

التقييم الاقتصادي لنصب توربينات رياح في ثلاثة مواقع في وسط وجنوب العراق

محمد عبد الجبار محمد علي عبد العزيز علي حارث عادل نصيف
 هيئة البحث العلمي / مركز بحوث وتكنولوجيا البيئة والمياه والطاقات المتجددة - بغداد - العراق

الخلاصة

يتناول البحث تحليل اقتصادي جراء تشغيل ثلاث توربينات ربح بقدرات (٧٥٠ و ١٥٠٠ و ٢٣٠٠ kW) بمواصفات مختلفة، في خمسة مواقع وسط وجنوب البلاد وصولاً لأفضل ثلاثة مواقع منها معتمدين على بيانات وسرعة واتجاهات الرياح من أطلس الرياح لشركة خيوسن والذي يعتمد على بيانات فضائية. بينت نتائج البحث أن معدلات عامل القدرة للتوربينات هي (٨-١٣٪)، (١١-١٧٪) و (١٣-٢١٪) على التوالي، مما ينتج عنه طول فترة استرداد رأس المال، وإن توربين الرياح نوع Asynchronous 690 (الثالث) هو أفضل التوربينات للعمل في هذه المناطق كون معامل القدرة لهذا التوربين أعلى من غيره وتبلغ (١٣-٢١٪) للمناطق الخمسة المختارة، لذا فإن الطاقة المستخرجة من هذا التوربين أعلى من غيره من التوربينات والبالغة (٢٨٠٧ - ٤٢٩٠ MWh)، وبذلك ستكون فترة استرداد المبالغ الاستثمارية اقصر من غيره، وإن ترتيب الأولوية للمناطق الثلاثة المنتخبة لتشغيل هذا التوربين هي حسب الترتيب الشهابي - واسط ثم علي الغربي- ميسان وشبجة - النجف الأشرف.
الكلمات المفتاحية: التقييم الاقتصادي نشاط الرياح ومواقع.

Economic Evaluation of the Installation of Wind Turbines in Three locations in Central and Southern Iraq

Mohammed Abdul-Jabbar Mohammed Ali Abdul Aziz Ali
 Harith Adil Nsaif

Scientific Research Commission / Center for Research and Technology of
 Environment, Water and Renewable Energy - Baghdad-Iraq
 E_mail: alialbeer63@gmail.com

Abstract

An economic evaluation to wind potential of five locations in the middle and south of IRAQ to select the most three promising among them. The procedure is carried out by simulating three different turbines with different power (750, 1500 and 2500kW) using a database of GUSUN Atlas for IRAQ. Power coefficient of them (8-13%), (11-17%) and (13-21%), respectively show a long payback period, and the wind turbine type Asynchronous 690 (the third) is the best turbine to work in these areas because the power factor of this turbine is higher than others reached to (13-21%), so the energy extracted from this turbine is higher than other turbines too (2807-4290 MWh), and thus the recovery period for investment amounts will be shorter than others, and the order of priority of the three elected regions to operate this turbine are in order as follows the Shihabi- Wasit, then Ali al-Gharbi- Maysan and Shabja- An Najaf.

Keywords: Economic Evaluation, Wind Potential and Sites.

المقدمة

التشريعية المتعلقة بذلك حيث تحدد هذه النظم المتطلبات القانونية والفنية والاقتصادية والحصول على التراخيص اللازمة من الجهات المعنية التي يجب توفرها لتأسيس أي مشروع ناجح في هذا المجال وتهدف هذه النظم إلى توفير بيئة استثمارية مواتية وأمنة للاستثمار في مشاريع طاقة الرياح مما يساعد على تشجيع الاستثمار وزيادة الإنتاجية وتوليد المزيد من الطاقة النظيفة.

يهدف البحث إلى إعطاء مقارنة أولية لإنشاء محطة توربينات ربح في خمسة مواقع وسط وجنوب البلاد، واختيار أفضل ثلاثة منها، تقوم باستغلال طاقة الرياح وتحويلها الى طاقة كهربائية تغذي الشبكة الكهربائية الوطنية في جمهورية العراق، وذلك نظراً للنقص الكبير في تجهيز هذه الخدمة.

المواد وطرائق العمل

ينقسم البحث في محتواه إلى التعريف بأنواع المولدات الكهربائية ذات الثلاثة أطوار المستخدمة في توربينات الريح، مع مقارنة بين الأنواع الثلاثة، والعوامل المؤثرة في عمل توربين الريح من تغير في نسبة سرعة الحافة ومعامل القدرة للتوربين وأثر ذلك على القدرة المقنتصة من الرياح (المستغلة)، يتبعه نماذج لمحاكاة تشغيل ثلاث توربينات ربح بقدرات ومواصفات مختلفة في خمسة مواقع وسط وجنوب البلاد للوصول إلى أفضل ثلاثة مواقع منها. إن بيانات وسرع واتجاهات الرياح تم اعتمادها على بيانات فضائية من أطلس الرياح لشركة خيوسن.

أنواع توربينات الرياح

١- توربينات الرياح الثابتة السرعة

تحتوي توربينات الرياح ذات السرعة الثابتة على مولد حثي Induction Generator يرتبط مباشرة إلى الشبكة، مع آلية Soft Start ومجموعة مكثفات

يعاني العراق نقصاً حاداً في تجهيز الطاقة الكهربائية لعموم محافظات التي تمتد على مساحة أكثر من ٤٣٤ ألف كيلو متر مربع. تأتي فكرة إنشاء محطة لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح والتي تعتبر الأقل تكلفة بين تكنولوجيات إنتاج الطاقة الكهربائية تماشياً مع ما جاء في الاستراتيجية الوطنية للطاقة لجمهورية العراق حتى العام ٢٠٣٠، وكذلك مع التوجهات العالمية لاستغلال مصادر الطاقة النظيفة للحفاظ على بيئة الأرض من الملوثات الصناعية التي يكون الوقود الاحفوري المصدر الرئيس فيها (التقرير الخاص بشأن مصادر الطاقة المتجددة والتخفيف من آثار تغير المناخ ٢٠١١).

تشهد صناعة طاقة الرياح نمواً مطرداً في العقود الأخيرة وأصبحت خياراً مهماً لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة وتعتبر طاقة الرياح واحدة من أسرع الطرق لتوليد الكهرباء النظيفة وهي تعتبر أحد أنواع الطاقة المتجددة الأكثر استخداماً في العالم. وبما أن استخدام الرياح كمصدر للطاقة يمكن أن يخفف من اعتماد الدول على الوقود الاحفوري، فيمكن أن يساعد على تحقيق الاستدامة البيئية والتخفيف من الأثر البيئي السلبي للاحتباس الحراري. انخفض المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية للكهرباء (LCOE) لمشاريع الرياح البرية الجديدة المضافة في عام ٢٠٢١ بنسبة ١٥٪، على أساس سنوي إلى ٠.٠٣٣ دولار أمريكي/ للوحدة الكهربائية Kwh، وانخفض سعر الرياح البحرية بنسبة ١٣٪ إلى ٠.٠٧٥ دولار أمريكي/ للوحدة الكهربائية Kwh حسب تقرير الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) (World Energy Transitions Outlook, 2022)، وللقيام بأي مشروع لاستغلال طاقة الرياح يجب الالتزام بالنظم

الجمع بين نوع المولد ونوع محول الطاقة. يعمل المولد المتزامن سرعة دوران متزامنة Synchronously Rotating Speed لنظام التيار المتناوب المتصل به. يتطلب عمل المولد المتزامن تياراً مستمراً لاستثارة Excite الجزء الدوار وتجهز عن طريق حلقات منزلقة Slip Rings لإنتاج الفيض المغناطيسي الدوار. يتم ترتيب الملفات في الجزء الثابت Stator بحيث أنها تنتج الجهد الكهربائي ثلاثي الأطوار (Hemami، ٢٠١٢) و (Lebsin وآخرون، ٢٠١٥).

أنواع المولدات

يمكن لتوربينات الرياح أن تأتي مع أي نوع من المولدات ثلاثية الأطوار، كما ويمكن تلبية الطلب على التيار الكهربائي المتوافق مع الشبكة من خلال توصيل محولات التردد Frequency Converter حتى وإن كان مولد التيار الكهربائي المستخدم هو مولد تيار مستمر DC Generator. هناك أنواع عامة من المولدات المستخدمة في توربينات الرياح (Verma و Pachori، ٢٠١٥)

١- المولدات المتزامنة Synchronous Generators

٢- المولدات غير المتزامنة أو الحثية

Asynchronous or Induction Generators

أولاً: المولدات المتزامنة (SG)

يعمل المولد المتزامن كما موضح في الشكل (١) بالسرعة الدورية المتزامنة لنظام تيار متناوب متصل به. المولد المتزامن يحتاج إلى تيار مستمر في ملفات الجزء الدوار يمكن إدخالها إليه عن طريق حلقات الانزلاق لإنتاج الفيض المغناطيسي الدوار. المحرك الرئيسي (الرياح) يحرك الجزء الدوار من المولد لتشكيل حقل مغناطيسي ليحفز الجهد في ملفات الجزء الثابت Stator، ويتم ترتيب الملفات من الجزء الثابت بحيث

لتعويض الطاقة التفاعلية Reactive Power، وهي مصممة لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة في قيمة سرعة معينة (Manwell وآخرون، ٢٠٠٩) و (Hemami، ٢٠١٢). من أجل زيادة إنتاج الطاقة، تجهز بعض توربينات الرياح ذات السرعة الثابتة بمجموعات من الملفات. تتميز التوربينات الريحية ذات السرعة الثابتة بكونها بسيطة وقوية وموثوق بها ومثبتة جيداً. وتكلفة قطعها الكهربائية منخفضة، عيوبها هي أنه لا يمكن السيطرة على استهلاك الطاقة التفاعلية فيها، والإجهاد الميكانيكي وجودة نوعية الطاقة Power Quality محدودة، ونتيجة لسرعة تشغيله الثابتة، فإن جميع التقلبات Fluctuations في سرعة الرياح تنتقل بدورها إلى تقلبات في عزم الدوران الميكانيكي ثم تقلبات في الطاقة الكهربائية على الشبكة (Lebsin وآخرون، ٢٠١٥) و (Zhu و Goudarzi، ٢٠١٣).

٢- توربينات الرياح المتغيرة السرعة

تصمم توربينات الرياح المتغيرة السرعة لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة الهوائية Aerodynamic Efficiency لمدى واسع من سرعة الرياح بنظام سيطرة كهربائي أكثر تعقيداً من نظام توربينات الرياح ذات السرعة الثابتة، وهي مجهزة عادة بمولد حثي أو تزامني ومتصلة بالشبكة من خلال محول طاقة Power Converter الذي يتحكم بسرعة المولد. مزايا توربينات الرياح متغيرة السرعة هي زيادة التقاط الطاقة، وتحسين نوعية الطاقة وانخفاض الإجهاد الميكانيكي على توربينات الرياح، أما العيوب فهي الخسائر في الإلكترونيات الكهربائية Power Electronics، واستخدام المزيد من المكونات وزيادة تكلفة المعدات. إن استخدام الأنماط المتغيرة السرعة من توربينات الرياح يزيد من عدد أنواع المولدات المعمول بها، ويقدم أيضاً عدة درجات من الحرية في

ثابت وسرعة الدوران تتغير مع سرعة الرياح، لذلك فإن الجهد الناتج والتردد متغير ولا يمكن توفير إمدادات طاقة مستقرة. يصنع هذا النوع من المولدات بقدرات صغيرة (بسبب كلفة المغناط الثابتة وكتلتها الكبيرة)، لذلك فإن تكلفة كيلواط - ساعة من الإنتاج لهذا النوع لا تناسب مع التطبيقات التجارية وتكون مناسبة فقط للمناطق النائية.

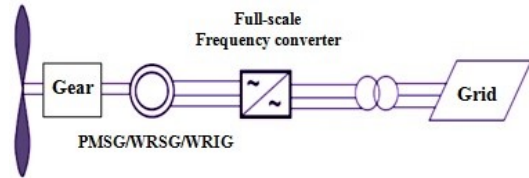
ثانياً: المولد الغير متزامن أو الحثي Asynchronous or Induction (IG)Generator

المولد الحثي الثلاثي الأطوار يستخدم نظرية الحث المغناطيسي لنقل الطاقة الكهربائية على شكل فيض مغناطيسي من الجزء الثابت إلى الدوار. تؤخذ الطاقة من مصدر خارجي لتنشيط الجزء الساكن، مما تسبب بدء التدوير تماماً مثل المحرك الحثي. إن سرعة دوران الجزء الدوار هي أقل قليلاً من سرعة الفيض المغناطيسي في الجزء الثابت، ويسمى هذا النوع أيضاً بغير المتزامن. عندما تتجاوز سرعة الدوران للمولد الحثي سرعة المجال المغناطيسي في الجزء الثابت، واتجاه الحركة في الجزء الدوار يتسق مع المجال المغناطيسي، فإن الجزء الدوار يميل إلى سحب المجال المغناطيسي من الجزء الثابت بشكل أسرع مما يسبب عزم دوران عكسي ينتج عنه عمل المولد الحثي كمولد في التردد والجهد من إمدادات الطاقة الأولية في الجزء الثابت (Hemami, ٢٠١٢) و (Lebsin وآخرون، ٢٠١٥) و (Pachori و Verma، ٢٠١٥) يمكن تصنيف المولدات الحثية وفقاً لبناء الجزء الدوار ونوع عملية الإثارة Excitation إلى:

١- المولد الحثي قفص السنجاب SCIG

يرتبط SCIG بصورة مباشرة مع الشبكة وتتغير سرعته بنسبة قليلة فقط بسبب التغير في سرعة الانزلاق

يتم إنتاج الجهد ثلاث الأطوار (Manwell وآخرون، ٢٠٠٩) و (Verma و Pachori، ٢٠١٥).



شكل (١) المولد المتزامن.

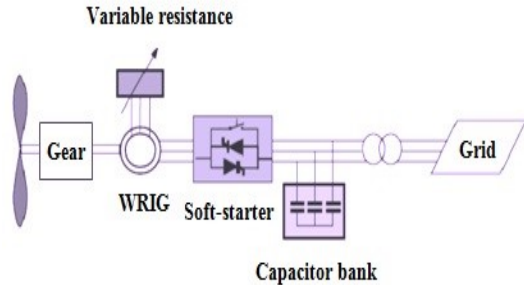
أ- مولد العضو الدوار ذو اللفائف المتزامن (WRSG)

توصل الملفات الساكنة مباشرة إلى الشبكة، وبالتالي يتم ضبط سرعة الدوران بدقة من قبل ترددها، ويأتي التيار المستمر لملفات الجزء الدوار بصورة مباشرة من حلقات الانزلاق أو موحد موجة دوار Rotating Rectifier، ولديها ميزة أنها لا تحتاج إلى علبة التروس Gear Box, GB، ولكن على حساب أن يكون مولد كبير وثقيل وسعة محول الطاقة بسعة Capacity تماثل سعة المولد.

ب- مولد المغناطيس الدائمي المتزامن (PMSG)

تمتلك مكائن المغناطيس الدائمي كفاءة أعلى مما هي عليه في المكائن الحثية، إلا أن المواد المستخدمة لإنتاج المغناطيس الدائم مكلفة، وصعبة العمل أثناء التصنيع، بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام الـ PMSG يتطلب استخدام محول الطاقة بسعة تساوي سعة المولد من أجل السيطرة على الجهد والتردد المماثل للشبكة. يتم توفير الفيض الدوار من المغناطيس الدائم، وقد تتسبب الطبيعة المتزامنة لـ PMSG مشاكل أثناء بدء التشغيل (التزامن وتنظيم الجهد) بسبب عدم توفر الجهد المستمر. هناك عيب آخر في PMSG هو أن المواد المغناطيسية حساسة لدرجة الحرارة ولذلك، يجب أن تكون درجة حرارة PMSG مسيطر عليها، وهناك حاجة إلى نظام للتبريد. إن المجال المغناطيسي الدوار

أن مدى التغير بالسرعة غالباً ما يقتصر على ١٠٪، وضَعْفُ السيطرة على القدرة الفعالة وغير الفعالة.

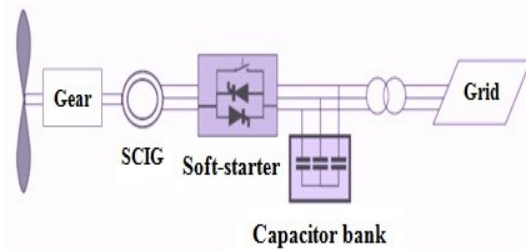


شكل (٣) مولد عضو الدوار ذو اللقائف.

ب. المولد الحثي مزدوج التغذية (DFIG)

مصطلح "تغذية مزدوجة" يشير إلى حقيقة أن الجهد على الجزء الثابت يتم تطبيقه من الشبكة والجهد على الجزء الدوار هو المحتث Induced من محول الطاقة. يسمح هذا النظام بتشغيل متغير للسرعة على نطاق كبير، ولكن مقيد. محول الطاقة يعوض الفرق بين التردد الميكانيكي والكهربائي عن طريق حقن تيار متغير التردد في الجزء الدوار، وبهذا فإنه أثناء التشغيل العادي والأعطال فإن سلوك المولد يحكمه محول الطاقة وأجهزة التحكم. يتكون محول الطاقة من جزئين اثنين، محول لجانب الجزء الدوار ومحول لجانب الشبكة، والتي يتم التحكم بهما بشكل مستقل عن بعضها البعض. يتحكم محول الجانب الدوار بالقدرة الفعالة وغير الفاعلة عن طريق التحكم بمركبة التيار للجزء الدوار، في حين يتحكم محول جانب الشبكة في الجهد الرابط المستمر DC-Link ليضمن عمل المحول بمعامل قدرة الوحدة Unity Power Factor. تمتلك DFIG العديد من المزايا، وليس بالضرورة أن يكون DFIG ممغنطاً من الشبكة فإنه يمكن أن يكون ممغنطاً من دائرة الجزء الدوار، كما أنها قادرة على توليد الطاقة التفاعلية التي يمكن تجهيزها

للمولد الناجمة عن التغيرات في سرعة الرياح، ولذلك، يتم استخدام هذا المولد لتوربينات الرياح ثابتة السرعة. المشكلة الرئيسية في هذا النوع هي تيار المغنطة ومعامل القدرة المنخفض نسبياً والذي يتم تعويضه عن طريق توصيل مكثفات بالتوازي مع المولد. في حالة حصول عطل Fault وعدم وجود نظام تعويض تفاعلي، فإن SCIG يمكن أن يؤدي إلى عدم استقرار الجهد الكهربائي في الشبكة وكما موضح في الشكل (٢).



شكل (٢) المولد الحثي قفص السنجاب.

٢- مولد عضو الدوار ذو اللقائف (WRIG)

هناك نوعان فرعيان من هذا النوع من المولدات:

أ. المولد الحثي ذو الانزلاق الأمثل (OSIG)

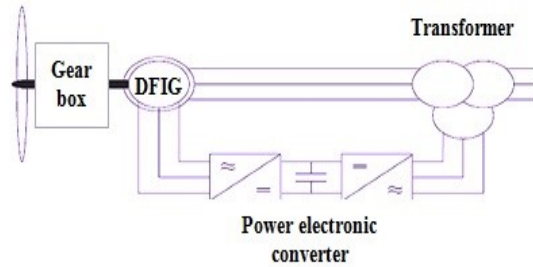
تسمح هذه الخاصية للمولد بأن يحصل على انزلاق متغير وأن يختار درجة الانزلاق المثلى، مما يؤدي إلى تقلبات أقل في عزم الدوران وإنتاج الطاقة. الانزلاق المتغير هي طريقة بسيطة جداً وموثوق بها وفعالة من حيث التكلفة. يمتلك WRIG مقاومة متغيرة للجزء الدوار والتي من خلالها يمكن التحكم في الانزلاق. يتم التحكم ضوئياً Optically، مما يعني أنه لا توجد حلقات انزلاق كهرو- ميكانيكي، ويتم توصيل الجزء الثابت من المولد مباشرة إلى الشبكة كما موضح في الشكل (٣). مزايا هذا المفهوم هو مولد ذو دوائر بسيطة، لا حاجة لحلقات الانزلاق وتحسين مدى سرعة التشغيل مقارنة مع SCIG، ومع ذلك، فإنه لا يزال يتطلب نظام تعويض الطاقة التفاعلية. وتشمل عيوبه

ذات السرعة الثابتة، ومن مزاياها زيادة التقاط الطاقة وتحسين نوعية الطاقة وانخفاض الإجهاد الميكانيكي على التوربينات، أما أنواع المولدات الكهريائية فليس لها علاقة باقتناص الطاقة، والجدول (١) يبين مقارنة بين المولدات الثابتة والمتغيرة المستخدمة في توربينات الرياح.

نسبة سرعة الحافة (TSR)

التوربين الذي يدور ببطء سيسمح للرياح بالمرور دون انقطاع من خلال الفجوات بين الشفرات، وإذا دار بسرعة سوف يظهر كجدار صلب للرياح، لذلك فمن الضروري في تصميم توربينات الرياح ان تتناسب السرعة الزاوية للتوربين مع سرعة الرياح من أجل الحصول على أقصى قدر من الكفاءة أو الدوران الأمثل. إذا كان دوران توربينات الرياح ببطء شديد، تعتمد TSR على تصميم توربينات الرياح الخاصة المستخدمة، شكل الجنيح Rotor Airfoil Profile الدوار المستخدمة، فضلا عن عدد الريش المستخدمة (Dykes وآخرون، ٢٠١٤). بالنسبة لتوربينات الرياح بثلاثة شفرات المتصلة بالشبكات، تذكر الأدبيات أن النسبة المثلى ل TSR من الرياح هي ٦-٨. ان نسبة سرعة الحافة عامل مهم في تصميم توربينات الرياح، كما يجب ان يتم اختيار توربينات الرياح لتعمل بأقصى معامل قدرة Cp ضمن معدلات الرياح السائدة في المناطق المنتخبة، لذا يمكن القول بأن نسبة سرعة الحافة تؤثر بصورة غير مباشرة بالتقييم الاقتصادي لعمل توربين الرياح في موقع معين.

إلى الجزء الثابت من قبل محول جانب الشبكة، وفي حالة الشبكة الضعيفة، حيث قد يتذبذب الجهد، يمكن أن يقوم DFIG بإنتاج أو امتصاص كمية من القدرة التفاعلية إلى أو من الشبكة وذلك لغرض التحكم في الجهد. المحول المستخدم في DFIG هو Back-Back Converter وهي أنواع غالباً ما يستخدم مع توربينات الرياح. الشكل (٤) يوضح المولد الحثي مزدوج التغذية.



شكل (٤) المولد الحثي مزدوج التغذية.

مقارنة بين المولد المتزامن والمولد الحثي

بنية الجزء الساكن لمولد متزامن يماثل ذلك للمولد الحثي، والفرق الرئيسي هو تصميم وبناء الجزء الدوار. ملف الجزء الدوار للمولد المتزامن يحتاج إلى تيار مستمر (DC) للإثارة لإنتاج المجال المغناطيسي للجزء الدوار ولكن الملفات المثبته Damping Winding للجزء الدوار من المولد الحثي تحتاج إلى أن تكون دائرة قصر Short Circuited لإنتاج المجال المغناطيسي الدوار (Hemami، ٢٠١٢) و (Lebsin وآخرون، ٢٠١٥) و (Verma و Pachori، ٢٠١٥). تم انتخاب توربينات رياح متغيرة السرعة لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة الهوائية لمدى واسع من سرعة الرياح بنظام سيطرة كهريائي أكثر تعقيداً من توربينات الرياح

جدول (١) مقارنة بين المولدات المتزامنة والحثية المستخدمة في توربينات الرياح.

Items	Synchronous Generator (المولد المتزامن)	Induction Generator (المولد الحثي)
Stator Structure	Three-phase Winding	Three-phase Winding
Rotor Structure	Has Evidenced and Controlled Pole Rotor Winding Need to Connect To DC	Has Cage Rotor, Winding Doesn't Need to Connect To DC
Speed	Operating at Synchronous Speed	Operating at Over-Synchronous Speed
Reactive Power Compensation	No-need	From System or Connect Top Capacitor
End Voltage Control	Cause Exciting System Control	Cannot Control
Converter Device	Needed	Not Needed
Maintenance	Complicate and Difficult	Simple and Easy
Cost	Expensive	Cheap

٥- انخفاض كفاءة الدوار بسبب قوة السحب Drag Force والخسائر الأطراف.

٦- تؤدي سرعات الدوران المفرطة إلى توربين عرضة إلى الفشل، وحتى التفكك.

وتتميز العلاقة بين سرعة الرياح (الخطية) ومعدل دوران التوربين (Ochieng و Manyonge)، بعامل يعرف باسم نسبة سرعة الحافة (TSR):

$$\text{Tip Speed Ratio, } \gamma = \frac{\text{speed of rotor tip}}{\text{wind speed}} = \frac{v}{v} = \frac{\omega r}{v} \dots (1)$$

حيث:

V- wind speed (m/sec)

v = ωr -velocity of rotor tip (m/sec)

r- rotor radius (m)

$\omega = 2\pi f$ - angular velocity (radian/sec)

f- frequency of rotation (Hz) or (sec^{-1})

إن اختيار نسبة سرعة الحافة لتصميم معين يعتمد على عدة عوامل، وبشكل عام فإن اختيار نسبة سرعة عالية هو ميزة مرغوب فيها (Dykes وآخرون، ٢٠١٤). لأنه يؤدي إلى سرعة دوران عالية وهي اللازمة لتشغيل المولد الكهربائي بكفاءة، مع ذلك، فإن نسبة السرعة العالية ينتج عنها العديد من العيوب المحتملة:

١- الشفرات الدوارة بسرعة أكبر من (80 sec^{-1}) سوف تكون عرضة لتآكل الحواف، وسوف تتطلب استخدام أنواع طلاء مقاومة للتآكل خاصة تشبه إلى حد كبير في تصميم شفرات الهليكوبتر.

٢- توليد الضوضاء في نطاقات مسموعة وغير مسموعة.

٣- الاهتزاز، لاسيما في حالات اثنين أو شفرة واحدة.

٤- صعوبة بدء التشغيل إذا كان محور التدوير Shaft يحتاج إلى عزم أكبر.

معامل القدرة (Cp) Power Coefficient

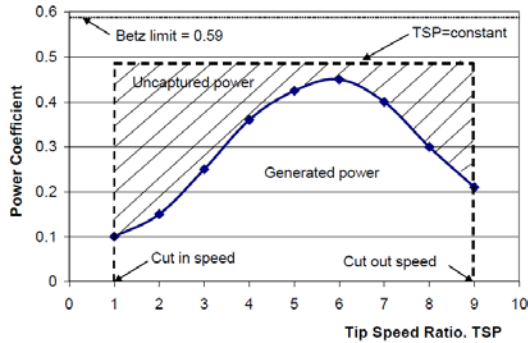
تعطى الطاقة المتولدة بواسطة الطاقة الحركية لتدفق الرياح الحر بواسطة (Ochieng) و (Manyonge، ٢٠١٤):

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \dots \dots (6)$$

ويعرف معامل القدرة على أنه القدرة المستخرجة من التوربينات مقارنة بالقدرة المتاحة في تيار الرياح:

$$C_p = \frac{P_t}{P} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} \dots \dots (7)$$

إن الحد الأقصى لعامل القدرة الذي يمكن تحقيقه هو % ٥٩.٢٦ (حد Betz Limit)، وفي الحياة العملية، تتراوح قيم حد التي يمكن الحصول عليها في حدود ٤٥ في المائة. تعود هذه القيمة دون الحد النظري إلى الفصور والخسائر التي تعزى إلى الأنواع المختلفة، وشفرات الدوار، وتصاميم التوربينات (Ochieng و Manyonge، ٢٠١٤).



شكل (٥) معامل القدرة لتوربين ربح كدالة لـ TSR.

تعطى الكفاءة القصوى النظرية لتوربينات الرياح من قبل حد بيتز بحوالي ٥٩ في المائة، وعملياً، تعمل توربينات الرياح تحت حد بيتز. في الشكل (١) أنف الذكر بالنسبة للتوربينات بريشتين، إذا تم تشغيلها بمعدل السرعة لحافة الذراع بمقدار ٦، فإن معامل القدرة الخاص بها سيكون حوالي ٠.٤٥، عند قيمة

لذلك فإنه لتوربين معين ذو طول شفرات (١٠ m) يعمل بمنطقة سرعة الرياح فيها مقدارها (١٥ m/sec) تكون الـ TSR له بمقدار (٤).

يمكن الاستدلال على القيمة المثلى لنسبة سرعة الحافة (Ragheb، ٢٠١٤) من خلال اقتران الفترة الزمنية التي تستغرقها الرياح المضطربة (نتيجة تفاعلها مع ريش التوربين t_w)، مع الفترة الزمنية اللازمة لإحدى الريش لتحل محل الريشة التي سبقتها t_s :

$$t_s = \frac{2\pi}{n\omega} \dots \dots (2)$$

إذا كان طول تيار الهواء المضطرب هو s ، يتم إعطاء الفترة الزمنية للرياح للعودة إلى وضعها الطبيعي من قبل بـ

$$t_w = \frac{s}{V} \dots \dots (3)$$

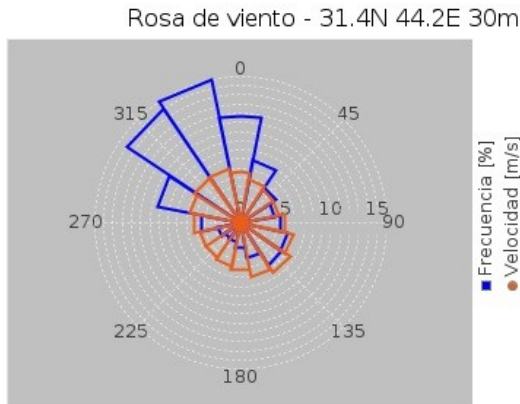
هنا، إذا كان $t_s > t_w$ ، فإن جزء من الريح لن تتأثر، وإذا كان $t_s < t_w$ ، فإن جزء من الريح سوف لن يمر من خلال شفرات التوربين، لذلك فإن أقصى قدرة يمكن الحصول عليها عند تساوي الزمنين (تقريباً):

$$\begin{aligned} t_s &\approx t_w \\ \frac{2\pi}{n\omega} &\approx \frac{s}{V} \rightarrow \frac{n\omega}{V} \approx \frac{2\pi}{s} \\ \omega_{opt.} &\approx \frac{2\pi V}{ns} \dots \dots (4) \end{aligned}$$

وبالتالي، لاستخراج أعظم قدرة، يجب أن تدور شفرة التوربين في تردد دوران يتناسب مع سرعة الرياح الواردة، وهذا التردد يتناسب عكسياً مع نصف قطر الدوران، ويمكن وصفه من خلال التالي:

$$\lambda_{opt.} \approx \frac{\omega_{opt.} r}{V} \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{r}{s} \right) \dots \dots (5)$$

عناوين تفسيرية (Legend) الشكل (٦) يمثل نموذج لزهرة الرياح.



شكل (٦) نموذج لزهرة ريح تظهر في أطلس شركة خيوسن.

تم تحليل نشاط الرياح لخمس مواقع (مختلفة) في وسط وجنوب العراق، حيث يوجد لدى دائرة الطاقات المتجددة تسعة أبراج انوائية موزعة على مناطق مختلفة من العراق وكما في الجدول (٢)، ولم يتم اعتماد بيانات هذه الأبراج كونها بدأت بالعمل عام ٢٠١٥، وتحتاج الى عشر سنوات (على الأقل) لإثبات موثوقية قراءات هذه الأبراج.

الجدول (٣) يبين سرع واتجاهات الرياح على ارتفاع (٣٠م) في المناطق ادناه مع ساعات نشاطها (تكرارها).

سنقوم بإجراء الحسابات لثلاثة أنواع من توربينات الرياح، جدول (٤)، وللمواقع الخمسة أعلاه، ثم نجري الحسابات المالية لعمر المشروع لاستخراج قيمة رأس المال على مدى العمر التشغيلي (٢٥ سنة)، المصاريف التشغيلية (الصيانة الوقائية فقط كون الوقود وهو الرياح هنا مجاني)، حساب عائدات التشغيل طبقاً لما يقوم كل توربين بإنتاجه من طاقة كهربائية وحسب قدرته وموقعه، ومن ثم حساب صافي العائدات لبيان الربحية وفترة استعادة رأس المال (Ragheb، ٢٠١٧).

سرعة قطع Cut-In Speed، معامل القدرة هو فقط (٠.١)، وسرعة الـ Cut-Out هو ٠.٢٢. وهذا يشير إلى أنه لأقصى قدر من اقتناص القدرة يجب تشغيل توربينات الرياح حول النسبة المثلى لسرعة الحافة الخاصة بها الرياح. تحتوي توربينات الرياح الحديثة على اثنين أو ثلاثة شفرات رقيقة ويتم تعيينها على أنها دوارات صلابة منخفضة. وهذا يعني وجود جزء ضئيل من المساحة التي مسحتها الدوارات هي مساحات صلبة، ويؤدي تكوينها إلى توافق مثالي مع متطلبات التردد لمولدات الكهرياء الحديثة كما يقلل من حجم علبه التروس المطلوبة فضلاً عن زيادة الكفاءة. ويؤدي هذا الترتيب إلى نسبة عالية نسبياً من سرعة الحافة بالمقارنة مع الدوارات ذات عدد كبير من الشفرات مثل مطحنة الرياح الأمريكية الناجحة جداً المستخدمة في ضخ المياه في الغرب الأمريكي وفي جميع أنحاء العالم. هذا الأخير يتطلب عزم بداية دوران عالي.

الحسابات النظرية

يتوفر لدى دائرة الطاقات المتجددة أطلس رياح مُعد من قبل شركة خيوسن الإسبانية لجمهورية العراق. يمثل هذا الأطلس قاعدة بيانات استرشادية للأماكن الواعدة والتي يكون فيها نشاط رياح يمكن استغلاله لإنشاء مزارع لتوربينات الرياح. البيانات التي تم بموجبها بناء الأطلس هي بيانات فضائية وللفترة من عام ٢٠٠٠ إلى ٢٠١١، ويعطي معدلات سرع الرياح واتجاهاتها ممثلة بزهرة الرياح (Wind Rose) بواقع زهرة لكل ٤km²، كثافة الطاقة (Power Density)، معاملات ويبيل (Weibull parameter)، بالإضافة إلى سرع الرياح (Velocity)، كل هذه البيانات لارتفاعات (٣٠م و ٥٠م و ١٠٠م) مرسمة على خارطة العراق كاملة ومفسرة من خلال

• سعر شراء وتنصيب التوربين الواحد = ١.٢٥ \$
.W

التوربينات الثلاثة التي تم انتخابها مستخدمة على نطاق اقتصادي واسع في الولايات المتحدة الأمريكية (Hand و Mone، ٢٠١٧)

الجدول (٥) يمثل الكلفة الاستثمارية وكلفة الصيانة والتشغيل للتوربينات الثلاثة وعلى مدى عمر المشروع.

سنعتمد في حساباتنا على المعلمات التالية:
(Hand و Mone، ٢٠١٧)

• العمر التشغيلي = ٢٥ سنة

• نسبة الفائدة = ٦%

• كلفة الصيانة والتشغيل = ٢٪ من قيمة التوربين الواحد

• سعر بيع الوحدة الواحدة من الطاقة الكهربائية = ٠.٠٦ \$ /Kwh

جدول (٢) مواقع الأبراج الأنوائية في محافظات وسط وجنوب العراق مؤشر عليه المواقع الواحدة.

ت	موقع البرج	احداثيات البرج
1	النجف الأشرف - اشبجه	N:31°40'E:44°18'
2	كربلاء المقدسة - الرزاة	N:32°41'E:43°54'
3	الديوانية - النورية اكلية الزراعة	N:31°57'E:44°46'
4	المتنى - السلمان	N:30°34'E:44°34'
5	ذي قار - ناحية الفجر	N:31°51'E:45°47'
6	ميسان - علي الغربي ا محمية الريم	N:32°34'E:46°48'
7	البصرة - هور المسحب	N:30°37'E:47°40'
8	واسط - الشهابي	N:32°46'E:46°24''
9	واسط - الدجيلي	N:32°22'E:46°13'

جدول (3a) يبين سرع واتجاهات الرياح على ارتفاع (30 متر) للمواقع المختارة.

Location	NW			SE		
	سرعة	اتجاه	سرعة	اتجاه	سرعة	اتجاه
النجف الأشرف-شبجه	6	6	5.8	6	6.5	6
	1401.6	1314	788.4	481.8	481.8	438
المتنى-السلمان	5.8	5.9	5.9	6	6.4	6.8
	963.6	876	569.4	438	455.5	420.48
ذي قار-الفجر	5	5.5	5	5.8	6	5.2
	1401.6	2190	1051	525.6	481.8	438
ميسان-علي الغربي	5.5	6.4	5.5	6.2	4.8	4
	963.6	2628	1489	788.4	438	350.4
واسط-الشهابي	4.8	6.8	5.5	6	4.4	3.5
	613.2	2628	2015	963.6	350.4	175.2

جدول (3b) يبين سرع واتجاهات الرياح على ارتفاع (30 متر) للمواقع المختارة.

Location	NE			SW			Sum of Hours
النجف الأشرف-شبحه	4.8	4.4	4	5.8	5.7	5.6	6841.6
	595.7	420.5	306.6	175.2	175.2	262.8	
المثنى-السلطان	5.2	5.4	5.7	5.3	4.8	5	6359.8
	508.1	630.7	744.6	262.8	219	271.56	
ذي قار-الفجر	3.8	3.5	4	3.6	3.8	3.8	6876.6
	131.4	131.4	262.8	87.6	87.6	87.6	
ميسان-علي الغربي	4	3.8	4	3.5	3.5	3.5	7183.2
	87.6	87.6	87.6	87.6	87.6	87.6	
واسط-الشهابي	3.8	3.5	3.5	2	2	2	7533.6
	175.2	175.2	175.2	87.6	87.6	87.6	

جدول (٤) مواصفات فنية لثلاثة أنواع من توربينات الرياح.

	Rated Power (kW)	Hub Height (m)	Blade Length (m)	Cut-In Speed (m/sec)	Rated Speed (m/sec)	Gen. Type
١	٦٠٠	٤٨	24	3.5	12.5	Asynchronous, 1500rounds/ min,690volt
٢	١٥٠٠	٥٩	41.25	3.5	11.5	Double Fed Asynchronous 1500 U/min,690volt
٣	٢٣٠٠	٨٠	49	3.5	12.5	Asynchronous, 690 Volt

جدول (٥) كلفة الاستثمار وكلفة الصيانة والتشغيل للتوربينات الثلاثة.

	Acc. Cost (Million \$)	M&O Cost (Million \$)
Turbine #1	3.218903	0.762234
Turbine #2	8.047258	1.905584
Turbine #3	12.33913	2.921896

جدول (٦) نتائج تشغيل التوربين رقم ١ -

	Annual Production (MWh)	Capacity Factor %	Accumulated Income (million \$)	Net profit (million \$)	Pay Back Period (years)
النجف الاشرف- اشبحه	617.20	11.74	3.14	-0.84	12
المثنى- السلطان	584.84	11.13	2.97	-1.01	13
ذي قار- الفجر	464.51	8.84	2.36	-1.62	16
ميسان- علي الغربي	653.87	12.44	3.32	-0.66	12
واسط- الشهابي	709.91	13.51	3.61	-0.37	11

جدول (٧) نتائج تشغيل التوربين رقم ٢-

	Annual Production (MWh)	Capacity Factor %	Accumulated Income (million \$)	Net profit (million \$)	Pay Back Period (years)
النجف الاشرف- اشبجه	1988.318	15.13	10.10	0.15	9.62
المثنى- السلطان	1884.067	14.34	9.57	-0.38	10.15
ذي قار- الفجر	1496.442	11.39	7.60	-2.35	12.78
ميسان- علي الغربي	2106.45	16.03	10.70	0.75	9.08
واسط- الشهابي	2286.996	17.40	11.62	1.67	8.36

جدول (٨) نتائج تشغيل التوربين رقم ٣-

	Annual Production (MWh)	Capacity Factor %	Accumulated Income (million \$)	Net profit (million \$)	Pay Back Period (years)
النجف الاشرف- اشبجه	3730.179	18.51	18.96	3.69	7.86
المثنى- السلطان	3962.798	19.67	20.14	4.88	7.40
ذي قار- الفجر	2807.369	13.93	14.27	-1.00	10.45
ميسان- علي الغربي	3951.8	19.61	20.08	4.82	7.42
واسط- الشهابي	4290.514	21.29	21.80	6.54	6.83

(كمية الطاقة المنتجة بوحدة * Kwh سعر الوحدة الكهربائية)
- (الكلف الثابتة والمتغيرة)

التوربينات عادةً إلى فئات Classes طبقاً لسرعة الرياح العاملة، حيث يتم تحديد سرعة الرياح (طبقاً لمواصفة اللجنة الدولية الكهروتقنية (IEC 61400) بالاعتماد على ثلاث عوامل أساسية هي متوسط سرعة الرياح بالموقع (Vavr) وسرعة أقصى عاصفة على مدى ٥٠ عاماً (V50)، ونسبة الاضطراب (الانحراف المعياري) في تغير سرعة الهواء منسوبة لسرعة قياسية هي (١٥ \m sec). ولا يخفى أن مواقع المناطق أعلاه تسود بها درجات حرارة عالية صيفاً مما يستلزم تعديل مواصفات التوربين بما يتناسب مع المناطق الصحراوية Hot Climate Version. كذلك، يجب توفر البنية التحتية الأساسية اللازمة مثل توفر وانتشار شبكات توزيع الكهرباء وملائمة الطرق المؤدية والمحيطية لنقل المعدات والمكونات ذات الأقطار والأوزان الكبيرة.

تم حساب صافي الأرباح نظرياً بالدولار من خلال المعادلة:
صافي الأرباح = التدفقات النقدية الخارجة - التدفقات النقدية الداخلة

الأرباح السنوية (Annual Profit)

تم إجراء حسابات الإنتاج السنوي لكل توربين نظرياً من خلال الجدول رقم (٣) الذي يبين سرعة واتجاهات الرياح وساعات الاشتغال (التكرار) لكل توربين لمدة عام كامل، وتم تقاطع هذه السرعة بالمنحني الخاص لكل توربين power-speed Characteristics (القدرة المنتجة من التوربين مقابل سرعة الرياح) للحصول على الطاقة المنتجة من كل توربين بوحدة Mwh، حيث يبين الجدول (٦) نتائج تشغيل التوربين رقم (١) في المناطق المختارة، والجدولان (٧) و(٨) للتوربينين (٢ و٣) (Hand و Mone، ٢٠١٧).

النتائج والمناقشة

N يتبين مما سبق أن هناك أنواع متعددة من توربينات الرياح تتنوع بتنوع أجزاءها ومتطلبات الموقع، تصنف

Dykes K.; Platt A.; Guo Y.; Ning A.; King R.; Parsons T.; Petch D. and Veers P., (2014). "Effect of Tip-Speed Constraints on the Optimized Design of a Wind Turbine", Technical Report NREL/TP-5000-61726.

Goudarzi N. and Zhu W. D. (2013). "A Review on The Development of Wind Turbine Generators Across the World", Int. J. Dynam. Control 1,192–202 DOI 10.1007/s40435-013-0016-y.

Hemami Ahmad, (2012). "Wind Turbine Technology", Cengage Learning.

Lebsin A.; Bentounsi A.; Benbouzid M. E. H. and Mangel H. (2015). "Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study", J. Electrical Systems 11-3, 281-295.

Manwell J. F.; McGowan J. G. And Rogers A. L.; (2009). "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", Second Edition, John Wiley and Sons Ltd.

Mone Christopher and Hand Maureen, (2015). " Cost of Wind Energy Review", Technical Report NREL/TP-6A20-66861, Revised May 2017.

Ochieng P. O. and Manyonge A. W., (2014). "Mathematical Analysis of Tip Speed Ratio of a Wind Turbine and Its Effects on Power Coefficient", International Journal of Mathematics and Soft Computing 4(1), 61 – 66.

Ragheb M. (2014). "Optimal Rotor Tip Speed Ratio", Internet Publications.

Ragheb M. (2017). "Economics of Wind Energy", Internet Publications.

توضح الجداول (٦ و ٧ و ٨) أن تشغيل توربين بقدره عالية (نسبياً) يعطي عامل سعة أكبر، إلا أنه نتيجة للكلفة الابتدائية العالية، وكون معامل السعة واطئ، حيث يقدر عامل السعة للتوربينات عالمياً بحدود (٤٠٪)، فإن فترة استرداد رأس المال طويلة خلال فترة عمر المشروع، بمراجعة نتائج تشغيل أنواع التوربينات للمناطق الخمسة المختارة (الجداول ٦ و ٧ و ٨) يتبين لنا الآتي:

١. ان توربين الرياح نوع Asynchronous 690 (الثالث) هو أفضل التوربينات للعمل في هذه المناطق كون معامل القدرة لهذا التوربين أعلى من غيره لذا فإن الطاقة المستخرجة من هذا التوربين اعلى من غيره من التوربينات، وبذلك ستكون فترة استرداد المبالغ الاستثمارية اقصر من غيره.

٢. إن ترتيب الأولوية للمناطق الخمسة لتشغيل هذا التوربين هي حسب التسلسل (١ - ٥):

أ. الشهابي-واسط.

ب. علي الغربي-ميسان.

ج. شبجة - النجف الاشرف.

د. السلطان - المثنى.

هـ. الفجر - ذي قار.

إن النتائج أعلاه تم الحصول عليها من بيانات استرشادية، وتبقى النتيجة الأدق عندما يكون هناك تحليل ومحاكاة بالاعتماد على بيانات أرضية وعند مستوى ارتفاع التوربين للتخلص من جميع التقريبات والفرضيات.

المصادر

الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (٢٠١١)، التقرير الخاص بشأن مصادر الطاقة المتجددة والتخفيف من آثار تغير المناخ، ص ٢٠.

Verma Neha, Pachori Arun, (2015). "Theoretical Approach for Comparison of Various Types of Wind Generator Systems", International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering (IJRREEE), 2(2), 29-35.

World Energy Transitions Outlook, (2022), International Renewable Energy Agency, P 44.