتراض شروط مالية مجدية في السوق ووجود تكنولوجيات ناضجة للطاقة المتجددةمثل الوضع في ألمانيا فإننا نجد انخفاضًا ملحوظًا في تكلفة إنتاج الكهرباء (انظر شكل ٦).

تتشابه نتائج تكلفة إنتاج الكهرباء للفوتوفولتية مع مثيلتها في أوروبا بالرغم أن مصر لديها إشعاع أكثر بكثير. فإننا نجد أن أنظمة الفوتوفولتية ليست أكثر مناسبة في السعر عن تلك الموجودة في المنطقة وفي أماكن أقل من حيث الإشعاع في أوروبا.

ونجد في الإمارات العربية مصادر طبيعية مشابهة وقد أُعلن عن مشروع جديد يصل إلى ٢,٩٩ سنت أمريكي/كيلو وات ساعة. هذا بسبب الممارسات التنافسية وأيضا دعم الحكومة لمشروعات الطاقة الشمسية ونظام المساندة المتطور. أما في مصر فإن متوسط التكلفة المرجحة لرأس المال مرتفع جدًا حيث أن قيمة الدين والمقاصة مرتفعة جدًا. شكل ١٣ يبين الأثر من تحسين الوضع المالي في مصر. لو طبق نظام الحوافز ووضعت ضوابط. وبتطبيق الظروف كما في ألمانيا سوف تنخفض تكلفة إنتاج الكهرباء للفوتوفولتية إلى النصف (جدول ٦).

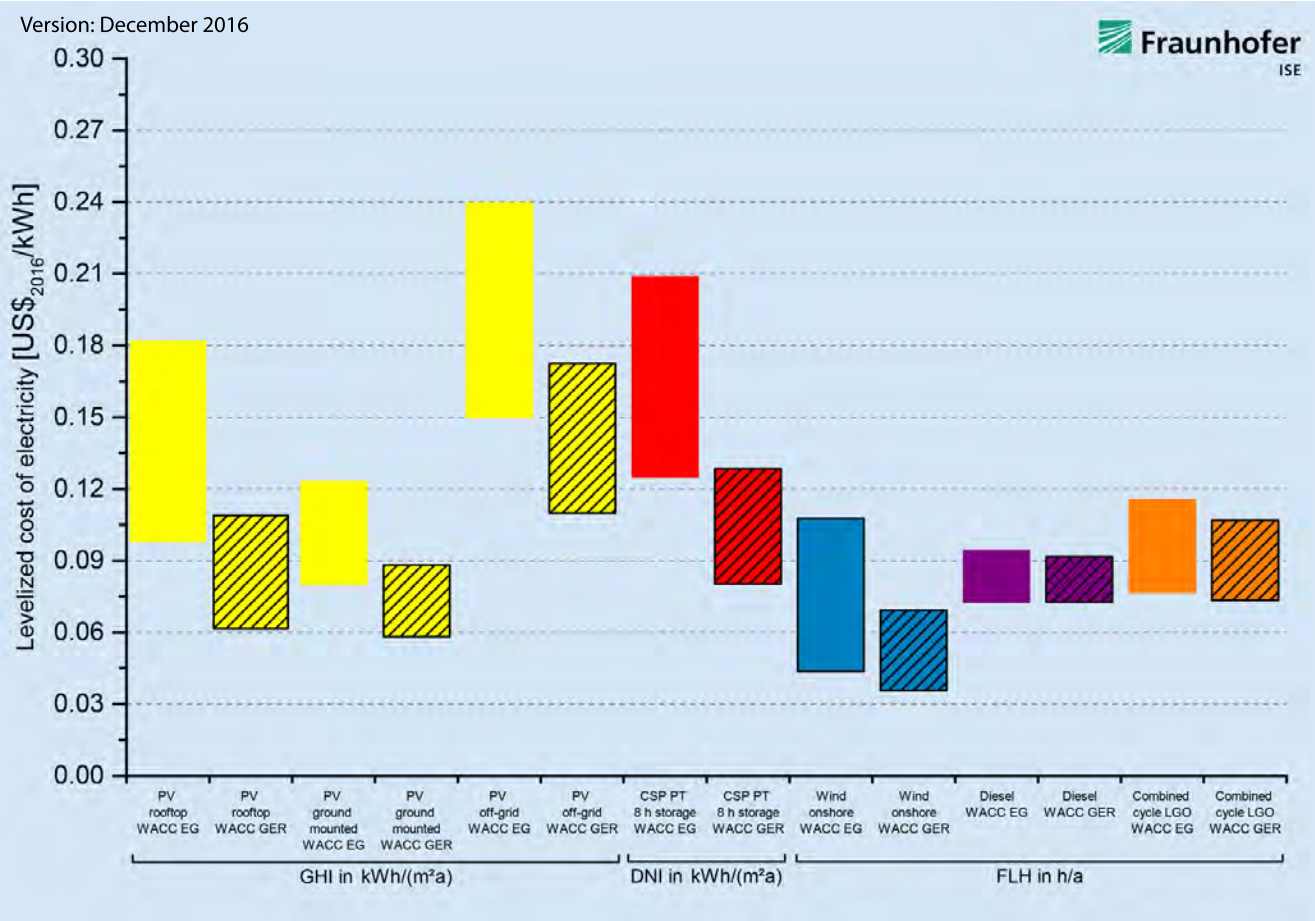

Figure 13: LCOE of renewable energy technologies and conventional power plants at locations in Egypt in 2016 in comparison to Germany

الفوتوڤولتية

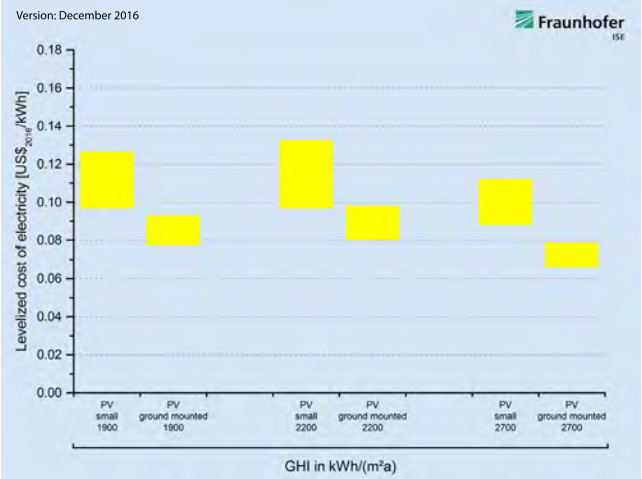

Figure 14: LCOE of PV plants in Egypt based on varying irradiance (GHI in kWh/(m²a)) in 2016.

قيم تكلفة إنتاج الكهرباء الحالية للفوتوڤولتية للمحطات ذات الأحجام تبين في الشكل ١٤ والتكلفة المختلفة وفي ضوء ظروف إشعاع متغيرة (جدول ٣). وقد تم عمل الحسابات للسوق المصرية وبالتالي فقد حسبت متوسط التكلفة المرجح لرأس المال في مصر حسب جدول ١. والقيم الموجودة في شكل ١٢ التالي لمخرجات المحطة يمثل الإشعاع السنوي لموقع المحطة بالكيلو وات ساعة/متر٢. تنتج المحطات الموجودة في شمال مصر حوالي ١٤٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢ من الكهرباء، بينما تنتج تلك في الجنوب ١٨٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢. و كان لهذا الهبوط في الأسعار للاستثمارات في هذه المحطات تأثيرًا واضحًا على تطور تكلفة إنتاج الكهرباء للفوتوڤولتية. حتى في شمال مصر بات من الممكن الوصول إلى تكلفة إنتاج الكهرباء أقل من ٠,٠٧٧ دولار أمريكي باستخدام الفوتوڤولتية وهذا من كل أنواع الفوتوڤولتية حيث سيكون أقل من متوسط سعر الكهرباء للمنازل (تسعيرة التغذية المرتفعة للشريحة المنزلية). وفي الأماكن الواقعة في جنوب مصر فإن المحطات الفوتوڤولتية الصغيرة تنتج تكلفة إنتاج الكهرباء بين ٠,١١٢ و٠,١٢٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. ولو كانت هناك فرص تمويل أفضل أو حوافز يتم إدخالها إلى السوق المصري، فإننا نتوقع انخفاضا أكثر في تكلفة إنتاج الكهرباء. وبما إن كل التكنولوجيات الفوتوڤولتية تتجه نحو خفض الأسعار، فإنه من المتوقع انخفاض تكلفة إنتاج الكهرباء على المدى المتوسط والبعيد. اليوم يقدم كثير من مصنعي الوحدات ضمانات على التشغيل تتعدى ٢٥ سنة لتصل إلى ٣٠ سنة فإن تكلفة إنتاج الكهرباء لهذه الوحدات تنخفض ٧٪ أخرى.

تحليل الحساسية للمحطات الفوتوڤولتية الصغيرة في مصر يبين الاعتماد القوي لتكلفة إنتاج الكهرباء على الإشعاع والاستثمار النوعي (أنظر شكل ١٥ و١٦). وهذا يفسر الانخفاض المفاجئ في تكلفة إنتاج الكهرباء في السنة الأخيرة وهو بسبب انخفاض أسعار الوحدات. التكلفة الأساسية لرأس المال وكذلك متوسط التكلفة المرجحة لهما تأثير على تكلفة إنتاج الكهرباء الأمر الذي لا يستهان به حيث أن ٢٠٪ انخفاض في أي من هذه المحددات تقلل تكلفة إنتاج الكهرباء ٠,٠٨ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. وبالإضافة إلى هذا فإن ساعات التحميل القصوى لها تأثير قوي على تكلفة إنتاج الكهرباء في حالة امتداد العمر الافتراضي للوحدة أكثر من المتوقع لها. فإن محطات الطاقة ستستمر في إنتاج الكهرباء بتكلفة تشغيل زهيدة. أما في حالة العمر الافتراضي الذي يتغير قليلا فإن تأثيره يكون أقل على تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات الفوتوڤولتية حيث أن انخفاض القيمة المستقبلية سيحد من هذا التأثير على تكلفة إنتاج الكهرباء.

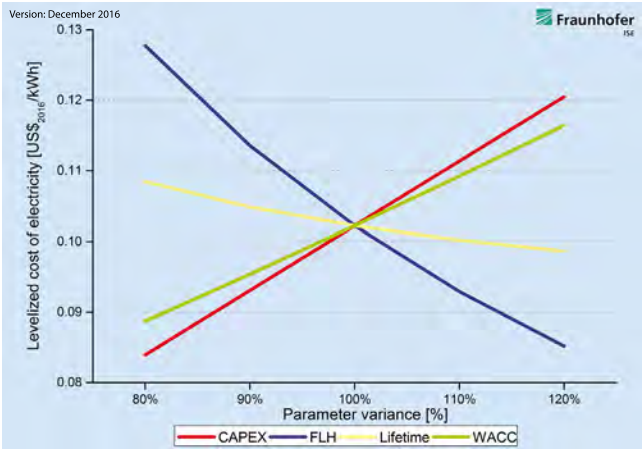

Figure 15: Sensitivity analysis of a ground mounted PV plant with a GHI of 2300 kWh/(m²a) and investment of 1300 US$/kW

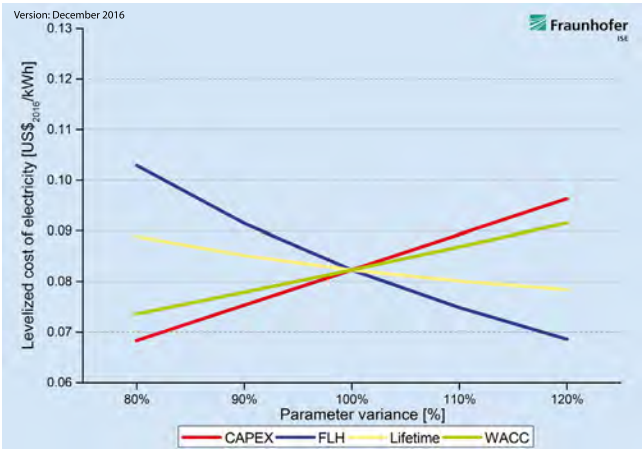

Figure 16: Sensitivity analysis of a rooftop PV plant with a GHI of 2300 kWh/(m²a) and investment of 1500 US$/kW

الشكل ١٤ يبين حساسية المحطات الأرضية بنفس المتغيرات. من المؤكد أن عدد ساعات التحميل القصوى يؤثر تأثيرًا كبيرًا على تكلفة الأنظمة الفوتوڤولتية. هذا بالإضافة إلى أن حجم رأس المال ومتوسط التكلفة المرجحة لرأس المال لهما نفس التأثير على المحطات الصغيرة المقامة على الأسطح. فاذا قل كل من حجم رأس المال ومتوسط التكلفة المرجحة لرأس بنسبة ٢٠٪ فإن تكلفة إنتاج الكهرباء تقل حتى ٠,٠٧ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة.

خريطة تكلفة إنتاج الكهرباء للفوتوفولتية

في القاعدة يفترض استثمار نوعي ب١٣٥٠ دولار أمريكي/كيلو وات. تُظهر الخريطة نتائج تكلفة إنتاج الكهرباء حسب الإشعاع الشمسي والتكلفة الإضافية المرتبطة بالمسافة حتى الأسواق والبنية التحتية. ومثال على هذا فإن المواقع في الصحراء الغربية والتي بها درجة إشعاع شمسي عالية، ليست بالضرورة تكون تكلفة إنتاج الكهرباء أقل. نظرا لبعدها عن البنية التحتية وعن المدن الكبرى. ففي حالة استثمار نوعي ١٣٥٠ دولار أمريكي/كيلو وات فالقاعدة تكون لتكلفة إنتاج الكهرباء تتراوح بين ٠,١١٠ و٠,١٤٠ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة مضافًا إليها الاستثمارات النوعية والتكلفة الإضافية كما هو مبين في الشكل ١٧.

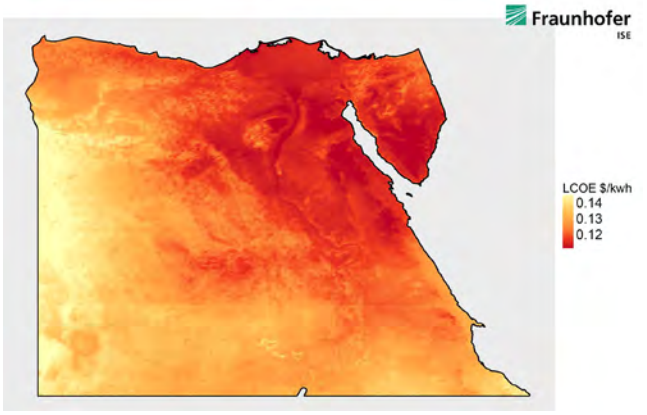

Figure 17: Geographic presentation of LCOE for a ground mounted PV plant with an investment of 1300 US$/kW

محطات الطاقة الشمسية المركزة

يعتمد تحليل تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الطاقة الشمسية المركزة على بيانات السوق لمشروعات محطات ذات القطع المكافئ وتكنولوجيا الأبراج الشمسية المشيدة في البلدان المختلفة مثل المغرب وجنوب إفريقيا وإسبانيا والولايات المتحدة الأمريكية. وعلى أساس هذه البيانات فإنه كان من الممكن تطوير عوامل محطات الطاقة ومعلومات الاستثمار لمشروعات للمحطات ذات القطع المكافئ بسعة ١٠٠ ميجاوات. أما بيانات التكلفة لتكنولوجيا الفرينلز فتؤخذ من محطات تكنولوجيا الأبراج الشمسية مثل كريسنت ديونز في الولايات المتحدة الأمريكية، وأبنجوا في جمهورية جنوب افريقيا. ويحدد حجم تخزين الطاقة الحرارية بعدد ساعات التحميل القصوى والتي يمكن أن تزود التوربينات بالطاقة من المخزون المشحون بالكامل بدون وجود إشعاع (Kost et al. November 2013).

تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الطاقة الشمسية المركزة ذات تكنولوجيا القطع المكافئ ومع إشعاع مباشر عادي ٢٠٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢ تكون ما بين ٠,١٦٠ و٠,٢٠٧ دولا أمريكي/كيلو وات ساعة (الشكل ١٨). وهذا يعني أن هذا النوع من المحطات تؤدي بطريقة أفضل من محطات الطاقة بدون تخزين. والتي تصل قيمتها ٠,٣١٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. ويرجع السبب في هذا إلى أن حقول الطاقة الشمسية ذات المرايا الأكبر ويصحبها التخزين الحراري بالملح المنصهر تضمن استخداما أفضل لتوربينات محطة الطاقة وبالتالي عدد أكبر من ساعات التحميل القصوى. إن أبراج الطاقة الشمسية ذات التخزين الحراري (وباستثمار نوعي من ٥٥٠٠ - ٧٠٠٠ دولار أمريكي/كيلو وات) تتجه إلى أن تكون تكلفة إنتاج الكهرباء لها أعلى ٠,٢٠٥ - ٠,٢٥٦ دولار أمريكي/كيلوات ساعة) بالمقارنة بمحطات الطاقة ذات التخزين الحراري (٠,١٦٦ - ٠,٢٣٧ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة) فهي في نفس المعدل. أما في المناطق ذات الإشعاع الشمسي الأعلى (٢٥٠٠ كيلو وات ساعة/متر٢) كما هو الحال في مصر العليا (أسوان) وفي مرسي علم فإن تكلفة إنتاج الكهرباء ٠,١١٨ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة فيمكن الحصول عليها من تكنولوجيات الطاقة الشمسية المركزة بدون التخزين الحراري، ٠,١٣٧ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة مع وجود تخزين حراري.

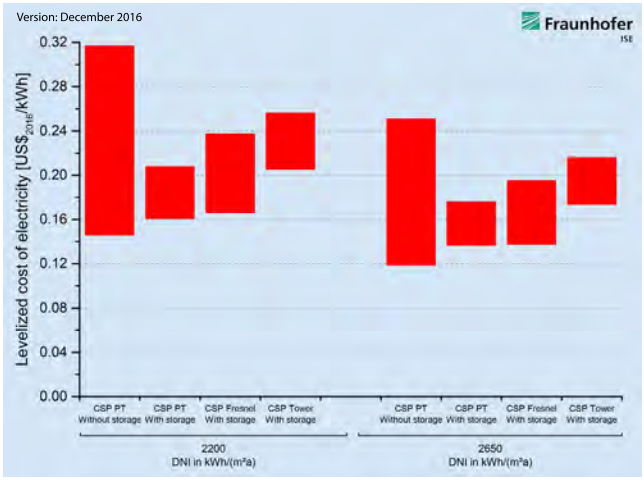

Figure 18: LCOE of CSP plants with a nominal capacity of 100 MW, by plant type and irradiance (DNI in kWh/(m²a)) in 2016

تحليل الحساسية يُظهر أن حجم الاستثمار ومتوسط التكلفة المرجح لرأس المال لو قل بنسبة ٢٠٪ سيؤدي إلى تكلفة إنتاج الكهرباء ٠,١٣٣ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة (انظر شكل ١٩) فإن ارتفاع عدد ساعات التحميل القصوى له تأثير قوي مماثل على تكلفة إنتاج الكهرباء.

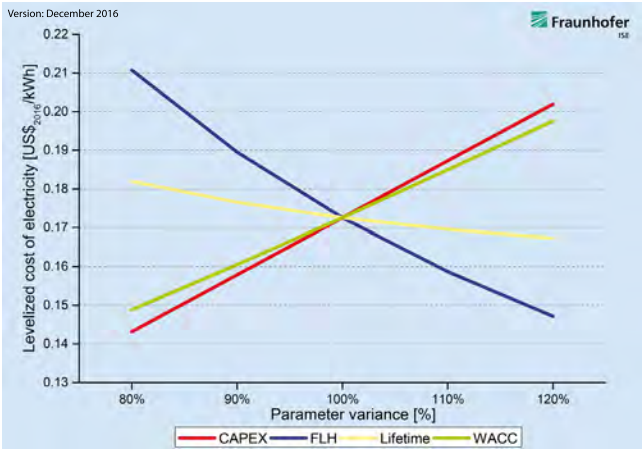

Figure 19: Sensitivity analysis for CSP (100 MW with thermal storage) with annual DNI of 2500 kWh/(m²a) and specific investment of 5250 US$/kW

محطات توليد الطاقة من الرياح

تعتمد تكلفة إنتاج الكهرباء بقوة على الظروف المحلية وكذلك عدد ساعات التحميل القصوى. وعمومًا فإنها تختلف حسب الأماكن ذات ظروف رياح مواتية أو غير مواتية استنادًا إلى متوسط سرعة الرياح. ولكن في العموم فإن تصميم محطة الرياح ونوعية التوربينات لها أثر كبير حيث التكنولوجيا والحجم والارتفاع والهيكل. كل ذلك يؤثر على السعر والتشغيل والكهرباء المولدة.

الأماكن ذات متوسط سرعة رياح أكثر من ٩ متر/ثانية يُعَبَّر عنها بأماكن ذات الرياح المواتية، بينما المتوسط السنوي لسرعة الرياح في الأماكن ذات الرياح الغير المواتية تكون أقل من هذا. في مصر تقع الأماكن المفضلة بالقرب من السواحل حيث متوسط سرعة الرياح السنوية أكثر من ٨ متر/ثانية (Gylling Mortensen 2006).

ويلاحظ في الوقت الحالي أن صانعوا محطات الرياح يزيدون من تحسين تصميم محطاتهم في محاولة لزيادة الإنتاج وذلك في الأماكن ذات الرياح الغير مواتية. ويتم هذا جزئيًا عن طريق زيادة ارتفاع الأبراج أو من خلال زيادة سطح الدوار بالتناسب مع سعة المولد والذي يجعل الوصول إلى ٢٠٠٠ ساعة تحميل قصوى ممكنًا وذلك في الأماكن ذات متوسط سنوي لسرعة الرياح حوالي ٦,٣ متر/ثانية. صحيح أن زيادة ارتفاع الأبراج وزيادة ريش الدوار سوف يؤدي إلى زيادة تكلفة المواد والإنشاء ولكن هذه الزيادة تبَرر بالزيادة الملحوظة في عدد ساعات التحميل القصوى بالمقارنة بتوربينات الرياح التقليدية في أماكن ذات رياح مواتية. وبالتالي فإن هذا يجعل الاستثمار مربحا. ونشكر التحسينات الفنية والتي هي بسببها نتوقع زيادة عدد ساعات التحميل القصوى.

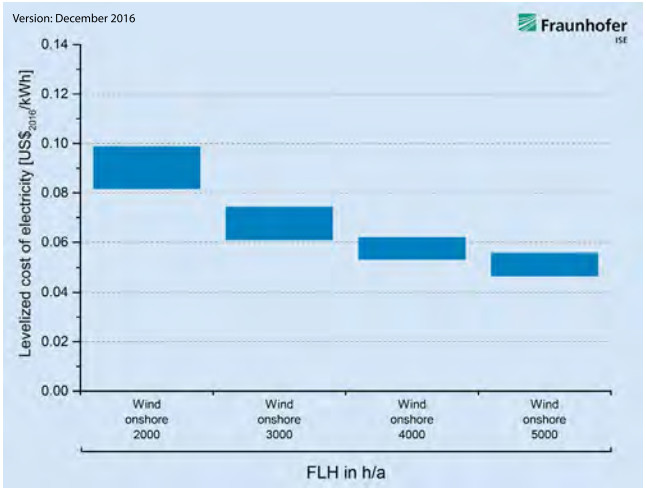

Figure 20: LCOE of wind power by full load hours in 2016

تم حساب تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الرياح في موقعين ذوي رياح غير مواتية. المتوسط السنوي لسرعة الرياح ٧ متر/الثانية و٨ متر/الثانية لكل من الموقعين. في الموقع الأول تصل ساعات التحميل القصوى الى ٢٠٠٠ بينما في الثاني ٣٠٠٠ ساعة تحميل قصوى في السنة وهي سرعات التحميل القصوى التي تم الحصول عليها باستخدام هذه الطريقة. وهناك أماكن متميزة من حيث أن الرياح المواتية فيكون متوسط سرعة الرياح ١٠,٥ متر/الثانية و تصل سرعة التحميل القصوى الى ٥٠٠٠. هذه الأماكن لم يتم استغلالها حتى الآن وبالتالي فإن الحسابات الدقيقة تم عملها على أساس المحطات الموجودة حاليا حيث ساعات التحميل القصوى ٣٠٠٠ ساعة في السنة.

يبين تحليل الحساسية لمحطات الرياح في مصر أن تكلفة إنتاج الكهرباء تعتمد اعتمادًا قويًا على حجم الاستثمار ومتوسط التكلفة المرجح لرأس المال (انظر شكل ٢١). ويفسر هذا الانخفاض القوي لتكلفة إنتاج الكهرباء مع استمرار التحسن في أسعار التوربينات. ومرة أخرى فإن هناك تأثيرًا ملحوظًا في عدد ساعات التحميل القصوى وكلا التأثيران يعكسان الاعتماد الواضح على أحوال الطقس المحلية وعلى وضع وحجم التوربينات. إن حجم ووضع التربينات يغير من كمية الكهرباء المولدة بشدة. أو العمر الافتراضي فإن تأثيره ضعيفًا على تكلفة إنتاج الكهرباء في محطات طاقة الرياح.

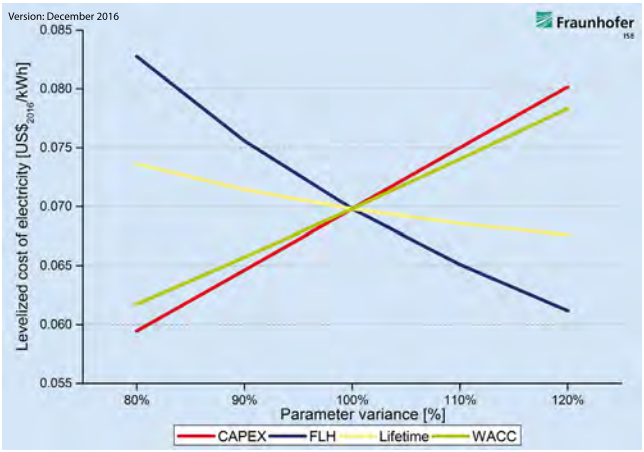

Figure 21: Sensitivity analysis of onshore wind power with 3000 full load hours, specific investment of 1500 USD/kW

محطات الطاقة التقليدية

تكلفة إنتاج الكهرباء لمولدات الديزل أو محطات الغاز ذات الدورة المركبة تعتمد بقوة على أسعار الوقود المستخدم والاستثمار النوعي. وتنتج محطات التوليد الحراري في مصر حوالي ٣٠٠٠ و٧٠٠٠ ساعات تحميل قصوى. وعدد هذه الساعات والتي يمكن أن تصل اليها محطات الطاقة تعتمد على حاجة السوق. ولهذا فإن هذه الدراسة تفترض مدى واسع من التشغيل النمطي/عدد ساعات التحميل القصوى.

يظهر الشكل ٢٢ تكلفة إنتاج الكهرباء سنة ٢٠١٦ لمولدات الديزل ومحطات الغاز ذات الدورة المركبة لكل من النوعين على مدى ساعات التحميل القصوى من جدول ٤ ومقياس محطة الطاقة والكفاءة من جدول ٢. وأسعار الوقود من جدول ٥ وكذلك الحد الأدنى والأقصى للاستثمار النوعي في جدول ١.

تملك محطات الديزل الكبيرة أقل تكلفة إنتاج الكهرباء والتي تكون بين ٠,٠٦٦ و٠,٦٩ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. وهذا أقل بدرجة ملحوظة عن مولدات الديزل الصغيرة والتي تكون تكلفة

إنتاج الكهرباء لها ٠,٠٩٣ و٠,١٠٥ دولار أمريكي/كيلوواوت ساعة. تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الغاز ذات الدورة المركبة تكون بين ٠,٠٧٩ و٠,١١١ وهي الأكثر غلاءً في مصر نتيجة لارتفاع سعر الوقود الحالي (والمدعومة جزئيًا). تتميز محطات الغاز ذات الدورة المركبة بمرونتها وقلة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وذلك بالمقارنة مع تكنولوجيات الديزل. وجدير بالذكر أن تكلفة إنتاج الكهرباء من محطات الرياح على اليابسة وفي مواقع حيث عدد ساعات التحميل القصوى ٥٠٠٠، فإن تكلفة إنتاج الكهرباء تكون عند ٠,٠٤٧ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة وهو أقل من معظم محطات توليد الطاقة التقليدية.

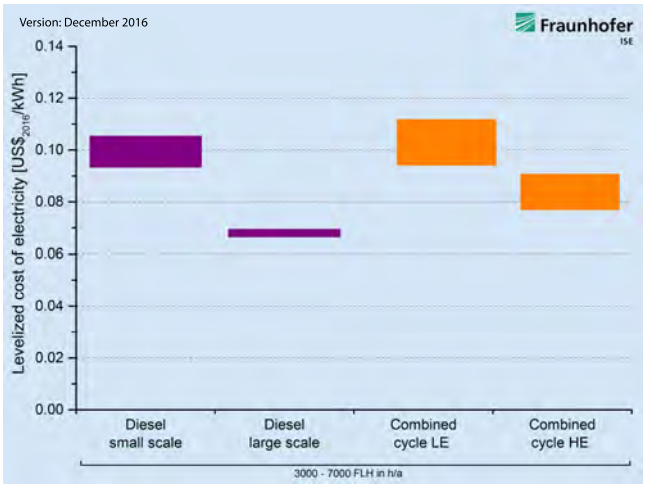

Figure 22: LCOE conventional power plants in 2016 with specific investments in 2016

ولكي نعقد المقارنة مع نتائج السوق العالمية فإن الشكل ٢٣ يبين تكلفة إنتاج الكهرباء المحلي، مرة مع أسعار الوقود المحلي ومرة أخرى مع أسعار الوقود العالمية. وأسعار الوقود العالمية المفترضة هي ٠,٠٣٧ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة للبترول الخام و٠,٠٢٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة للغاز الطبيعي (World Bank Commodities 2015). ويلاحظ أنه بسبب الدعم المرتفع في مصر أن تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الطاقة التقليدية تكون خادعة. بينما يجب أن يوضع في الذهن خطة الحكومة لرفع هذا الدعم في المستقبل القريب. فإنه سيكون من المهم رصد تكلفة إنتاج الكهرباء من محطات الطاقة التقليدية عند هذه النقطة. وكما هو مبين في الشكل ٢٣ فإن مولدات الديزل الكبيرة والصغيرة أيضا تكون تكلفة إنتاج الكهرباء الخاصة بها أعلى. تزيد تكلفة إنتاج الكهرباء لمولدات الديزل الصغيرة بحوالي ٤,٥ سنت أمريكي/كيلو وات ساعة بحيث تصل إلى معدل ٠,١١٩ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة لمولدات الديزل الصغيرة. أما بالنسبة للمولدات الكبيرة فإن تكلفة إنتاج الكهرباء سوف تصل إلى ٠,١٦٦ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. وأيضا محطات الغاز ذات الدورة المركبة تواجه ارتفاعا في تكلفة إنتاج الكهرباء إلا أنه ليس بهذه القوة حيث أن الأسعار العالمية والمحلية للوقود متقاربة نسبيًا وعليه فإن تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات ذات الكفاءة المنخفضة سوف ترتفع من ٠,١٠٣ إلى ٠,١١٢ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. بينما تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات ذات الكفاءة العالية سوف تزداد من ٠,٠٨٤ إلى ٠,٠٩٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة.

Figure 23: LCOE conventional power plants in 2016 with specific investments in 2016 and international fuel prices of 2016

التنبؤ بتكلفة إنتاج الكهرباء خلال ٢٠٢٠ وحتى ٢٠٣٥ في مصر

بالنسبة لتكنولوجيات الطاقة المتجددة فإنه يمكن التنبؤ بالتكلفة استنادًا إلى المراقبة التاريخية لمنحنى التعلم الذي استرشد بدوره وبشدة بمختلف تنبؤات الأسواق في الفترة من ٢٠٢٠ وحتى ٢٠٣٥. ويعتمد التنبؤ وبشدة على المحددات والافتراضات الموضوعة للحسابات. فلو تغيرت بعض المحددات مثل الحوافز أو الأسعار أو تطور السوق ... الخ، فإن التنبؤ سوف يتغير بدوره.

ويلعب منحنى التعلم دورًا رئيسيًا في حساب التنبؤ. ففي حالة التكنولوجيا الفوتوفولتية وطاقة الرياح فقد بات من الممكن وصف التعلم و/أو نسبة التقدم (PR=1-learning rate) في آخر ٢٠ سنة. وقد هبط مؤشر الاستثمارات لكل وات للوحدات الفوتوفولتية في الماضي بنسب التقدم ٨٠٪. وللتنبؤ بالتطور المستقبلي في تكلفة إنتاج الكهرباء للأنظمة الفوتوفولتية يستعمل نسب التقدم بنسبة ٨٥٪ كما أقتُرح من Wirth April 2016. وبالمقارنة فإن تكلفة طاقة الرياح في السنوات الأخيرة تبعت نسبة تقدم ٩٥٪ وقد كانت ٨٧٪ - ٩٢٪ قبل ذلك (Fraunhofer ISE 2010).

إن التنبؤ بتكلفة إنتاج الكهرباء حتى عام ٢٠٣٥ اكتمل بالمثل لتكنولوجيات الطاقة الشمسية المركزة. الدراسات التي قام بها مركز الفضاء الألماني (Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum DLR) تعطي دراسات مختلفة لنسب التقدم للمكونات الفردية الخاصة بمحطات الطاقة الشمسية المركزة (الحقل الشمسي، التخزين الحراري، احتجاز الطاقة) بقيم تتراوح بين ٨٨٪ و٩٨٪ (Viebahn 2008, Trieb 2009). هذا يؤدي إلى متوسط نسب التقدم بنحو ٩٢,٥٪ بالنسبة للطاقة الكلية للمحطة. وتفترض دراسات أخرى نتائج نسب التقدم بقيم تصل إلى ٩٠٪ (Greenpeace, 2009) أو ٩٢٪ إلى ٩٦٪ (Sarasin, 2009) وفي هذه الدراسة تم اختيار متطلبات طاقة بنسبة ٩٠٪.

إن التنبؤ بتكلفة إنتاج الكهرباء يظهر ديناميكيات تطور متغيرة لكل من التكنولوجيات اعتمادًا على العوامل التي يتم مناقشتها

هنا. وظروف التمويل ومتوسط التكلفة المرجح لرأس المال. نضج السوق وتطور التكنولوجيا (PR) والاستثمارات النوعية الحالية (دولار أمريكي/كيلو وات) والظروف المحلية (شكل ٢٤).

اليوم. في سنة ٢٠١٦ تشير الحسابات أن المحطات الفوتوڤولتية في مصر تستطيع أن تولد طاقة نحو ٠,١٠٣ إلى ٠,١٤٨ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة من محطات فوق الأسطح بينما تقل التكاليف إلى متوسط ٠,١٠٠ دولار أمريكي عام ٢٠٢٠ وبحلول عام ٢٠٢٥ وعام ٢٠٣٥ سوف سوف تستمر تكلفة إنتاج الكهرباء للنظم الصغيرة في الانخفاض من متوسط ٠,٠٨٧ حتى تصل إلى ٠,٠٧٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة على التوالي.

بالنسبة لمحطات الفوتوڤولتية الأرضية فإن تكلفة إنتاج الكهرباء تصل اليوم بين ٠,٨٣ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة وتُظهِر التطورات المقترحة أن الأسعار سوف تقل إلى متوسط ٠,٠٧٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة عام ٢٠٢٠ وسوف تستمر في الانخفاض حتى تصل إلى ٠,٠٥٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في عام ٢٠٣٥. اليوم. تولد طاقة الرياح في مصر كهرباء بتكلفة شديدة الانخفاض بالمقارنة للفوتوڤولتية وذلك بمتوسط تكلفة إنتاج الكهرباء ٠,٠٥٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة ولا تزال طاقة الرياح منافسة للتوربينات الغاز ذات الدورة المركبة ومولدات الديزل. وطبقا للحسابات التنبؤية فإن تكلفة إنتاج الكهرباء سوف تنخفض حتى عام ٢٠٣٥ ولكن بهبوط أقل من ذلك للفوتوڤولتية. ويأتي بعد ذلك التقدم المفترض لطاقة الرياح فسوف تصل تكلفة إنتاج الكهرباء لطاقة الرياح إلى ٠,٠٥١ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في عام ٢٠٣٥ ويبقى هكذا حتى نهاية نفس العام - ٢٠٣٥.

بالنسبة للطاقة الشمسية المركزة فإن تكلفة إنتاج الكهرباء الحالية تكون عالية جدا بالمقارنة بتكنولوجيات أخرى فهي تقع عند ٠,١٦٤ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة بالمتوسط. ومع حلول عام ٢٠٣٥ قد تهبط تكلفة إنتاج الكهرباء للطاقة الشمسية المركزة إلى قيم تتراوح بين ٠,١١٦ و٠,١٥٠ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة حتى الافتراض المعطى حاليًا (سعر الفائدة، ... إلخ).

مع أسعار الغاز والديزل الحالية في أكتوبر ٢٠١٦. فإن المحطات التقليدية تنافس المحطات الفوتوڤولتية الأرضية في المواقع الجيدة إلا أنها ذات تكلفة أعلى من محطات الرياح. تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الغاز ذات الدورة المركبة ومولدات الديزل تتراوح حاليا بين ٠,٠٧٧ و٠,٠٨١ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة بالترتيب. في حالة المحطات التقليدية وكما سبق أن بينا فإن الحكومة المصرية تدعم الوقود النفطي إلى حد كبير.

وحيث أن هناك توجه حكومي لرفع الدعم تدريجيا فإنه من المتوقع أن أسعار الوقود ستكون مثل مثيلتها العالمية بحلول عام ٢٠٣٥ وعليه فإن تكلفة إنتاج الكهرباء ستزيد. ففي عام ٢٠٢٥ فإن تكلفة إنتاج الكهرباء لمحطات الغاز ذات الدورة المركبة ستكون

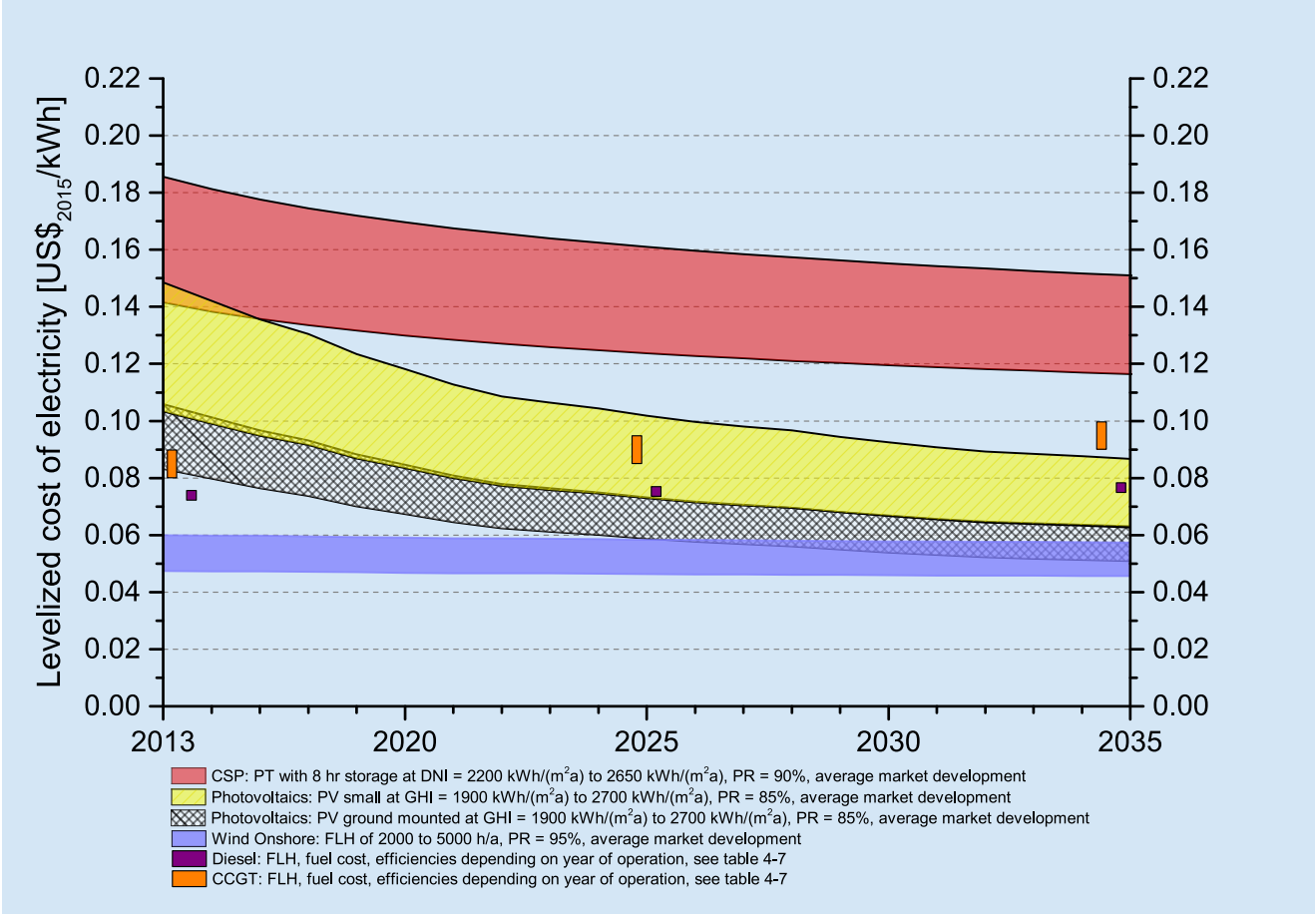

Figure 24: Forecast for the development of LCOE of renewable energy technologies as well as conventional power plants in Egypt by 2035

٠,٠٨١ وستصل إلى ٠,٠٨٢ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في عام ٢٠٣٥. ويلاحظ نفس النمط بالنسبة لمولدات الديزل. ففي عام ٢٠٢٥ ستكون تكلفة إنتاج الكهرباء ٠,٠٨٤ وتصل إلى ٠,٠٩٢ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة في عام ٢٠٣٥.

[US$/kW]	PV small	PV ground mount	PV off grid	Wind onshore	CCGT
share of equity	20%	20%	30%	30%	40%
share of debt	80%	80%	70%	70%	60%
Retun on equity	6%	8.0%	9.0%	16.0%	13.5%
Interest rate on debt	4.0%	4.0%	4.5%	9.0%	6.0%
WACC nominal	4.4%	4.8%	5.8%	11.10%	9.0%
WACC Real	2.4%	2.8%	3.8%	10.0%	6.9%

Table 6: Financial cost based on Germany (Kost et al. November 2013)

ولعقد مقارنة بين الأسواق ذات قيمة تمويلية أقل انخفاضًا فإن المقارنة المباشرة مع السوق الألمانية تظهر في الشكل ٢٥. الافتراضات في التنبؤ التالي إنما تمثل البيانات التقنية والمحلية في مصر. إلا أن التكلفة المالية هي التكلفة في ألمانيا. انظر الجدول ٦.

أخيرا إننا يمكن أن نستنتج أن التكلفة المالية لها تأثير كبير على جدوى لأي من التكنولوجيات وبتبني السياسات التنظيمية المناسبة للمستثمرين وكذلك لتكنولوجيات الطاقة المتجددة. فإن مصر ممكن أن تكون لها أسعار تنافسية للطاقة المتجددة اعتبارا من ٢٠٢٥. حتى تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة ممكن أن تنافس محطات الغاز ذات الدورة المركبة. وفي عام ٢٠٣٥ فإن تكلفة إنتاج الكهرباء من الفوتوفولتية فوق الأسطح ممكن أن تصل إلى ٠,٠٤٥ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة وبالنسبة للفوتوفولتية الأرضية فإنها ممكن أن تصل إلى ٠,٠٥٦ دولار أمريكي/كيلو وات ساعة. هذه الأسعار ستكون أرخص من كل من محطات الغاز ذات الدورة المركبة ومولدات الديزل.

وعلى المدى الطويل فإن محطات الفوتوفولتية في مصر ومحطات طاقة الرياح على اليابسة مع ظروف رياح مواتية سوف يكون لها أقل تكلفة إنتاج الكهرباء وذلك بالمقارنة مع محطات الوقود النفطي في عام ٢٠٣٥. إن التطور التكنولوجي وتطور الأسعار في السنوات الأخيرة قد أدى إلى تحسين تنافسية محطات الرياح والفوتوفولتية.

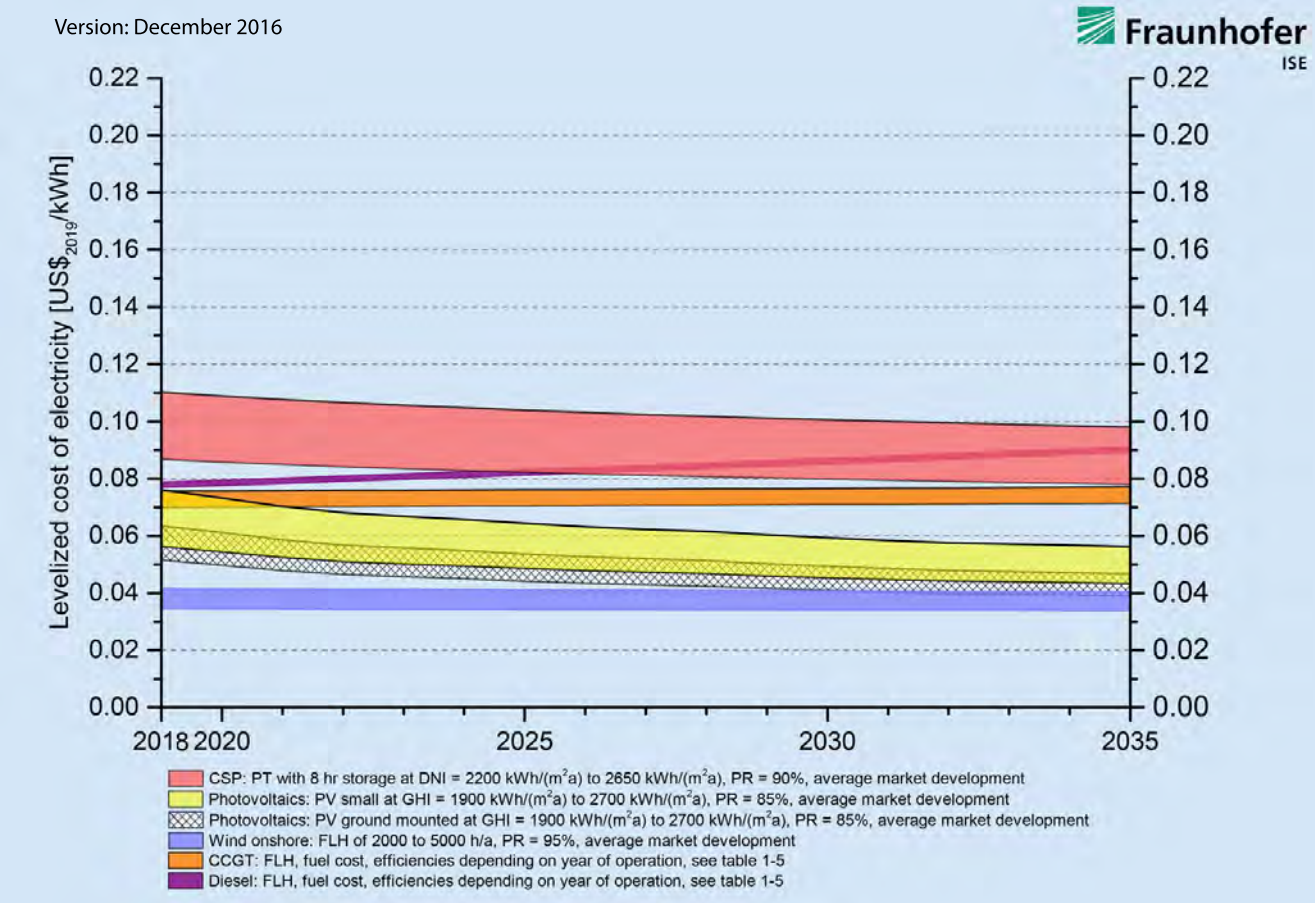

Figure 25: Forecast for the development of LCOE of renewable energy technologies as well as conventional power plants in Egypt by 2035 based on Germany WACC

٥- الملحق

حساب تكلفة إنتاج الكهرباء

استخدام منهجية تكلفة إنتاج الكهرباء يجعل من الممكن المقارنة بين محطات الطاقة ذات الأجيال المختلفة وتكاليف إنشائها. الفكرة الأساسية هي تجميع كافة التكلفة التراكمية الخاصة بإنشاء وتشغيل المحطة ومقارنتها بإجمالى الطاقة المولدة من المحطة. مردود ذلك هو ما يسمى تكلفة إنتاج الكهرباء ويقاس باليورو للكيلو وات ساعة. من المهم الإشارة أن هذه المنهجية تمثل تجريد الحقائق بهدف تحقيق المقارنة بين أنواع المحطات ذات الأجيال المختلفة. وهى لا تصلح لتحديد فاعلية التكلفة لمحطة طاقة محددة. لذا فإن حسابات التمويل يجب أن تتم آخذين في الاعتبار كل العائد والنفقات وفقًا لنموذج للتدفق النقدي.

حساب متوسطات تكلفة إنتاج الكهرباء يتم على أساس أسلوب القيمة الحالية. يتم حساب رأس المال ومصاريف الاستثمار وتدفق المدفوعات من العائد والمنصرف خلال عمر المحطة بناءًا على الخصومات من التاريخ المرجعي المشترك. القيمة النقدية لجميع المصروفات تقسم على القيمة النقدية للطاقة المولدة. تخفيض الطاقة المولدة يبدو للوهلة الأولى غير مفهوم من حيث المنظور المادى ولكنه يرجع للتحولات المحاسبية. الفكرة من وراء هذا هى أن الطاقة المولدة تتناسب ضمنًا مع أرباح مبيعات تلك الطاقة. مع زيادة تحريك تلك المكاسب فى المستقبل تنخفض قيمتهم النقدية. إجمالى المصروفات السنوية على مدى إجمالى عمر تشغيل المحطة تشمل مصروفات الاستثمار وتكلفة التشغيل المتراكمة خلال عمر تشغيل المحطة. لحساب تكلفة إنتاج الكهرباء للمحطات الجديدة تستخدم معادلة (Konstantin 2009) :

LCOE	تكلفة إنتاج الكهرباء باليورو/ كيلو وات ساعة
I_0	مصروفات الاستثمار باليورو
A_t	إجمالى التكلفة السنوية باليورو فى عام t
$M_{t,el}$	كمية الكهرباء فى العام المعنى بالكيلو وات ساعة
i	نسبة الفائدة الفعلية ٪
n	العمرالإقتصادى لتشغيل المحطة بالأعوام
t	عدد أعوام عمر المحطة (١، ٢، ...)

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}}$$

إجمالى التكلفة السنوية يشمل التكلفة الثابتة والمتغيرة لتشغيل المحطة وصيانتها وخدمتها والإصلاح ومدفوعات التأمين. يمكن أيضا إدخال نصيب التمويل الخارجي وأسهم رأس المال فى التحليل من خلال معيار متوسط تكلفة رأس المال على معامل الخصم (نسبة الفائدة). ويتوقف على حجم مساهمة رأس المال وعائده على مدى عمر المحطة وتكلفة القروض والمستخدم منها.

يمكن كذلك باستخدام المعادلة للتكلفة الكلية السنوية في حساب تكلفة إنتاج الكهرباء:

التكلفة الكلية السنوية A_t =
تكلفة التشغيل الثابتة
+ تكلفة التشغيل المتغيرة
(+ القيمة المتبقية/ التخلص من المحطة)

ويمكن ضمان تكلفة إنتاج الكهرباء بالمقارنة من خلال خصم كافة المصروفات وكمية الكهرباء المولدة على مدى عمر تشغيل المحطة لذات التاريخ المرجعى.

كلفة إنتاج الكهرباء هى إذا مقارنة حسابية على أساس التكلفة وليس بحساب لتعريفة تغذية الشبكة. يمكن أن تحسب فقط باستخدام محددات إضافية مؤثرة. والقواعد الحاكمة للاستخدام الخاص، وقانون الضرائب والمكاسب التى حققها المشغل، تسبب صعوبة حساب تعريفة تغذية الشبكة بناءًا على نتائج تكلفة إنتاج الكهرباء. التأهيل الإضافى المطلوب هو أن عملية حساب تكلفة إنتاج الكهرباء لا تأخذ في الحسبان أهمية الكهرباء المنتجة داخل نظام الطاقة فى ساعة ما من العام.

نماذج منحنيات التعلم

يمكننا عمل تقدير كمي لتكلفة وأسعار ديناميكية التكنولوجيات وذلك بتتبع "منحنى التعلم" أو "منحنى خبرات السعر" والذي يدل على كميات الإنتاج المتراكمة للمنتج، وانخفاض تكلفة الوحدة (وحدة الإنتاج) كما يبين شكل ٢٢ للوحدات الفوتوفولتية. ويعتمد هذا المفهوم على تأثيرات التعلم. إن الملاحظة التجريبية المركزية تشير إلى أن التكلفة لمنتج معين تقل بنسبة مئوية يسمى "معدل التعلم" أو عامل خبرة السعر في كل مرة الحجم التراكمي المنتج يتضاعف. ويعبر عن هذا حسابيا كما يلي

$$C(x_t) = C(x_0)\left(\frac{x_t}{x_0}\right)^{-b} \quad (1)$$

حيث الإنتاج التراكمي x_t والسعر $C(x_t)$ في الزمن t بالقياس إلى الكمية المنتجة x_0، للسعر $C(x_0)$ في نقطة بداية تقريبية . ويسمى المعامل المركزي b بمعدل التعلم. وعندما يوضع في بيان لوغاريتمي فإنه يظهر بشكل خطي.

عادة ما يشير منحنى خبرة السعر إلى سعر السوق من المنتج، بينما يستخدم منحنى التعلم عندما يطبق المفهوم على التكلفة. والمُخرج النهائي لهذا التحليل عادة ما يكون معدل التعلم LR أو نسبة التقدم PR . والتي تُعَرّف كالآتي ((e.g. (G.F. Nemat 2006).

$$LR = 1 - PR = 1 - 2^b$$

وكمثال، اذا تضاعف الحجم التراكمي المنتج، واذا انخفضت التكلفة (السعر) بنسبة ٢٥٪ فإننا نتحدث عن معدل تعلم ٢٥٪ (أو نسبة تقدم ٧٥٪)

تتبع ديناميكيات السعر لوحدات الفوتوفولتية منحنى خبرة أسعار منذ ١٩٨٠ (شكل ٢٢). والتذبذبات حول خط الاتجاه شائعة ولوحظت في عدة تكنولوجيات. أما التذبذبات حول منحنى التعلم في حالة الوحدات الفوتوفولتية والتي كان السبب في حدوثها ندرة المواد وندرة تسهيلات الإنتاج على امتداد الأجزاء المختلفة.

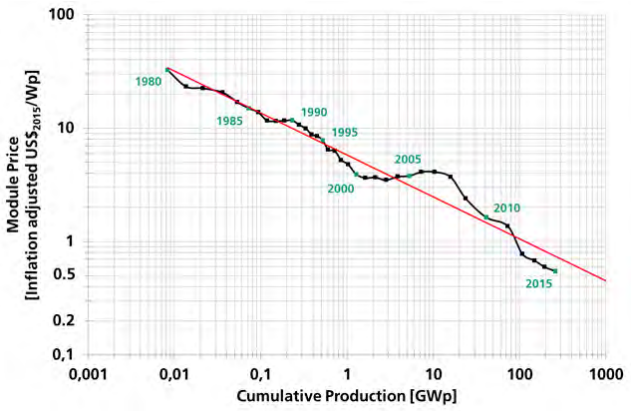

Figure 22: Historical price experience curve of PV modules since 1980. Source: ©Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 4 November 2016 Learning curve based on EuPD data (Fraunhofer ISE October 2016)

ومن المهم أن نلاحظ أن معدل التعلم يعتمد على الفترة الزمنية، والتي تستخدم لمناسبة خط التوجه. إن سنة البداية لمنحنيات الخبرة لوحدات الفوتوفولتية هي ١٩٨٠ وذلك في تحليلنا. والشكل ٢٢ يبين معدلات التعلم اعتمادا على التاريخ حيث تجهز البيانات وتتراوح القيم حول متوسط معدل التعلم ١٥٪ من الأنظمة الفوتوفولتية.

ويعبر منحنى خبرة السعر عن الوظيفة مقابل حجم الإنتاج التراكمي. والعلاقة مع الوقت توضع من خلال عدة سيناريوهات لتطور الأسواق. وهذا يسمح بإصدار بيانات حول مستقبل تطور أسعار المحطات بمؤشر زمني وبالتالي لتكلفة إنتاج الكهرباء. ومن الصعب التنبؤ بالتغيرات في شروط التمويل على أساس التغيرات في أطر الاقتصاد القومي، وبالتالي لم يؤخذ بها في هذه الدراسة. وهذا سوف يُحَمِّل التنبؤ لتطور تكلفة إنتاج الكهرباء ويثقلها بغيبيات إضافية غير محددة من الناحية التكنولوجية.

٦- المراجـــع

Agora energiewende (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Germany. Fraunhofer ISE. Available online at https://www.agora-energiewende.de, checked on 10/18/2016.

Aoun, Marie-Claire; Nachet, Said (March 2015): The Saudi electricity sector: pressing issues and challenges. Paris Cedex 15 – France. The Institut français des relations internationales (Ifri). Available online at https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/note_arabie_saoudite_vf.pdf, checked on 10/20/2016.

Breyer, Christian (2012): Economics of Hybrid Photovoltaic Power Plants. Ph.D. University of Kassel. Available online at https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2012102242017/3/DissertationChristianBreyer.pdf, checked on 11/4/2016.

CEDIGAZ (Februrary 2015): Medium and Long Term. Natural Gas Outlook. Available online at http://www.cedigaz.org/documents/2015/CEDIGAZProspects2015.pdf, checked on 11/4/2016.

Egyptian Electricity Holding Company (2010): Annual report 2009/2010. Ministry of Electricity & Renewable Energy. Available online at http://www.moee.gov.eg/, checked on 9/20/2016.

Egyptian Electricity Holding Company (2015a): Annual report 2014/2015. Ministry of Electricity & Renewable Energy. Available online at http://www.moee.gov.eg/, checked on 9/20/2016.

Egyptian Electricity Holding Company (2015b): Annual Report of Egyptian Electricity Holding Company (2014/2015). Cairo. Egyptian Ministry of Electricity and Renewable Energy. Available online at http://www.moee.gov.eg/english_new/EEHC_Rep/2014-2015en.pdf, checked on 10/20/2016.

Egyptian ministry of electricity and renewable energy (8/8/2016): Electricity prices by the Egyptian ministry of electricity and renewable energy. Available online at http://egyptera.org/Downloads/ElecNewTariff.PDF, checked on 8/31/2016.

Egyptian Ministry of Petroleum and Mineral Resources (2014): The Petroleum product prices. Nasr City, Cairo. Available online at http://www.petroleum.gov.eg/ar/Laws/PricingLaws/Laws/%D9%82%D8%B1%D8%A7%D8%B1%201162%20%D9%84%D8%B3%D9%86%D8%A9%202014.pdf, checked on 11/4/2016.

EIA (May 2016): International Energy Outlook 2016 (IEO2016). Washington, DC 20585. U.S. Energy. Information Admin-istration. Available online at http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf, checked on 10/19/2016.

EG. Nemret, 2006: "Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics", in Energy Policy 34 (2006) 3218–3232])

El-Khayat, Mohammed; Amin, Ehab; Mohamed, Marwa (2012): Country Profile. Renewable Energy - Egypt 2012. Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency (RCREEE). Available online at http://www.rcreee.org/, checked on 9/21/2016.

Fraunhofer ISE (January 2010): Windenergie Report Deutschland 2010. Germany. Fraunhofer Institue for solar energy system ISE. Available online at https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Windenergie-Report-2010pdf.pdf, checked on 11/4/2016.

Fraunhofer ISE (October 2016): Photovoltaics Report. Fraunhofer Institute for Solar Energy ISE. Available online at https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf, checked on 11/4/2016.

Fraunhofer ISE (November 2016):

FRENELL (2016): Solar Power on Demand. Least Cost Opportunity for Sun-rich Countries. Germany. FRENELL. Available online at http://www.frenell.de/wp-content/uploads/2016/05/FRENELL_White_Paper_V1.0_May_2016.pdf, checked on 11/4/2016.

Fried, Lauha; Qiao, Liming (2015): Global Wind Report. Annual market update. 1040 Brussels, Belgium. Global wind energy council (GWEC). Available online at http://www.gwec.net/, checked on 9/20/2016.

GWEC (November 2014): Global Wind Energy Outlook 2014. 1040 Brussels, Belgium. Global wind energy council (GWEC). Available online at www.gwec.net, checked on 10/7/2016.

GWEC (2016): Gloabl wind statistics. 1040 Brussels, Belgium. Global wind energy council (GWEC). Available online at http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR.pdf, checked on 11/4/2016.

Gylling Mortensen, Niels (2006): Wind atlas for Egypt. Measurements and modelling 1991-2005. [1. oplag]. Cairo, Roskilde: New and Renewable Energy Authority; Egyptian Meteorological Authority; Risø National Laboratory.

Hashem, Heba (2015): Global CSP capacity forecast to hit 22 GW by 2025. CSP Today. Available online at http://social.csptoday.com/markets/global-csp-capacity-forecast-hit-22-gw-2025, updated on 9/20/2015, checked on 11/9/2016.

Ibrahim, A. (2011): Renewable energy sources in the Egyptian electricity market. A review. In Renewable and Sustainable Energy Reviews. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.149.

IEA (2015): Analysis and Forecasts to 2020. Medium-Term Market ReportMarket (Executive Summary). International Energy Agency (IEA). Available online at https://www.iea.org/Textbase/npsum/MTGMR2015SUM.pdf, checked on 11/4/2016.

IEA (2016): Key World Energy Statistics. International Energy Agency (IEA). Available online at https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf, checked on 10/19/2016.

IHS Technology Solar Team (2015): Top Solar Power Industry Trends for 2015. IHS Technology. Available online at https://www.ihs.com/pdf/Top-Solar-Power-Industry-Trends-for-2015_213963110915583632.pdf, checked on 11/9/2016.

IRENA (June 2012): Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Volume 1: Power Sector. Issue 4/5. Abu Dhabi, United Arab Emirates. The International Renewable Energy Agency (IRENA). Available online at http://www.irena.org/, checked on 10/7/2016.

Kost, Christoph; N.Mayer, Johannes; Thomsen, Jessica; Hartmann, Niklas; Senkpiel, Charlotte; Philipps, Simon et al. (No-vember 2013): Levelized cost of electricity renewable energy technologies. Freiburg. Fraunhofer Institue for solar energy system ISE. Available online at https://www.ise.fraunhofer.de, checked on 10/6/2016.

Kost, Christoph; Schlegl, Thomas (December 2010): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Fraunhofer Institue for solar energy system ISE. Available online at http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-1955270.pdf, checked on 11/9/2016.

Kost, Christoph; Schlegl, Thomas; Thomsen, Jessica; Nold, Sebastian; Mayer, Johannes (2012): Levelized cost of electricity. Renewable energies. Fraunhofer ISE. Available online at us-ers.encs.concordia.ca/home/h/h_algarn/Ph.D/study-levelized-cost-of-electricity-renewable-energies.pdf.

M. James, Laura (April 2015): Recent Developments in Egypt's Fuel Subsidy Reform Process. The International Institute for Sustainable Development (iisd). Available online at https://www.iisd.org, checked on 9/21/2016.

Mancheva, Militsa (2016): Masdar wraps up over 30 MW of solar projects in Egypt. Available online at http://renewables.seenews.com/news/masdar-wraps-up-over-30-mw-of-solar-projects-in-egypt-522104, updated on 4/22/2016, checked on 9/21/2016.

Mitscher; Martin, Dobrott; Nikolai (March 2015): In the fast lane: Egypt moves to realize its outstanding wind and solar power resources. Spittelmarkt 12, 10117 Berlin, Germany. Apricum GmbH. Available online at http://www.res4med.org, checked on 9/20/2016.

New & Renewable Energy Authority (NREA) (2005): Annual Report 2004/2005. Ministry of Electricity & Renewable Energy. Available online at http://www.moee.gov.eg/, checked on 9/20/2016.

New & Renewable Energy Authority (NREA) (2013): Annual Report 2012/2013. Nasr City, Cairo. Ministry of Electricity & Renewable Energy. Available online at http://www.nrea.gov.eg/, checked on 9/20/2016.

New & Renewable Energy Authority (NREA) (2015): Annual Report 2015. Egypt. Ministry of Electricity & Renewable Energy. Available online at http://www.nrea.gov.eg, checked on 9/21/2016.

Patlitzianas, Konstantinos D. (2011): Solar energy in Egypt. Significant business opportunities. In Renewable Energy 36 (9), pp. 2305–2311. DOI: 10.1016/j.renene.2011.03.006.

Razavi; Hossein (2012): Clean Energy Development in Egypt. B.P. 323-1002 Tunis-Belvedere, Tunisia. African Development Bank (AfDB) Group. Available online at http://www.energynet.co.uk/, checked on 9/20/2016.

REN21 (2014): Renewables 2014. Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Available online at https://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/, checked on 10/11/2016.

REN21 (2016): Renewables 2016. Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Available online at https://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/, checked on 10/6/2016.

Shaltout, M. A. Mosalam (1991): Egyptian solar radiation atlas. Cairo: New and Renewable Energy Authority, Ministry of Electricity and Energy; United States Agency for International Development.
SIEMENS AG (2016): Siemens celebrates placement of first gas turbines at Beni Suef and new brand claim. Egypt. Available online at http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2016/power-gas/PR2016050287PGEN.pdf, updated on 5/19/2016, checked on 11/4/2016.

SolarPowerEurope (2016): Solar Market Report & Membership Directory. Onehemisphere, Sweden. SolarPowerEurope. Available online at http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/2015_Market_Report/SPE16_Members_Directory_high_res.pdf, checked on 11/4/2016.

Trieb, Franz; Hess, Denis; Kern, Jürgen; Fichter, Tobias; Moser, Massimo; Pfenning, Uwe (2015): Bringing Europe and Third countries closer together through renewable Energies. North Africa Case Study. Zürich: ETH-Zürich.

Whiteman, Adrian; Rinke, Tobias; Esparrago, Javier; Elsayed, Samah (2015): Renewable Capacity Statistics 2016. International Renewable Energy Agency (IRENA). Available online at http://www.irena.org/, checked on 9/21/2016.

Wirth, Harry (April 2016): Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Germany. Fraunhofer ISE. Available online at https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf, checked on 11/4/2016.

World Bank Commodities (2015): World Bank Commodities Price Forecast. (nominal US dollars). World Bank. Available online at http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/GEP/GEPcommodities/Price_Forecast_20150722.pdf, checked on 11/4/2016.

Whiteman, Adrian; Rinke, Tobias; Esparrago, Javier; Elsayed, Samah (2015): Renewable Capacity Statistics 2016. International Renewable Energy Agency (IRENA). Available online at http://www.irena.org/, checked on 9/21/2016.

Wirth, Harry (April 2016): Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Germany. Fraunhofer ISE. Available online at https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf, checked on 11/4/2016.

World Bank Commodities (2015): World Bank Commodities Price Forecast. (nominal US dollars). World Bank. Available online at http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/GEP/GEPcommodities/Price_Forecast_20150722.pdf, checked on 11/4/2016.

مجال أعمال تحليل نظم الطاقة بمعهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية Fraunhofer ISE

تطورت تكنولوجيات الطاقة المتجددة خلال الأعوام الأخيرة تطورًا مذهلاً: انخفضت الأسعار بشكل حاد وزادت فى نفس الوقت السعات التى تم إنشائها بشكل عظيم. على المستوى العالمى لم يقف تطور تكنولوجيات الطاقة المتجددة، خاصة الفوتوفولتية وطاقة الرياح، عند التواجد بشكل مهم فى صناعة الطاقة بل أصبحت بما وصلت إليه من النمو تشارك فى التغيرات الرئيسية فى نظام الطاقة.

ويثير هذا التغير الجديد مجموعة من التساؤلات الهامة أولاها تركز على تكامل وتفاعل تكنولوجيات الطاقة المتجددة مع نظام الطاقة: كيف يمكن تحقيق استخدام تلك التكنولوجيات بشكل اقتصادى فى مختلف المناطق؟ وكيف يمكن دمج تكنولوجيات مختلفة معًا بغرض تحقيق أفضل تغطية لاحتياج الطاقة؟ وكيف سيتطور نظام الطاقة بالكامل؟ وعند أى نقط يجب على الدولة دعم التطور ؟

معهد فرانهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية Fraunhofer ISE يطرح مجموعة متنوعة للإجابات على هذه الأسئلة ويغطي موضعات العمل التالية:

- تقييم فنى-اقتصادى لتكنولوجيات الطاقة
- تحليل للسوق ووضع نماذج الأعمال
- تخطيط لاستخدام محطات الطاقة واستراتيجيات التشغيل
- وضع نماذج لسيناريوهات لإمدادات الطاقة
- المفاهيم القومية والإقليمية للإمدادات الطاقة

فى **معهد فرانهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية** يتم تحليل مختلف تكنولوجيات الطاقة من منظور فني واقتصادى مثل أسس تكلفة إنتاج الكهرباء. وعلى مدى أبعد، يمكن وضع تصميم أمثل لاستخدام تكنولوجيات الطاقة المتجددة لحقول محطات الطاقة أو للدول وذلك بدراسة التفاعل بين المكونات بالإشارة إلى مواصفات محددة.

مجال أعمال تحليل نظم الطاقة يدرس تحويل نظام الطاقة بمساعدة مداخل منهجيات مختلفة جدًا: منها على سبيل المثال يمكن الإشارة إلى نظام متعدد القطاعات يهدف تحديدا لتقليل انبعاثات ثانى أكسيد الكربون وفقًا لأقل تكلفة للاقتصاد القومي. وعلى جانب آخر يمكن الاستفادة من نماذج قرارات الاستثمار للإشارة إلى الكيفية التى سيتطور بها النظام فى إطار ظروف معينة وكيف تتفاعل المكونات فى نظام وظائف الطاقة. ويسمح ذلك لنماذجنا بتقديم قاعدة ثابتة لاتخاذ القرار فى إطار الظروف المستقبيلة لأى نظام إمدادات الطاقة.

كما نطرح فى مجال أعمال تحليل نظم الطاقة أحد الأسس الإضافية وهو تطوير نماذج للأعمال والتى تأخذ فى الاعتبار تغير الظروف الحاكمة فى مختلف الأسواق. ونطور خيارات لكيفية إمكان استخدام تكنولوجيات الطاقات المتجددة بشكل أكثر فى المستقبل، حتى فى الدول التى لم تنتشر بها بكثافة بعد. وبذلك يعرض **معهد فرانهوفر** منهجية كاملة للتحليل وكذا دراسات وبحوث عن موضوعات تكنولوجية واقتصادية بما يسمح بالسيطرة على التحديات التى يسببها نظام طاقة متغير.

Fraunhofer
ISE

معهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية

للتواصل

MSc. Noha Saad Hussein
noha.sad.hussein@ise.fraunhofer.de

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

مدير مجال أعمال تحليل نظم الطاقة

Dr. Thomas Schlegl
معهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Germany
www.ise.fraunhofer.de

مدير المعهد

Prof. Dr. Eicke R. Weber