# دراسة فنية – اقتصادية لمشروع توليد الكهرباء بطاقة الرياح بسعة 26 ميجاوات بمسلاتة

**د. نوري أحمد الكـــــشريو**
جامعة طرابلس، كلية الهندسة، قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية
طرابلس، ليبيا
n.alkishriwi@uot.edu.ly

**د. حميد حميدة الشروالي**
جامعة طرابلس، كلية الهندسة، قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية
طرابلس، ليبيا
h.sherwalli@uot.edu.ly

*الملخص* – **تشهد ليبيا طلباً متزايداً على الطاقة تعتمد في مجابهته على حرق المزيد من الوقود الهيدروكربوني الناضب والملوث للبيئة، في حين تتمتع بموارد ريحية مهمة تمثل مصدرًا مهماً لسد العجز في الإمداد الطاقي في البلاد والحد من التلوث البيئي. يعتبر تقييم هذه الموارد الريحية أهم مرحلة من مراحل تطوير مزارع الرياح. فتقديرات كمية الطاقة المنتجة تعتمد اعتمادا كليا على نتائج تقييم الموارد الريحية وبالتالي في تحديد جدوى مشروع مزرعة الرياح المقترح من عدمه. في هذه الورقة تم تقييم إمكانات وموارد طاقة الرياح من قياسات سرعة الرياح واتجاهها في محطة القياس بموقع المشروع بمسلاتة. حيث استخدمت البيانات التي تم جمعها على مدى فترة من السنوات لتحليلها إحصائيا وإيجاد متوسط القيمة السنوية والتوزيع التكراري لسرعة الرياح واتجاهها. كذلك تم حساب متغيرات معادلة فايبول (*k & c*) باستخدام طريقة المربعات الصغرى. بعد ذلك تم مقارنة البيانات المقاسة بمتغيرات معادلة فايبول وذلك لمعرفة مدى الترابط بينها وتحليلها لكل شهر ومن ثم لسنة كاملة. بعد ذلك تم حساب كمية الطاقة السنوية المنتجة وكذلك على مدى عمر المشروع (20 سنة) من مزرعة رياح بقدرة 26.4 ميجاوات باستخدام عدد 16 مروحة مصنعة من قبل شركة أم تورس (Mtorres) الإسبانية بقدرة 1.65 ميجاوات للمروحة حيث يصل ارتفاع البرج الى 71 متر وقطرها الدوار الى 82 متر.**
**كما تم إجراء تحليل فني واقتصادي تفصيلي لأداء مزرعة الرياح المقترحة على أساس نتائج تقييم الموارد الريحية الخاصة بمدينة مسلاتة باستخدام برنامج الجداول الألكترونية (Excel) حيث تم إعداد برنامج شخصي يقوم بالمحاكاة الديناميكية على مدار العام وبخطوة زمنية قدرها 10 دقائق. أشتمل التحليل أيضا على مقارنة الطاقة المنتجة من طريقتين: (i) برمجية (SAM) و(ii) برمجية (Excel) عن طريق استخدام التوزيع التكراري لسرعات الرياح الفعلية مع منحنى القدرة لتربينة الرياح أم تورس (Mtorres) من المصنّع. وقد تم في هذا التحليل حساب إنتاجية مزرعة الرياح لكل ساعة طوال سنة كاملة. أقصى إنتاجية لمزرعة الرياح وصلت إلى 74 جيجاوات ساعة، أي ما يعادل نسبة استخدام قدرها 32.1%، وكانت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية للحالة المرجعية 70.3 دينار/ميجاوات ساعة وبطول فترة لاسترداد رأس المال 11.3 سنة ومعدل عائد داخلي (IRR) يساوي 7%. كما تم احتساب انخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 750 ألف طن في 20 سنة لمزرعة الرياح.**

*الكلمات المفتاحية:* **طاقة الرياح، الموارد الريحية، الطاقة الكهربائية المنتجة، تكلفة إنتاج وحدة الطاقة**

## 1. مقدمة

إن تاريخ استخدام طاقة الرياح يعود الى أكثر من 2000 سنة حيث استخدمت في ضخ المياه وطحن الحبوب، بينما ظهرت التربينات الريحية بشكلها الحالي أواخر سنة 1800 بالدانمرك وبالتحديد سنة 1890 لإنتاج الكهرباء. تم تركيب أول مروحة في العالم بسعة الميجاوات سنة 1941 إلا أنه بعد فترة تشغيل دامت 1100 ساعة فقدت ريشتها وتوقفت عن العمل. أستمر هذا التوقف لمدة 40 سنة حتى نهاية القرن العشرين وبداية القرن الواحد والعشرين حيث عاد الأهتمام بطاقة الرياح وبقوة بدافع الخوف من أرتفاع أسعار النفط والغاز من جهة والتغيرات المناخية من جهة أخرى. نتيجة لذلك زاد مقدار الطاقة المنتجة من طاقة الرياح بشكل كبير وسريع.

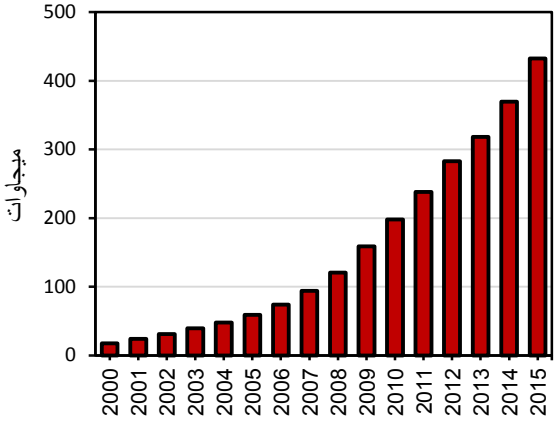
استلمت الورقة بالكامل في 1 نوفمبر 2016 وروجعت في 13 نوفمبر 2016 وقبلت للنشر في 14 نوفمبر 2016 ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 17 نوفمبر 2016 .

فالسعي إلى الحد من الآثار البيئية لموارد الطاقة التقليدية من ناحية ومواجهة الطلب المتزايد على الطاقة من ناحية أخرى دفع في أتجاه البحث في الطيف الواسع لمصادر الطاقات المتجددة، حيث لاقت طاقة الرياح الاهتمام الأكبر لكونها متوفرة بشكل عام على مستوى العالم وتطورت تقنياتها بشكل ملحوظ وكبير حيث برزت على الساحة العالمية باعتبارها من الخيارات الاستراتيجية لتلبية الاحتياجات المستقبلية من الطاقة. حيث تعتبر المناطق التي تتوفر فيها الرياح بسرعات تتجاوز 5 متر/ثانية من المواقع الملائمة لتوليد الطاقة الكهربائية. فطاقة الرياح في طبيعتها نظيفة ووفيرة وأسعارها منخفضة مقارنة بالتقنيات الأخرى للطاقات المتجددة لذلك أصبحت أحد أهم البدائل المتاحة عالمياً وأكثرها نموا من بين كل مصادر الطاقة المتجددة في كل من الدول المتقدمة والنامية على حد سواء، حيث وصلت القدرة المركبة من طاقة الرياح في سنة 2015 وحدها الى أكثر من 60 جيجاوات، بينما وصلت القدرة الكلية المركبة المتراكمة في العالم من نفس التقنية حتى نهاية سنة 2015 الى حوالي 430 جيجاوات [1] كما هو مبين بالشكل رقم (1). وهو ما يجعل من طاقة الرياح المستخدمة لتوليد الكهرباء الأسرع نمواً من جميع الأنواع الأخرى للطاقات المتجددة لتوليد الكهرباء في جميع أنحاء العالم.

تعتبر المنطقة العربية عامة وشمال افريقيا خاصة من أهم مناطق توفر هذه الطاقة والتي يتوقع أنْ يكون لها دور فعّال في توليد الطاقة الكهربائية. فعلى سبيل المثال وصلت القدرة المركبة من طاقة الرياح لإنتاج الكهرباء في المغرب ومصر وتونس الى 787، 610 و 245 ميجاوات على التوالي، بنهاية عام 2015، [1].

في ليبيا يتم إنتاج كل الكهرباء في الوقت الحاضر عن طريق محطات توليد الكهرباء التقليدية باستخدام الوقود الأحفوري من النفط، والغاز الطبيعي. مع أنّ ليبيا لا تزال من أهم منتجي النفط والغاز في أفريقيا والعالم، إلاّ أنّ النمو الاقتصادي والاجتماعي المتسارع والتزايد في عدد السكان ونمو المدن بوتيرة عالية يجعل الفرد في ليبيا أيضاً من أكبر مستهلكي الطاقة في العالم. فالطلب على الكهرباء في ليبيا حالياً مرتفعٌ للغاية حيث تضاعف تقريباً خلال العقد الماضي وسيواصل النمو في المستقبل المنظور بمعدلات سنوية مرتفعة تتراوح بين 7 و8%. أدّى التزايد المستمر في استهلاك الطاقة الكهربائية الى مضاعفة الأحمال على محطات التوليد وبالتالي فإنّ الكهرباء المنتجة لا تكفي المستهلكين على مدار العام إلاّ إذا شُيّدت المزيد من محطات الطاقة.

على العكس من الاهتمام المبكر لاستخدام طاقة الرياح لتوليد الكهرباء في دول المنطقة مثل المغرب ومصر وتونس، فأنه في ليبيا لم تستكمل بعد أي من مشروعات طاقة الرياح والمستهدفة من ضمن خططها المستقبلية. علماً بأن وزارة الكهرباء والجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة كانا قد أعدا خطة واقترحا تنفيذ عدد من المشروعات ضمن خطة طموحة تهدف إلى استغلال المصادر المتاحة من الطاقات المتجددة وذلك في عدد من المناطق وبقدرات وسعات مختلفة باستخدام تقنيات طاقة الرياح والطاقة الشمسية ومن ضمن هذه المشروعات مشروع مزرعة رياح الفتائح بمدينة درنة ومشروع مزرعة رياح مسلاتة لتوليد الطاقة الكهربائية بقدرة إجمالية للمشروعين تساوي 60 ميجاوات في مرحلته الأولى ويصل الى 120 ميجاوات في مرحلته الثانية.




شكل رقم (1): القدرة المركبة التراكمية في العالم لطاقة الرياح، [1].

يعتبر مشروع مزرعة الرياح بمسلاتة أول مشروع لاستغلال طاقة الرياح يتم تطويره وتنفيذه في ليبيا بسعة 26.4 ميجاوات وهو ما يمثل نسبة 0.5 % من القدرات المثبّتة في ليبيا. مع أن سعة المشروع صغيرة نسبيا الا انه سيكون لنجاح تنفيذه أثرا كبيرا على التطوير المستقبلي لصناعة طاقة الرياح في البلاد. فبالرغم من نضج تكنولوجيا طاقة الرياح على المستوى العالمي لازالت هذه التكنولوجيا جديدة في ليبيا وأن بداية تطبيقها سيوفر الخبرة اللازمة لتنفيذ مشاريع مستقبلية في طاقة الرياح وسيسهم بصورة مباشرة في زيادة عملية توليد وتقديم طاقة متجددة بأسعار منخفضة وصديقة للبيئة والتي تسهم قبل كل شيء في دعم التنمية وفي خلق بيئة داعمة لاستثمارات القطاع الخاص وتحسين الإدارة المالية من خلال تقليل الاحتياج الى دعم الطاقة. علاوة على ذلك سيظهر المشروع جدوى تطوير طاقة الرياح في ليبيا وسيشجع استثمارات القطاع الخاص على المشاركة في قطاع الطاقة.

تهدف الدراسة الى تحليل الموارد والإمكانات الريحية المتوفرة بمحمية الشعافيين بمسلاتة وذلك لاستثمار الطاقة الريحية المتاحة بالموقع بحيث يوفر طاقة كهربائية و يحقق جدوى اقتصادية وذلك من خلال تجميع البيانات الريحية التي تم تسجيلها كل 10 دقائق على ارتفاعات مختلفة (10 و20 و40 متر) والمتعلقة بسرعة الرياح واتجاها والعمل على تحليلها بناء على توزعها خلال أشهر السنة وذلك من أجل الوصول الى نسب تكرار سرعة واتجاهات الرياح وبيان أكثر الاتجاهات والأشهر تكرارا خلال السنة ومعدل سرعة كل أتجاه ومعرفة أي الاتجاهات والأشهر التي تتوفر فيه أكبر سرعة للرياح وينتج أكثر طاقة كهربائية. أيضا قد تم التركيز على تقدير كمية الطاقة الشهرية والسنوية التي يمكن أن تتولد من مزرعة رياح بسعة 26.4 ميجاوات.

تم إجراء تحليل فني واقتصادي تفصيلي لأداء مزرعة الرياح المقترحة حيث تم في هذا التحليل حساب إنتاجية المزرعة وتكلفة إنتاج الكيلووات ساعة من طاقة الرياح على مدى عمر المشروع أخذا في الاعتبار أنواع الفقودات المختلفة بالإضافة الى معامل تهالك المشروع مع الزمن.

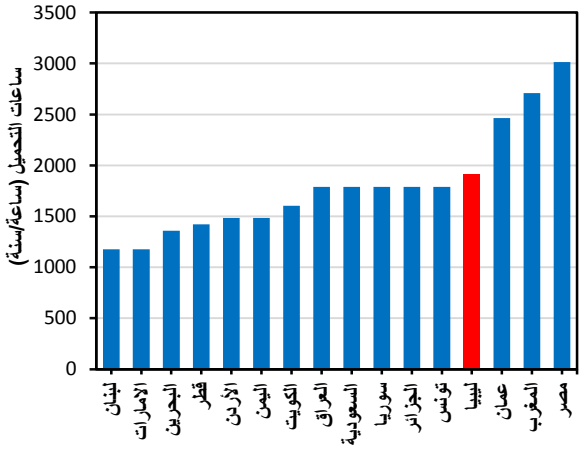
## 2. إمكانات طاقة الرياح في ليبيا

تعتبر طاقة الرياح مصدر ضخم لتوليد الكهرباء وحاليا من أقل أنواع تقنيات الطاقات المتجددة تكلفة، [2]. فوفقا للتقارير الواردة من الأمم المتحدة، فإن الإمكانات الكلية لطاقة الرياح وحدها قادرة على تلبية الطلب العالمي على الطاقة الكهربائية بمرات عدة. نتيجة لذلك نجد أن اقتصاديات طاقة الرياح قد تحسنت بشكل كبير جدا في السنوات القليلة الماضية مما جعلها الان في العديد من البلدان المتقدمة الخيار الأقل كلفة بين جميع تقنيات الطاقات المتجددة.

تعتبر المنطقة العربية عامة وشمال افريقيا خاصة من أهم مناطق توفر هذه الطاقة والتي يتوقع أنْ يكون لها دور فعّال في توليد الطاقة الكهربائية. فعلى سبيل المثال يتراوح متوسط سرعة الرياح في كل من سلطنة عمان، ومصر، والمغرب من 8-11 م/ث. الشكل رقم (2) يوضح ساعات الحمل الكامل (Full-load hours) في السنة لدول الشرق الأوسط وشمال افريقيا. فالدول التي بها ساعات تحميل أكثر من 1400 ساعة/سنة تصنف على انها ذات إمكانات مجدية اقتصاديا على المدى الطويل، [2]. يمكن أن نرى من هذا الشكل ان ليبيا تحتل المركز الرابع عربيا بعد مصر والمغرب وسلطنة عمان بعدد ساعات حمل كامل يتجاوز 1900 ساعة/سنة، حيث يتم استخدام عدد ساعات تحميل كامل لتمثيل إمكانات وموارد الرياح. فكلما زاد عدد ساعات التحميل ارتفع إنتاج التوربينات الريحية المقترحة في الموقع الذي تم اختياره.

تعتمد الطاقة المولدة من الرياح اعتمادا مباشرا على سرعة الرياح حيث تزداد كثافة الطاقة المولدة من الرياح مع قيمة مكعب سرعة الرياح، مما يؤثر مباشرة على تكلفة انتاج وحدة الطاقة الكهربائية. فكلما زادت سرعة الرياح زاد مقدار الطاقة الكهربائية المنتجة وبالتالي انخفضت تكاليف الطاقة لكل كيلووات ساعة. تمتاز العديد من المناطق في ليبيا بتوفر كميات معقولة من الموارد الريحية وأنه يمكن استخدامها في توليد الكهرباء [3]. فعلى النقيض من الاتجاه الذي ترتفع به أسعار الطاقة الناتجة من الوقود الأحفوري والطاقة النووية، فإنّ تكلفة وحدة الكهرباء المنتجة من طاقة الرياح آخذةٌ في النقصان والانخفاض، وفي بعض الأحيان واعتماداً على المكان خاصّة في الدول ذات المستويات العالية لسرعة الرياح فإنّ كلفة التوليد هي أقل من كلفة التوليد من المصادر التقليدية.

تُعتبر الشركة العامة للكهرباء الجسم الوحيد المخوّل قانوناً بتوليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية في ليبيا. وبسبب النمو المضطرد في الطلب على الطاقة الكهربائية، وضعف التمويل الحكومي وانخفاض مردود جباية عائد الخدمة من ناحية، مع عدم موازنة الإنفاق من ناحية أخرى، جعل تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية في ليبيا من أعلى المعدلات في المنطقة، وهو ما أدّى إلى عدم مقدرة القطاع على تنفيذ مشاريع جديدة تتوافق مع معدلات الزيادة في الطلب وبالتالي اللجوء إلى طرح الأحمال. جزء من هذا الطلب يمكن أن تلبيها محطات الطاقة الريحية، حيث الرياح المحتملة معقول في العديد من المناطق في ليبيا. على هذا النحو، يمكن أن توفر الرياح إضافة مفيدة لمزيج الطاقة مستقبلا في ليبيا.




شكل (2): متوسط ساعات الحمل الكامل في عدد من الدول العربية

بدأت الشركة العامة للكهرباء في عام 2000 مع مركز دراسات الطاقة الشمسية بالتعاون مع الشركات المتخصصة في تقييم موارد الطاقة الريحية وبناء أول مزرعة رياح تجارية في ليبيا. أظهرت قياسات سرعة الرياح التي أجريت على مدى عدة سنوات أن هناك إمكانات كبيرة لتسخير طاقة الرياح في ليبيا. حيث يتراوح متوسط سرعة الرياح على ارتفاع 20-40 مترا ما بين 6-8 م/ث الذي يتوافق مع التصنيف الدولي لجودة موارد الرياح من 3 إلى 5 [4]. في سنة 2007 أسست الشركة العامة للكهرباء الجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة وذلك لتعزيز تطوير موارد الطاقات المتجددة المختلفة عن طريق إنشاء محطات قياس شدة الإشعاع الشمسي وأخرى خاصة بسرعة واتجاه الرياح. حيث يعتبر تجميع وتحليل البيانات

الريحية وتقدير موارد طاقة الرياح للمواقع المختلفة بصورة دقيقة حجر الأساس للتنمية السليمة والفعالة لطاقة الرياح في ليبيا.

بدأ الجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة مشروع جديد لتركيب أبراج قياس سرعة واتجاه الرياح في عدة مواقع مختارة تشمل معظم المساحة الجغرافية لليبيا منها على سبيل المثال مسلاتة وترهونة وهون وغوط الريح والهيرة وغات والكفرة ودرنة ومصراته واوباري وسبها. هذا المشروع وفر معلومات أساسية حول إمكانات وموارد طاقة الرياح المحتملة في ليبيا. وعموما، يمكن أن نرى أن معظم الموارد الريحية في ليبيا مشجعة لتطوير وبناء مزارع لتوليد الطاقة من الرياح في مواقع مختلفة.

## 3. مزرعة الرياح بمسلاتة

تقع ليبيا في شمال أفريقيا بين دائرتي عرض ″22 ′30 °19 و ″18 ′56 °32 شمالا وخطي طول ″16 ′23 °9 و ″51 ′08 °25، على الضفاف الجنوبية للبحر الأبيض المتوسط. يسود الجزء الشمالي من البلاد (شمال خط عرض °29 شمالا) مناخ البحر المتوسط، كما يسود جنوبي هذه الدائرة المناخ المداري القاري الصحراوي. ليبيا متنوعة من حيث التضاريس والمناخ وفي العموم هي سهول ساحلية ضيقة تشتمل على كتلتين جبليتين رئيسيتين منفصلتين تقعان جنوب الشريط الساحلي إحداهما في الغرب وهي مرتفعات جبل نفوسة والأخرى مرتفعات الجبل الأخضر في الشرق.

تقع مدينة مسلاتة (موقع المشروع) في الجزء الشمالي الغربي لليبيا بالأطراف الشرقية لمرتفعات جبل نفوسة والتي تبعد 66 كم عن جنوب شرق مدينة طرابلس. يرتفع موقع المشروع عن مستوى سطح البحر 366 متر. موقع المشروع هو عبارة عن منطقة جبلية مفتوحة مساحته حوالي 1000 هكتار تتكون من تربة طينية صخرية مع نمو متفرق لأشجار الصنوبر المنتشرة كما هو مبين بالشكل (3 و4). يقع المشروع كذلك بالقرب من محطة تحويل كهرباء (30/220 كيلوفولت) الموجودة بالمنطقة وهذا يعطي ميزة إضافية لهذا الموقع بحيث يقلل من تكاليف ربط المشروع بالشبكة العامة للكهرباء.

شكل (3) صور فوتوغرافية لموقع مشروع محطة رياح بمسلاتة

يتأثر المناخ في ليبيا بصورة كبيرة جدا بالمنطقة الصحراوية جنوباً من ناحية وبالبحر المتوسط شمالاً من ناحية أخرى. فالمنطقة الساحلية تتأثر بمناخ البحر الأبيض المتوسط فنجد أن درجات الحرارة ترتفع الى مستويات متوسطة نسبياً مع سقوط الامطار في فصل الشتاء. تهب الرياح في معظم فصول السنة وهي ذات اتجاهات مختلفة وتتراوح متوسط سرعاتها في بعض الاماكن ما بين (6.5 م/ ثانية -11 متر /ثانية) ومنها على سبيل المثال رياح جنوبية غربية تسمى رياح القبلي تهب في فصل الصيف وهي رياح ساخنة وجافة ترفع درجات حرارة المدن الساحلية الى ما فوق 40 درجة مئوية. هذا التنوع في المناخ تسبب في ارتفاع الطلب على الكهرباء ووجود أحمال ذروة تقريبا طيلة السنة لمواجهة أحمال التدفئة شتاء والتبريد صيفا من ناحية بينما أتساع مساحة البلاد زاد من كميات فاقد الطاقة نتيجة لنقلها مسافات طويلة من ناحية أخرى. الأمر الذي يدفع بتنفيذ محطات توليد الكهرباء من الطاقات المتجددة بصفة عامة وطاقة الرياح بصفة خاصة دون قيود.

شكل (4): موقع مشروع محطة رياح مسلاتة، منظر مقرّب لموقع مشروع محطة رياح بمسلاتة

تم اختيار هذا الموقع لعدد من العوامل منها:

- توفر البيانات الريحية اللازمة التي تم رصدها بواسطة محطة قياس بيانات الرياح الموجودة بالموقع والنتائج الجيدة الناتجة من تحليل هذه البيانات لموقع المشروع والتي تشجع على تنفيذ مثل هذا النوع من المشروعات
- قرب موقع المشروع بمسلاته من مركز الاحمال الكهربائية حيث يتوسط عدد من المدن الساحلية التي تشكل أحمال كهربائية كبيرة جداً وخصوصاً مدينة طرابلس.
- قرب الموقع من الشبكة العامة للكهرباء مما سيسهل عملية الربط بالشبكة.
- كافة الأراضي المزمع اقامة المشروع عليها بمسلاتة ملك للدولة الليبية.
- ترحيب المواطنين بالمنطقة وكافة الجهات ذات العلاقة بدعم تنفيذ المشروع.
- التأثير البيئي للمشروع ضئيل جدا سواء على موقع المشروع أو على السكان القريبين منه فمثلا مستوى الضجيج الناتج من المراوح على بعد 500 متر أقل من 30 ديسيبل.
- إمكانية الوصول للمشروع من حيث القرب من الطرق القائمة أو سهولة فتح وتوسيع طرق جديدة.
- توفّر إمدادات المياه اللازمة لوحدة تنظيف التوربينات الريحية.

بعد دراسة كل العوامل المذكورة أعلاه، وخاصة الموارد الريحية وتوفر القدرات اللازمة لمحطات التحويل الكهربائية قريبة من الموقع فإنّه تم اختيار هذا الموقع لبناء مزرعة رياح بقدرة 26.4 ميجاوات.

## 4. تحليل البيانات الريحية بموقع المشروع

تعد مرحلة دراسة خصائص طاقة الرياح وحساب الطاقة الكهربائية المولدة منها من أهم المراحل اللازمة لتصميم وبناء محطات توليد الكهرباء باستخدام التوربينات الريحية حيث يتم فيها تحليل ودراسة وتقييم البيانات الريحية من سرعة واتجاه الرياح ودرجة الحرارة والرطوبة والضغط الجوي.

تم تحليل البيانات الريحية لموقع المشروع باستخدام برنامج الجداول الإلكترونية (Excel) من شركة ميكروسوفت بحيث أشتمل التحليل على حساب متوسط السرعات عند الارتفاع 10 و20 و40 متر. كذلك تم تقدير وحساب متوسط السرعات عند ارتفاع 71 متر (أرتفاع برج المروحة). أشتمل التحليل أيضا على حساب دالة فايبول للتوزيع الاحتمالي (Weibull Distribution) وكيفية إيجاد معاملاتها ومن ثم أيجاد الطاقة الكهربائية الناتجة من المراوح.

### أ. بيانات محطة قياس سرعة الرياح

تم الحصول على البيانات الريحية المستخدمة في هذه الورقة من إحدى محطات القياس التابعة للجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة والمركبة بموقع المشروع بمسلاتة [5]. فقد قام الجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة بتركيب عدد 26 محطة قياس في أماكن مختلفة في ليبيا لقياس سرعة الرياح وتحديد الأماكن الأكثر ملاءمة لمزارع الرياح. تتكون هذه المحطات وفق المعايير الدولية من البرج ومجسات قياس سرعة الرياح واتجاهها على ارتفاعات مختلفة ومجسات قياس درجات الحرارة والرطوبة والضغط الجوي بالإضافة الى وحدة تخزين البيانات. يوجد نوعين لأبراج محطات القياس، أحداها بارتفاع 40 متر والأخرى بارتفاع 60 متر. فمحطة القياس الموجودة بموقع المشروع ارتفاعها 40 متر ويتم قياس سرعة على ارتفاع 10 و20 و40 متر بينما يتم تسجيل اتجاه الرياح عند ارتفاع 40 متر فقط. تم قياس بيانات سرعة الرياح لمدة 12 شهر (نوفمبر 2007 – اكتوبر 2008) أي لمدة 8760 ساعة بواقع قراءة يتم تسجيلها كل 10 دقائق. الإحداثيات الجغرافية لمحطة الأرصاد المركبة بموقع المشروع مبينة بالجدول (1)، بينما ملخص بيانات محطة القياس بمسلاتة موضحة بالجدول رقم (2).

جدول 1. إحداثيات موقع محطة القياس

| أسم المحطة | الموقع | | | |
|---|---|---|---|---|
| | UTM X | UTM Y | نقطة الأصل | الارتفاع عن سطح البحر |
| 05 - مسلاتة | 392993 | 3608787 | ED79(33 S) | 366 متر |

تعتبر عملية تجميع البيانات الريحية لفترات طويلة ضرورية لإجراء تقييم وتحليل جيد ودقيق لإمكانات وموارد الطاقة الريحية للمواقع المستهدفة لإنشاء مزارع الرياح. فكلما زاد عدد سنوات فترة القياسات كانت نتائج التحليل أكثر موثوقية. إلا أنه يمكن الاعتماد و الاكتفاء ببيانات سنة واحدة للتنبؤ بالاتجاه الطويل الأمد لسرعة الرياح ضمن دقة (Accuracy) 10% ومستوى للثقة في نتائج التحليل تصل الى 90% [6]، [7]. فبيانات سنة كاملة تشتمل على التغيرات الشهرية والفصلية لسرعات واتجاه الرياح وبالتالي يمكن الوصول لاستنتاجات مفيدة بشأن خصائص الرياح في منطقة الدراسة.

### ب. نموذج فايبول لحساب توزع سرعة وكثافة الطاقة في الرياح لموقع مسلاتة

تعتبر سرعة الرياح في أي موقع أهم عنصر مؤثر في صناعة طاقة الرياح والتي عادة ما تتوفر بشكل عشوائي غير منتظم. لهذا السبب النمذجة الدقيقة للتوزيع الاحتمالي لقيم سرعة الرياح مهم جداً للحصول على التقييم الصحيح لإمكانيات وموارد الطاقة الريحية للموقع. حيث يمكن تحديد طاقة الرياح المحتملة بواسطة قياسات لسرعة واتجاه الرياح في موقع المشروع على مدى عدد من السنوات على ارتفاعات مختلفة (عادة 10 و20 و40 م).

يعتبر استخدام النموذج الرياضي لتوزيع سرعات الرياح والمعروف بتوزيع فايبول (Weibull Distribution) شائعا في تحليل البيانات الريحية وإيجاد متوسط سرعة الرياح وتقدير كثافة طاقة الرياح المحتملة. الصيغة العامة لمعادلة فايبول ذات المتغيرين ($k$ & $c$) ودالة التوزيع التراكمية لسرعة الرياح معطاة بالمعادلة (1) و(2) على التوالي:

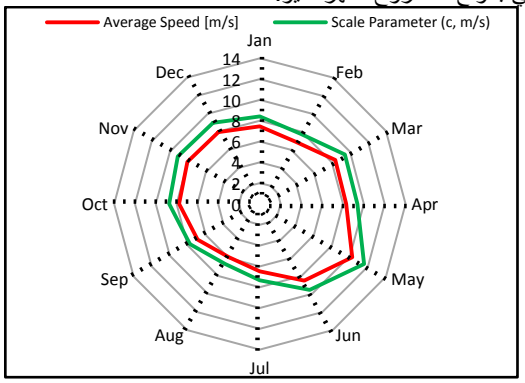
$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}} \qquad (1)$$

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}} \qquad (2)$$

حيث $f(V)$ دالة احتمال توزّع السرعة والمعامل ($k$) يعرف بمعامل الشكل (shape parameter) و($c$) بمعامل المضاعفة (scale parameter) ولـه نفس وحدات السرعة (م/ث)، [8]، أما F(V) فهي دالة التوزيع التراكمي حيث يتم حساب عدد الساعات التراكمي عند أي سرعة. يتم حساب قيمة هذه المعاملات من البيانات الريحية التي تم تجميعها من محطة القياس بمسلاتة عند الارتفاعات المختلفة. هناك عدة طرق لحساب كل من $k$ و $c$ موضحة بعدد من المراجع [8]، [9]. في هذه الورقة تم استخدام طريقة المربعات الصغرى (Least-squares regression method-LSRM) للحصول على قيم هذه المعاملات. يلخص الجدول رقم (3) قيم متوسط سرعة الرياح ومعاملات معادلة فايبول $k$ و c لكل شهر بناء على البيانات الريحية المسجلة كل 10 دقائق بمحطة القياس بمسلاتة لسنة 2008. من هذا التحليل نستنتج بأن قيم معامل الشكل $k$ تتغير مع الزمن في كل شهر خلال السنة. حيث أن القيم القصوى لمعامل الشكل $k$ كانت في شهري أغسطس وسبتمبر بينما القيم الدنيا في شهري فبراير ويوليو مع ملاحظة أن التغير بين القيم القصوى والدنيا يتراوح بين (2.11 – 2.95) وأن أقصى نسبة للتغير في معامل الشكل لا تزيد عن 18% من متوسط قيمة المعامل والتي هي حوالي 2.5. في نفس الجدول يمكن ملاحظة أن كافة قيم معامل المضاعفة $c$ قريبة من متوسط سرعة الرياح في كل شهر كما هو مبين بالشكل (5).

الجدول (4) يعطي معدل التكرار لاتجاه وسرعة الرياح في موقع المشروع بمسلاتة. يتضح أن أعلى معدل لتكرار الرياح هو الرياح الجنوبية بمقدار 13.8% و25.2% للرياح المتجهة من (SSE الى SSW)، أما أقل تكرار لاتجاه الرياح هو الرياح الشمالية بنسبة تكرار 2%. كما يلاحظ من الجدول أن هناك تباين في معدل سرعة الرياح في كل اتجاه حيث أن أعلى معدل لسرعة الرياح الجنوبية شرقية (10.4 م/ث) وبالدرجة الثانية الرياح الجنوبية (9.9 م/ث) وهي نفس الاتجاهات السائدة في الموقع، أما أقل مقدار لسرعة الرياح يظهر في الاتجاه شرق الشمال بمعدل (5.7 م/ث). من خلال ما تقدم يظهر بوضوح أن منطقة الدراسة تتمتع بإمكانات ريحية جيدة لتوليد الطاقة الكهربائية وأن هذه السرعات متوفرة في كل الاتجاهات، مع الأخذ في الاعتبار أن أبراج المراوح متغيرة الاتجاه توافقا مع تغير اتجاهات الرياح السائدة.

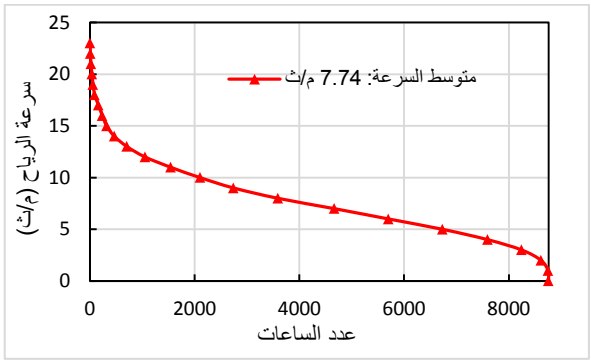
يوضح الشكلان (6) و(7) منحني السرعة مع المدة الزمنية المتراكمة (Velocity Duration Curves)، حيث يعطي العلاقة بين سرعة الرياح وعدد الساعات في السنة التي تساوي أو تزيد فيها السرعة قيمة معينة باستخدام البيانات الريحية لسنة كاملة ولفصول السنة الأربعة على التوالي. هذا النوع من الأشكال مفيد جدا عند مقارنة إمكانات طاقة الرياح لأشهر السنة أو فصول السنة أو عند مقارنة مواقع مختلفة مرشحة لبناء مزارع رياح. ففي الشكل (7) تم مقارنة منحنيات السرعة التراكمية لفصول السنة مع بعض. نجد أن المنحنى في فصل الربيع مع متوسط سرعة رياح (8.9 م/ث) يغطي أكبر مساحة يليه فصل الخريف (7.5 م/ث) فالشتاء (7.4 م/ث) ثم الصيف (6.9 م/ث). فالمساحة تحت المنحنى تعبر مباشرة عن متوسط سرعة الرياح لذلك الفصل وبالتالي عن كمية الطاقة المتاحة للمراوح في الموقع. الأشكال (8) و(9) تبين إمكانات وموارد طاقة الرياح في مسلاتة، حيث تبين هذه الأشكال توزع كثافة السرعة في الرياح ومنحني دالة فايبول لمدة 12 شهرا، بينما الشكل (10) يبين توزيع السرعة اللحظي بموقع المشروع لشهر مايو.



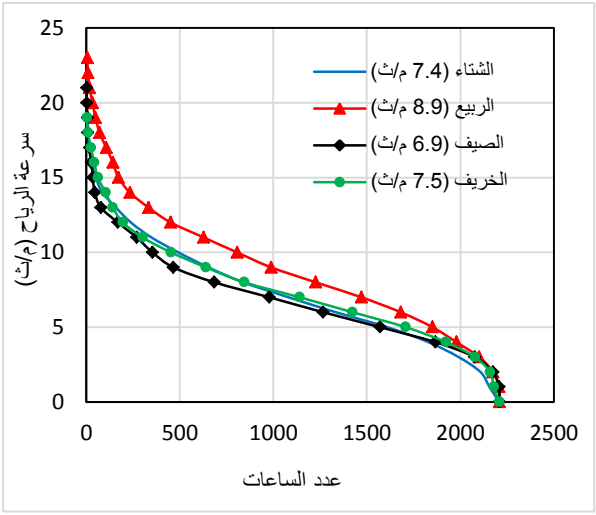

شكل (5): مقارنة متوسط سرعة الرياح مع قيم معامل المضاعفة $c$

*ج. الإنتاجية السنوية للطاقة الكهربائية*

تم إجراء تحليل تفصيلي لأداء مزرعة الرياح على أساس الظروف الجوية والبيانات الريحية المسجلة عن طريق وحدة القياس المركبة بمنطقة مسلاتة باستخدام برمجية الجداول الالكترونية (Excel) وبرمجية متخصصة (SAM) صادرة عن المعامل الوطنية للطاقات المتجددة الأمريكية (NREL)، [10]. تم في هذا التحليل حساب إنتاجية المزرعة لكل ساعة طوال سنة كاملة، حيث تبين بأنّ أقصى إنتاجية متوقعة تصل إلى 74.2 جيجاوات ساعة للمزرعة المقترحة بقدرة 26.4 ميجاوات، أي ما يعادل نسبة استخدام قدرها 32.1%. الشكل (13) يقارن قيم متوسط القدرة الشهرية بالميجاوات لمزرعة الرياح، مع المتوسط الشهري الأدنى والأقصى لكل شهر في السنة الأولى. الجدول (5) يعطي ملخص لأهم معطيات ونتائج وتحليل الطاقة للمشروع بينما الجدول (6) و(7) يوضحان الإنتاجية السنوية وكذلك الإنتاجية الكلية لمزرعة الرياح لمدة 20 سنة (العمر الافتراضي للمشروع) على أساس معامل تهالك سنوي يساوي 1%.




شكل رقم (6): منحني السرعة مع المدة الزمنية المتراكمة ( Velocity Duration Curves) لسنة كاملة




شكل رقم (7): مقارنة منحني السرعة مع المدة الزمنية المتراكمة ( Velocity Duration Curves) لفصول السنة

جدول رقم 2. ملخص بيانات محطة القياس – مسلاتة

**ملخص قراءات ونتائج محطة القياس**

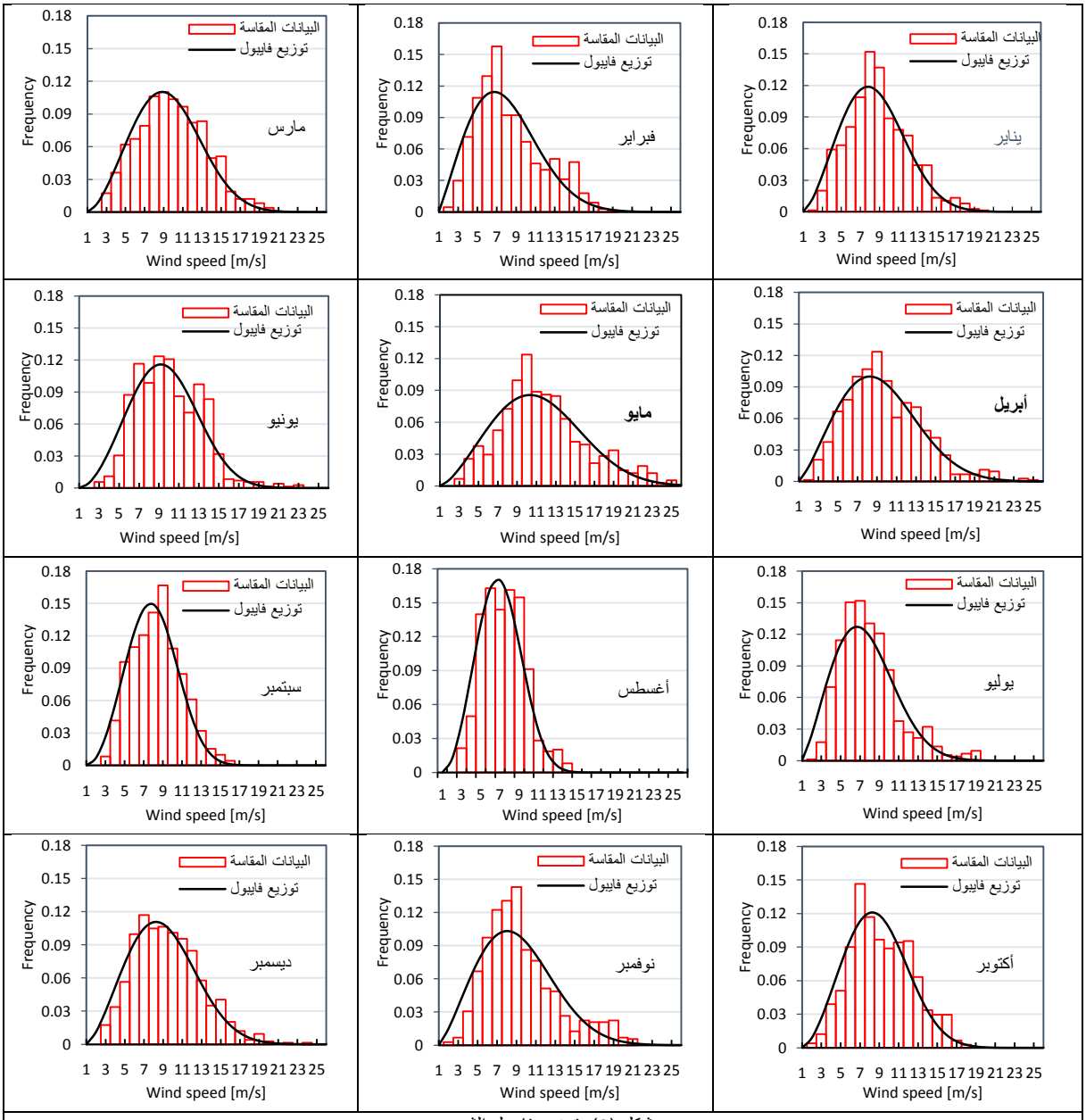
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| الفترة: | سنة واحدة | | معدل التسجيل (دقائق): | | | 10 |
| عدد القراءات: | 52560 | | معدل المسح (ثواني): | | | 5 |
| البداية: | 2008/01/01 0:0 ساعة | | | | | |
| النهاية: | 2008/12/31 23:50 ساعة | | | | | |
| الأرتفاع (متر): | 10 | 20 | 40 | 71 | | |
| | 6.6 | 6.88 | 7.25 | 7.74 | متوسط درجة الحرارة (م°): | 19.6 |
| | 19.2 | 18.7 | 21.69 | 23.1 | متوسط الرطوبة النسبية (%): | 54 |
| معامل فايبول (*k*): | - | - | - | 8.65 | أرتفاع برج القياس عن سطح البحر (م) | 446 |
| معامل فايبول (*c*): | - | - | - | 2.43 | كثافة الهواء (كجم/م$^3$): | 1.143 |

جدول (3): معاملات معادلة فايبول للتوزيع الشهري لسرعة الرياح

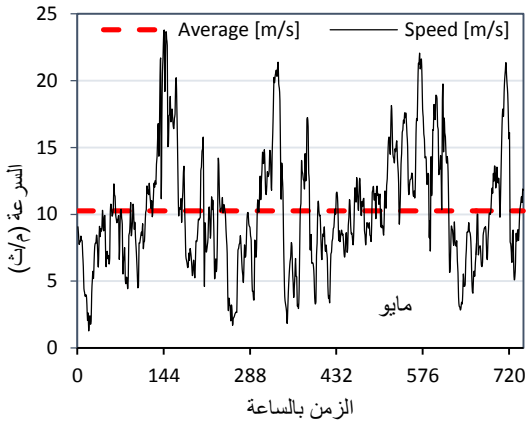
| الشهر | متوسط السرعة (م/ث) | *k* | *c* | الشهر | متوسط السرعة (م/ث) | *k* | *c* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| يناير | 7.45 | 2.46 | 8.40 | يوليو | 6.50 | 2.26 | 7.36 |
| فبراير | 6.87 | 2.11 | 7.78 | أغسطس | 5.94 | 2.89 | 6.67 |
| مارس | 8.39 | 2.60 | 9.45 | سبتمبر | 6.90 | 2.95 | 7.74 |
| أبريل | 8.30 | 72.2 | 9.38 | أكتوبر | 7.74 | 42.6 | 8.72 |
| مايو | 10.26 | 52.4 | 11.58 | نوفمبر | 8.04 | 2.27 | 9.10 |
| يونيو | 8.52 | 2.80 | 9.57 | ديسمبر | 7.96 | 2.45 | 8.98 |
| سنة 2008 | 7.74 | 2.43 | 8.65 | | | | |

جدول 4. معدل التكرار لاتجاه وسرعة الرياح في موقع المشروع بمسلاتة

| أتجاه الرياح | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| نسبة التكرار (%) | 2.0 | 7.4 | 6.6 | 6.7 | 6.4 | 6.0 | 6.7 | 7.7 | 13.8 | 3.7 | 3.3 | 6.4 | 7.0 | 6.9 | 4.3 | 5.0 |
| متوسط السرعة (م/ث) | 6.7 | 6.1 | 6.2 | 5.7 | 6.5 | 7.7 | 8.4 | 10.4 | 9.9 | 8.1 | 7.1 | 7.4 | 7.6 | 7.1 | 7.0 | 8.0 |




شكل (8): توزيع فايبول الشهري



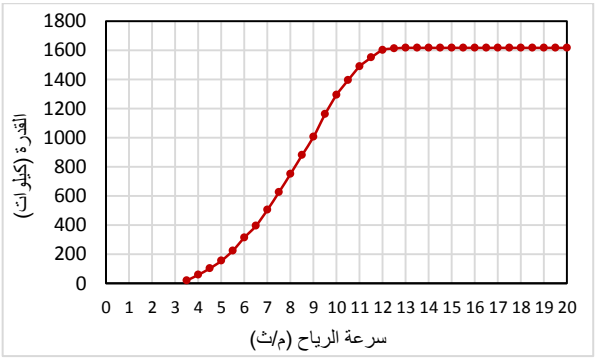

شكل (9): توزيع فايبول السنوي



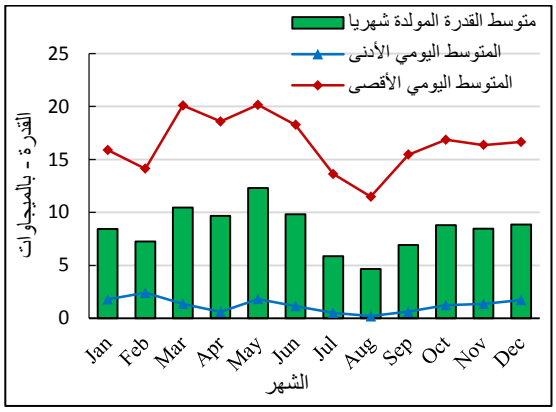

شكل (10): توزيع السرعة اللحظي لشهر مايو

جدول (5): ملخص لأهم معطيات ونتائج تحليل الطاقة – مسلاتة

| | | | |
|---|---|---|---|
| نوع التربينة الريحية Type of Turbine | أم تورس (Mtorres) | الفقد الناتج من مزرعة الرياح (%) Wind park array losses(%) | 8.5 |
| سعة التربينة الريحية (كيلوات) Turbine capacity (kW) | 1650 | متاحية المراوح (%) Turbine Availability (%) | 95 |
| عدد التربينات Number of WTG | 16 | الفقد الكهربائي (%) Electrical losses (%) | 2 |
| السعة الكلية لمزرعة الرياح (كيلوات) Installed Park Capacity (kW) | 26400 | فقدات أخرى (%) Miscellaneous losses (%) | 0.1 |
| أرتفاع برج المروحة (متر) Hub Height (m) | 71 | صافي الطاقة المنتجة (ميجاوات ساعة/سنة) Net Output (MWh/y) | **74155** |
| قطر الدوار (متر) Rotor Diameter (m) | 82 | **الطاقة المنتجة النوعية (كيلوات ساعة/م²/سنة)** Specific Energy Production (kWh/y/m²) | **877** |
| المساحة النوعية للدوار (م²/كيلوات) Specific Rotor Area (m²/kW) | 3.2 | ساعات التحميل الأقصى (ساعة/سنة) Full load hours (h/y) | 2800 |
| الطاقة الأجمالية المنتجة (ميجاوات ساعة/سنة) Gross energy production (MWh/y) | 86770 | معامل السعة (%) Capacity factor (%) | 32.1 |




شكل (12) منحنى القدرة للتوربينة الريحية ام تورس 1.65 ميجاوات [11].




شكل (13) متوسط القدرة المتوقع إنتاجها شهريا.

## 5. التحليل الاقتصادي

يهدف المشروع الى دعم الشبكة العامة للكهرباء وتقليل العجز الحاصل بها وتعزيز استقرارها، حيث سيتم ربطها على محطة تحويل (30/220 كيلوفولت) بمنطقة الشعافيين بمسلاتة التابعة للشركة العامة للكهرباء. تم في هذه الدراسة حساب سعر تكلفة وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة من مزرعة الرياح ومن ثم حساب المؤشرات الاقتصادية الرئيسية مثل معامل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة وفترة أسترداد رأس المال لحالة مرجعية ومن ثم أجراء تحليل حساسية للعوامل المؤثرة والتي يمكن أن تكون حرجة في المشروع.

### د. *التكلفة الاستثمارية (تكلفة رأس المال):*

تم استخدام السعر الفعلي للمشروع والمذكور في العقد المبرم بين الجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة وشركة الأعمال الكهربائية لتنفيذ مزرعة الرياح بسعة 60 ميجاوات بسعر نوعي لرأس المال قدره 2.997 مليون دينار/ميجاوات مشتملاً على تكلفة المعدات والتركيبات. سيتم مناقشه تأثير السعر النوعي من ناحية الزيادة على المؤشرات الاقتصادية عند تحليل الحساسية الخاصة تكلفة رأس المال.

### د. *تكلفة الأرض:*

عادة مشاريع طاقة الرياح لا تحتاج الى مساحات كبيرة من الأراضي كتلك المطلوبة في تنفيذ مشاريع الطاقة الشمسية لنفس السعة. لذلك فإن هذا المشروع سيستخدم مساحة صغيرة من الأراضي وهي في الأساس ملك للدولة ولا يوجد عليها أي تكاليف إضافية. لذلك في هذه الدراسة لم يتم الأخذ في الاعتبار تكاليف الأرض في الحسابات.

*ج. التكاليف السنوية:*

مثل معظم تقنيات الطاقات المتجددة، تتركز معظم التكاليف في رأس المال بينما نجد أن تكاليف التشغيل والصيانة صغيرة وذلك لعدم وجود تكاليف الوقود. تشير التقارير الصادرة عن هيئات ومنظمات دولية مختصة في إجراء الدراسات المالية والاقتصادية لمشروعات طاقة الرياح، أن تكاليف التشغيل والصيانة تمثل ما نسبته 20-25% من تكلفة وحدة انتاج الكهرباء [12]، [13]، [14]. في هذه الورقة تم اعتماد 20% من تكلفة وحدة انتاج الكهرباء المولدة بالرياح عالميا كتكاليف تشغيل وصيانة.

*د. نسبة تهالك المشروع السنوية (Degradation):*

تم اقتراح ما نسبته 1% تهالك سنوي يبدأ من السنة الثانية من عمر المشروع، وهذا يعني أنّ الطاقة الكهربائية المنتجة تقل سنويا بنسبة 1% عن السنة السابقة طيلة فترة عمر المشروع.

جدول 6. الإنتاجية السنوية لمزرعة الرياح

| المتغير | الوحدة | القيمة |
|---|---|---|
| الإنتاجية في السنة الأولى | ميجاوات ساعة | 74155 |
| إنتاجية المزرعة لمدة 20 سنة (عمر المشروع) | جيجاوات ساعة | 1351 |
| نسبة استخدام (Capacity factor) | % | 32.1 |
| عدد ساعات التحميل (Full load hours) | ساعة | 2800 |

جدول 6. الإنتاجية السنوية لمزرعة الرياح خلال العمر الافتراضي للمشروع

| السنة | الطاقة الكهربائية المولدة (جيجاوات ساعة) | السنة | الطاقة الكهربائية المولدة (جيجاوات ساعة) |
|---|---|---|---|
| 1 | 74.15 | 11 | 67.06 |
| 2 | 73.41 | 12 | 66.39 |
| 3 | 72.67 | 13 | 65.73 |
| 4 | 71.95 | 14 | 65.07 |
| 5 | 71.23 | 15 | 64.42 |
| 6 | 70.52 | 16 | 63.77 |
| 7 | 69.81 | 17 | 63.14 |
| 8 | 69.11 | 18 | 62.50 |
| 9 | 68.42 | 19 | 61.88 |
| 10 | 67.74 | 20 | 61.26 |

## 6. النتائج

عقب تحديد المعطيات المذكورة أعلاه، تم إعداد برنامج يتم من خلاله تحليل التدفقات المالية السنوية طوال فترة عمر المشروع (مصروفات ودخل) وتحديد المؤشرات المالية والاقتصادية التالية:

- تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (دينار/ ميجاوات ساعة).
- فترة استرداد رأس المال.
- معدل العائد الداخلي على أساس التسعيرة المقترحة.
- صافي القيمة الحاضرة.

سيتم تقديم النتائج الخاصة بالحالة المرجعية أولاً، ثم يتم تحليل حساسية عدد من العوامل المؤثرة في النتائج والمتمثلة في التكلفة النوعية للمشروع (مليون دينار/ ميجاوات)، تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (دينار/ميجاوات ساعة)، التكاليف السنوية، سعر بيع وحدة الطاقة (دينار/ميجاوات ساعة)، معامل التهالك، والعمر الافتراضي للمشروع.

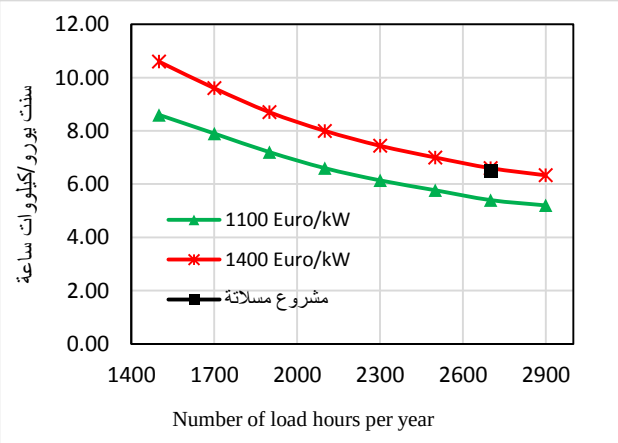
*أ. الحالة المرجعية:*

مدخلات الحالة المرجعية موضحةٌ في الجدول رقم (8)، بينما يبين الجدول رقم (9) نتائج التحليل المالي والاقتصادي الخاص بها:

جدول رقم 8. العناصر الأساسية الخاصة بحسابات الحالة المرجعية

| | |
|---|---|
| السعر النوعي لرأس المال (مليون دينار/ميجاوات): | 2.997 |
| تسعيرة البيع (دينار/ميجاوات ساعة): | 120* |
| الإنتاجية السنوية: | بيانات الجدول رقم (7) |
| التكاليف السنوية (دينار): | 800,000 |
| معدّل الفائدة: | %0 |
| معدّل التهالك السنوي: | %1 |
| العمر الافتراضي للمشروع (سنة): | 20 |

* تم اقتراح سعر البيع بناء على أسعار بيع طاقة الرياح العالمية والتي تتراوح بين (6 سنت يورو/كيلووات ساعة - 10 سنت يورو/كيلووات ساعة) كما موضح بالشكل (14) [14]. فلذلك تم وضع سعر البيع بـ 120 دينار/ميجاوات ساعة أي ما يعادل 70 يورو/ميجاوات ساعة بناء على عدد ساعات التحميل الكلية السنوية. إضافة الى ذلك تم إجراء تحليل حساسية لبيان تأثير تغيّر هذا السعر.




شكل (14) متوسط اسعار الكيلووات ساعة في العالم بناء على عدد ساعات التحميل الكلية [14].

*ب. تحليل الحساسية:*

تأسيساً على نتائج الحالة المرجعية، تقدم البنود التالية تحليلاً لحساسية العوامل المؤثرة في الحسابات الاقتصادية على أداء مزرعة الرياح. في تحليل الحساسية سيتم دراسة تأثير كل من مقدار التغير في عناصر التكاليف وهي تكاليف رأس المال وتكاليف التشغيل والصيانة وسعر بيع وحدة الطاقة وعمر المشروع كنسبة من الحالة المرجعية مع كل من معدّل العائد الداخلي (IRR) وتكلفة إنتاج وحدة الكهرباء وصافي القيمة الحاضرة (NPV).

جدول رقم 9. المؤشرات الاقتصادية الأساسية

| الوصف | القيمة |
|---|---|
| الطاقة السنوية المنتجة (ميجاوات ساعة): | 74155 |
| نسبة استخدام (%): | 32.1 |
| إنتاج الطاقة النوعي (كيلووات ساعة/كيلووات): | 2810 |
| تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (دينار/ميجاوات ساعة): | 70.3 |
| سعر بيع وحدة الطاقة (دينار/ميجاوات ساعة) | 120 |
| صافي القيمة الحاضرة (NPV) (بالمليون دينار): | 67 |
| معامل العائد الداخلي (IRR) (%): | 7.04 |
| فترة استرداد رأس المال (بالسنة): | 11.3 |

- تأثير قيمة رأس المال:

يعتبر السعر النوعي (بالدينار/كيلووات) أهم عوامل التكلفة المؤثرة في جدوى المشروع من الناحية الاقتصادية. بالنسبة لمزرعة الرياح بمسلاتة فان قيمة رأس المال قد تم تحديدها في العقد المبرم بين الجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة وشركة الأعمال الكهربائية والموقع في سنة 2009. ولكن نتيجة لتعثر تنفيذ المشروع في منطقة الفتائح بدرنة ومن ثم تحويله الى مسلاتة قد يؤدي ذلك الى تكاليف إضافية وزيادة تكاليف رأس المال عن تلك المحددة بالعقد. من ناحية أخرى شهد مجال تصنيع المراوح انخفاض كبير في تكلفة وحدة القدرة (تكلفة الكيلووات) من سنة الى أخرى [12] نتيجة للتطور الحاصل في وسائل الإنتاج فكان لابد أيضا من دراسة تأثير تخفيض تكاليف رأس المال ومقارنة النتائج بالسعر الموضوع بالعقد. بتثبيت كافة عناصر التكلفة الأخرى الواردة بالحالة المرجعية أعلاه، وتغيير تكلفة رأس المال الخاصة بتوريد وتركيب المراوح، وذلك بتغيير التكلفة النوعية بالزيادة والنقصان من قيمة التكلفة المرجعية (من 50% الى 150% من الحالة المرجعية) أخذاً في الاعتبار:

- فرضيات أكبر تتماشى مع التكلفة الإضافية المحتملة للمشروع نتيجة لنقل تنفيذ المشروع من درنة الى مسلاتة.
- فرضيات أقل لبيان القيمة التي قد يصبح عندها المشروع ذو جدوى اقتصادية من حيث تحقيق ربح معّبر عنه بقيمة إيجابية لفترة استرداد رأس المال ومعدل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة وذلك في حالة التفكير في زيادة سعة المشروع وذلك بإضافة مراوح جديدة للمشروع.

الجدول رقم (10) يبين حساسية النتائج للتغيّر في تكلفة الميجاوات المرّكبة. يتضح من الجدول بأنّ الجدوى الاقتصادية للمشروع تتحقق حتى بسعر يصل الى 3 مليون دينار للميجاوات، ويتحقق عنده استرداد رأس المال بعد 11.3 سنة، وتكون قيمة معدل العائد الداخلي معقولة نسبياً (مع ملاحظة أنّ الحسابات تمت بمعدّل للفائدة يساوي 3.5%). غير أنّه عند تخفيض التكلفة إلى 50% من القيمة المرجعية فإنّ ذلك يؤدي الى زيادة معدّل العائد الداخلي الى أكثر من 160% وانخفاض تكلفة إنتاج وحدة الكهرباء بنسبة 44% وارتفاع صافي القيمة الحاضرة بنسبة 150% من الحالة المرجعية، كما هو مبيّن بالأشكال رقم (14) و(15) و(16) على التوالي.

- تأثير تغير كمية الطاقة المنتجة:

تعرف تكلفة وحدة الطاقة بشكل مبسط على أنها حاصل قسمة كل المصروفات (تكلفة رأس المال + قيمة التكاليف السنوية) على كمية الطاقة المنتجة. لذلك تعتبر كمية الطاقة المنتجة من المشروع العامل الرئيسي وأن تأثيرها بالزيادة أو بالنقصان يؤثر مباشرة على تحديد تكلفة وحدة الطاقة. الشكل رقم (15) يوضح تأثير تغيير كمية الطاقة المنتجة بالزيادة والنقصان من القيمة المرجعية وهي 74 جيجاوات ساعة بالسنة الأولى (من 50% الى نسبة 150% من الحالة المرجعية). يبين الشكل انه في حالة أنخفاض كمية الطاقة المنتجة الى النصف فإن تكلفة وحدة الطاقة ترتفع إلى 140 دينار/ميجاوات ساعة، بينما تقل هذه التكلفة فتصل الى 46.8 دينار/ميجاوات ساعة في حال زيادة كمية الطاقة المنتجة بنسبة 50%.

جدول رقم 10. حساسية النتائج للتغير في تكلفة الميجاوات

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| تكلفة الميجاوات، (مليون دينار/ميجاوات) | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | **3.0** |
| تكلفة إنتاج الوحدة، (دينار/ميجاوات ساعة) | 38.8 | 52.4 | 66.0 | 79.6 | **93.1** |
| فترة استرداد رأس المال، (سنة) | 4.3 | 6.0 | 7.7 | 9.6 | **11.3** |
| معدل العائد الداخلي (IRR) (%) | 29.4 | 18.8 | 13.2 | 9.6 | **7.04** |
| صافي القيمة الحاضرة (NPV) (مليون دينار) | 78.8 | 65.6 | 52.4 | 39.2 | **26** |

- تأثير قيمة التكاليف السنوية:

يتطلب تشغيل وصيانة المشروع نفقات سنوية مستمرة طوال عمره الافتراضي، وهي تتمثل في البنود التالية:

- تكلفة التشغيل والصيانة، بما في ذلك أجور العاملين بالمزرعة ومكافآت أيّة مساندة فنية خارجية.
- تكلفة الحراسة والحفاظ على الأمن.

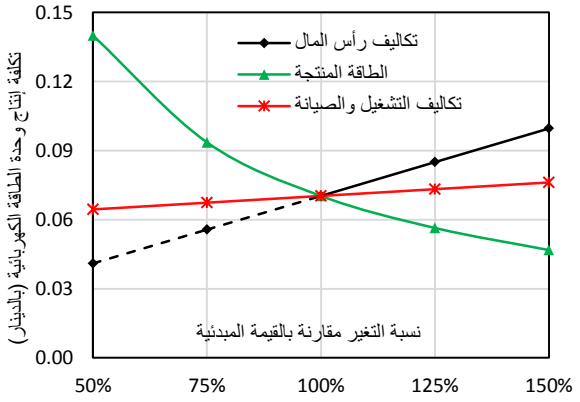
تم تقدير التكلفة السنوية المرجعية بما يماثل ما نسبته 20% من تكلفة وحدة أنتاج الكهرباء[12] أي بقيمة 0.8 مليون دينار سنوياً. وبتثبيت كافة عناصر التكلفة الواردة بالحالة المرجعية أعلاه، التكاليف السنوية (تشغيل وصيانة)، وذلك بتغيير التكلفة بالزيادة والنقصان من قيمة التكلفة المرجعية (من 50% الى نسبة 150% من الحالة المرجعية) أخذاً في الاعتبار:

- فرضيات أقل لبيان القيمة التي قد يصبح عندها المشروع ذو جدوى اقتصادية من حيث تحقيق ربح معبر عنه بقيمة إيجابية لفترة استرداد رأس المال ومعدل العائد الداخلي.
- فرضيات أكبر تتماشى مع احتمالية ارتفاعها فعلياً بسبب الظروف الراهنة بالبلاد.

يتضح من الشكل رقم (15) بأن الجدوى الاقتصادية للمشروع لا تتأثر حتى بتخفيض أو زيادة قيمة التكاليف السنوية إلى النصف من تلك المقترحة في الحالة المرجعية. لذلك لا يُمكن اعتبار التكاليف السنوية من العوامل المؤثرة بقوة في جدوى المشروع من الناحية الاقتصادية. وهذا في الحقيقة يتماشى مع طبيعة مشروعات الطاقات المتجددة. فتوليد الكهرباء باستخدام التقنيات المختلفة للطاقات المتجددة لا يحتاج الى أي تكاليف للوقود. فبينما نجد أنّ تكاليف الوقود تساوي صفراً وتكاليف التشغيل والصيانة صغيرة نسبياً، تستأثر تكاليف رأس المال بالحصة الأكبر من تكاليف توليد الكهرباء.

- تأثير تغيير سعر بيع وحدة الطاقة:

في سبيل دراسة حساسية النتائج للتغير في تكلفة شراء وحدة الطاقة تم اقتراح عدة أسعار بيع تتراوح من 70% الى نسبة 130% من الحالة المرجعية مع تثبيت باقي عناصر التكلفة الواردة بالحالة المرجعية أعلاه. بيّنت تحليلات الحساسية أنّ تغيير سعر بيع وحدة الطاقة بالزيادة والنقصان يؤثر بشكل كبير على معدّل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة وبشكل أقل بكثير على تكلفة إنتاج وحدة الطاقة، كما هو مبيّن بالأشكال رقم (16) و(17) على التوالي.

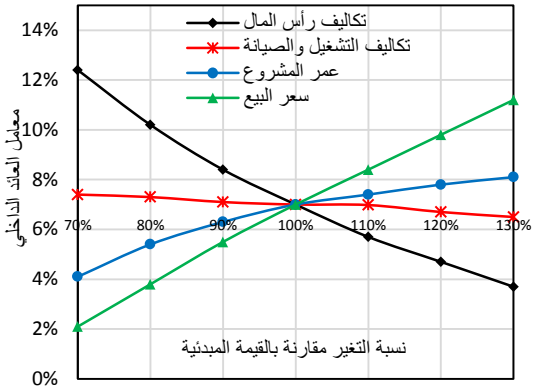



شكل (15): تحليل تأثير حساسية بعض عناصر التكلفة على إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية

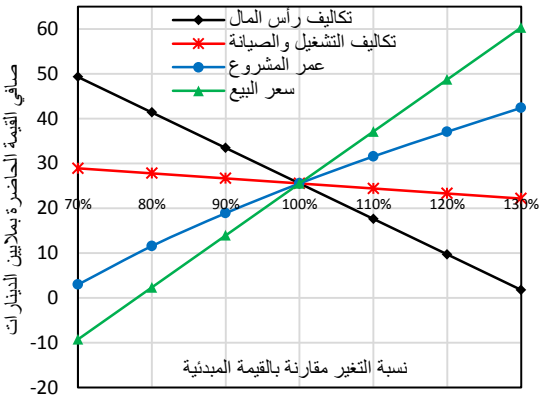
- تأثير تغير العمر الافتراضي للمشروع:

بالنظر الى الأشكال رقم (16) و(17)، نجد أن تغير عمر المشروع بالزيادة والنقصان عامل مهم جدا لكل المؤشرات الاقتصادية تحت الدراسة من تكلفة إنتاج وحدة الطاقة وسعر بيعها وصولا الى صافي القيمة

الحاضرة. نستنتج من ذلك أن عمر المشروع له تأثير كبير على المؤشرات الاقتصادية للمشروع. حيث يلاحظ أن قصر عمر المشروع له تأثير أكبر من زيادته وذلك بسبب تركز تكاليف المشروع في تكاليف رأس المال والتي تكون مستحقة في بداية عمر المشروع.




شكل (16). تحليل تأثير حساسية بعض عناصر التكلفة على معامل العائد الداخلي




شكل (17). تحليل تأثير حساسية بعض عناصر التكلفة على صافي القيمة الحاضرة

## 8. الخلاصة والتوصيات

حاولت هذه الورقة الإجابة عن أسئلة البحث الرئيسة والمتعلقة بالجدوى الفنية والأقتصادية لمشروع مزرعة الرياح بمسلاتة. فقد تم إجراء تحليلا موسعا للجدوى الفنية والاقتصادية لمزرعة الرياح لتوليد الكهرباء بسعة 26.4 ميجاوات. اعتمدت الدراسة على نتائج القياسات التي أجريت لموقع المشروع بمدينة مسلاته خلال فترة زمنية تجاوزت السنة حيث تمت محاكاة أداء مزرعة الرياح باستخدام برنامج الجداول الألكترونية (Excel) حيث تم إعداد برنامج شخصي يقوم بالمحاكاة الديناميكية على مدار العام وبخطوة زمنية قدرها 10 دقائق. تم في هذا التحليل حساب كل المؤشرات الأحصائية مثل متوسط سرعة الرياح والأنحراف المعياري والتوزيع التكراري لسرعة واتجاه الرياح وكثافة الطاقة وإنتاجية المشروع لكل ساعة طوال سنة كاملة. قورنت النتائج بتلك المتحصل عليها من محاكاة المشروع باستخدام برمجية (SAM). كانت نتائج كمية الطاقة المنتجة في الحالتين متطابقة الى حد كبير والأختلاف لايتجاوز 1%. أقصى إنتاجية لمزرعة الرياح وصلت إلى 74 جيجاوات ساعة، أي ما يعادل نسبة إستخدام قدرها 32.1%.

كما تعرضت الورقة إلى الجدوى الإقتصادية للمشروع حيث تبين من التحليل الإقتصادي لمعطيات المشروع المالية أنه ذو مردود إقتصادي عالي بالرغم من إستناد التحليل على التكلفة المالية التعاقدية للمشروع سنة 2009 (وهي أكبر من الاسعار الحالية للمشاريع المشابه)، والذي إنعكس على تكلفة إنتاج الوحده وتكلفة الميجاوات. أي أن المؤشرات الإقتصادية الرئيسة للمشروع من فترة إسترداد رأس المال ومعدل العائد الداخلي والقيمة الحاضرة أفضل من القيم الموضحة في هذه الورقة بإعتبار التطور في التقنية وإنخفاض أسعارها عن عشر سنوات مضت. وقد فصّلت الورقة القيم الإقتصادية الممكنة عند بعض القيم الإفتراضية لتكلفة إنتاج الوحده وكذلك سعر الميجاوات. كذلك تم إجراء تحليل لحساسية العوامل المؤثرة في الحسابات الإقتصادية على أداء مزرعة الرياح المقترحة. أيضاً تطرقت الورقة إلى الفائدة البيئية للمشروع من ناحية التقليل من الإنبعاثات الكربونية والقيمة الإقتصادية المحتملة.

ولإن الدراسة الفنية أجريت على عدد محدد من التوربينات إستناداً إلى محددات مشروع مقترح مسبقاً، ونظراً لما تبين من وجود إمكانيات توليد طاقة كهربائية فإننا نوصي في هذه الورقة بالتوسع في نشر التوربينات الريحية بالمنطقة على أن يتم هذا الأمر بعد إستكمال المشرع المقترح بالمنطقة وتحقق جزء من الفوائد المرتقبة خلال فترة تجريبية محدده.

## المراجع


[1] A. Fallis, "*Global Wind Statisitcs 2015. GWEC,*" Brussels, Belgium, 2015.

[2] A. Al-Karaghouli, "Current Status of Renewable Energies in the Middle East – North African Region," Sponsored by (BMU), 2007.

[3] W. El-osta,Y.Kalifa, "*Prospects of wind power plants in Libya: a case study*," Renew. Energy, vol. 28, pp. 363–371, 2003.

[4] "*Wind Regimes of Africa, Comparative Evaluation of Wind Data from Selected Countries May 2004.*," 2004.

[5] "*البيانات الريحية من الجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة*".

[6] R. Guzzi and C.G. Justus, Physical Climatology for Solar and Wind Energy. Singapore,: World Scientific Pub Co Inc (March 1988), 1988.

[7] M. Jamil, S. Parsa, and M. Majidi, "*Wind power statistics and an evaluation of wind energy density*," Renew. Energy, vol. 6, no. 5–6, pp. 623–628, 1995.

[8] A. L. R. J. F. Manwell, McGowan, and, WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application, Second Edi. John Wiley & Sons Ltd, 2009.

[9] S. Mathew, Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[10] W. Michael J. and P. Gilman, "*22--Technical manual for the SAM physical trough model*," NREL/TP-5500-51825, vol. 303, no. June, pp. 275–3000, 2011.

[11] "*المواصفات الفنية للمروحة-الجهاز التنفيذي للطاقات المتجددة*" طرابلس، 2009.

[12] "*Wind Power, Technology Brief*," 2016.

[13] "*Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series-Volume-1, Wind Power*," 2012.

[14] E. Søren Krohn, "*The Economics of Wind Energy. A report by the European Wind Energy Association*," 2009.