البحوث والدراسات

إمكانية استثمار طاقة الرياح في توليد الكهرباء في حوض مدينة إب - اليمن

د. هادي محمد الصليحي*

ملخص:

قال تعالى: ﴿وَأَمَّا عَادٌ فَأُهْلِكُواْ بِرِيحٍ صَرْصَرٍ عَاتِيَةٍ﴾ (الحاقة، آية ٦). بلغ إجمالي الناتج الوطني من الطاقة الكهربائية حتى ٢٠١٤ نحو ٨٥٠ ميجا/وات، تتحصل منه مدينة إب وقراها على ٢٠ ميجاوات، وهذا يشكل ٢,٣٪. وقد بلغ الاحتياج الفعلي للمدينة وأنشطتها الاقتصادية المختلفة نحو ٤٠ميجا/وات؛ أي أن هناك عجزاً في الطاقة يصل إلى ٥٠٪ (مقابلة ميدانية). في ظل غياب مخطط وطني يوازن بين العرض والطلب من الطاقة الكهربائية، وتزايد الاعتماد على الوقود الأحفوري، وانطفاء الكهرباء المتكرر، واستمرارها لساعات تتفاوت بين ٤-٨ ساعات/يوم، كل ذلك عكس حجم المشكلة، من حيث ضآلة الناتج الوطني من الكهرباء. كل ذلك تطلب البحث في إمكانية الحصول على الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة: كطاقة الرياح، والطاقة الشمسية، وطاقة المد والجزر، والكتلة الحيوية، التي شهدت في السنوات الأخيرة، تطوراً كبيراً على المستوى العالمي، التي أصبحت أقل كلفة، وأكثر كفاءة واستدامة لسد ولو جزءاً من الاحتياج القائم، وتقليل التلوث. واعتمد البحث على دراسة طاقة الرياح من حيث: أهمية هذه الطاقة ومميزاتها، ومدى توافر شروط الحصول على طاقة الرياح من حيث: سرعتها، واتجاهها. وفقاً للبيانات التي وفرتها محطة "السيدة أروى"، والاعتماد على معادلات رياضية كمعادلة القوة (١) التي بينت سرعة الرياح في مختلف ارتفاعات منطقة البحث، التي بينت أن سرعة الرياح تزداد بمعدل ٠,٢م/ث/١٠٠م. جدول (٤). وأمكن من خلالها حساب مقدار الطاقة في مختلف ارتفاعات الحوض بواسطة معادلة الطاقة (٢) التي بينت أن طاقة الرياح تزداد بمعدل ٠,٢ وات/١٠٠م. ونتيجة لذلك

* أستاذ مشارك، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة إب، الجمهورية اليمنية.

التباين تم تقسيم حوض إب إلى ثلاثة نطاقات (A، B، C) تتباين فيها سرعة الرياح واتجاهها، ومقدار الطاقة في كل نطاق – الشكل (٣) – على النحو الآتي:

– النطاق A: يتميز بتضرسه وخشونة سطحه، وهذا أثر على سرعة الرياح، التي بلغ متوسطها < ٣,٦م/ث، وهذا يوفر طاقة كهربائية ٢٣٥٨,٧وات/م^{٢}/ث. وتأخذ الرياح في النطاق اتجاهات متباينة؛ ليكون توجيه توربينات الرياح، مرتبطاً بزعانف تعمل على توجيه التوربين بحسب تغير اتجاه الرياح. ويمكن الاستفادة من سرعة الرياح في النطاق من خلال: نصب توربينات الرياح المنزلية على أسطح مباني مدينة إب، البالغ عددها نحو ٢٢ ألف مبنى، واستغلال الممرات الجبلية، التي تزداد فيها سرعة الرياح للضعف، للحصول على طاقة كهربائية تلبي الاحتياجات الاقتصادية.

– النطاق B: وصل معدل سرعة الرياح إلى > ٣,٦م/ث، وهذا يوفر طاقة كهربائية ٣٨٣٥,٨وات/م^{٢}/ث. اتجاه الرياح في النطاق متوافق مع الرياح التي تهب على اليمن، شمالية شرقية في الشتاء والربيع، وجنوبية شرقية في الصيف والخريف. لذلك يمكن نصب توربينات الرياح ذات الاستطاعة المتوسطة، التي تحقق جدوى اقتصادية عالية، وتوزع على شكل صفوف تأخذ اتجاه شمالي غربي– جنوبي شرقي؛ لتكون الرياح عمودية على هذه الصفوف. الشكل (١١).

– النطاق C: بلغت سرعة الرياح ٥,٤م/ث، وهذا يعني الحصول على طاقة أعلى بلغت ٣٨٣٥وات/م^{٢}/ث. الرياح في هذا النطاق أكثر ثباتاً في اتجاهها وسرعتها لتدني تأثير عامل خشونة السطح؛ مما يجعل استثمار الرياح في النطاق، أكبر جدوى من الناحية الاقتصادية. وتوصل البحث إلى عدد من النتائج والتوصيات.

المقدمة:

بدأ عصر مولدات الرياح عام ١٩٠٠ في مدينة أوهايو الأمريكية، من خلال تصميم مولد يعمل بالرياح بقدرة ١٢كيلو/وات، واستمر يعمل قرابة ٢٠عاماً (آل أبوعلي، ٢٠١٢، ص ٣٢٩).

وعلى المستوى الوطني كانت أول النداءات المبكرة للحصول على طاقة الرياح تعود إلى الثمانينيات، من قبل أكاديميين في جامعة صنعاء، وذلك من

خلال استثمار سواحل غرب اليمن الغنية بمصادر الرياح، لكن الحكومة حينها لم تلتفت لتلك النداءات. ونتيجة لتزايد الطلب على الطاقة الكهربائية، وتفاقم العجز، بدأت الحكومة اليمنية في ٢٠٠٧ بالبحث عن حلول لسد العجز الحاصل؛ فأخذت بالتوجه للحصول على الكهرباء من طاقة الرياح، من خلال تنفيذ أول مزرعة رياح غرب اليمن في منطقة المخا، بمحافظة تعز بقدرة ١٠-١٥ ميجاوات، بتمويل حكومي تبلغ تكلفته ٢٠ مليون دولار، لكن المشروع تعثر حتى ٢٠١٠. لتظهر الفكرة من جديد، من خلال إنشاء مزرعة رياح بقدرة ٦٠ ميجاوات، وبتكلفة ٥٥ مليون دولار لكن البيروقراطية، وعوامل أخرى أعاقت تنفيذه. وفي ديسمبر ٢٠١٤ تم عرض المشروع مرة أخرى على البرلمان اليمني، بمنحة مقدمة من الصندوق العربي للإنماء الاقتصادي التابع لدولة الكويت الشقيقة، بطاقة ٦٠ ميجاوات، ليتعثر تنفيذ المشروع من جديد بسبب الأحداث التي تمر بها البلاد. (www.albankaldawli.org).

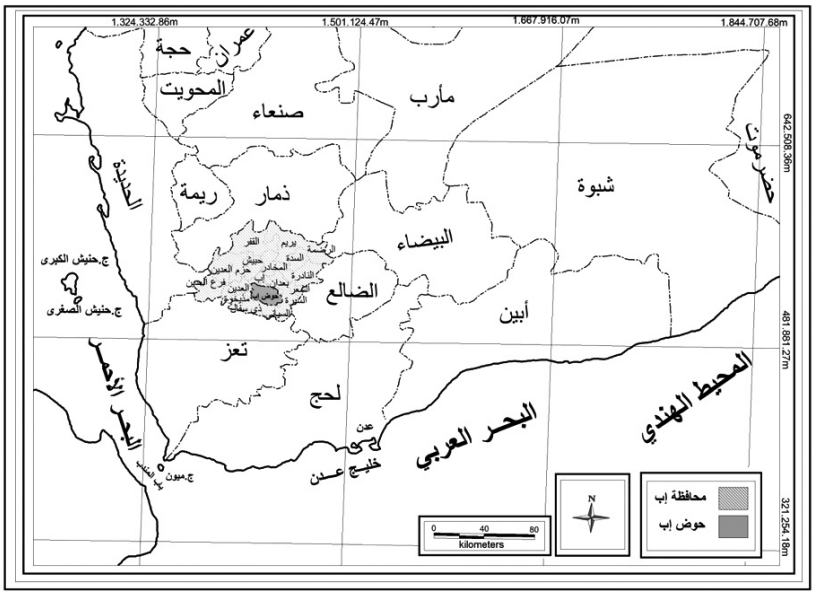
وفي منطقة البحث كانت أقدم محاولة للحصول على الكهرباء من الرياح تعود إلى ١٩٨٠، عندما قام الأمريكان، في المعهد الزراعي، بإنشاء أول برج لتحويل طاقة الرياح إلى طاقة حركية، لغرض استخراج الماء من إحدى الآبار بمنطقة السبل، واستمر البرج يعمل لفترة تزيد عن عشرة أعوام، وبعد مغادرة الأمريكان عام ١٩٨٥ نقل البرج إلى ساحة المعهد الزراعي عام ١٩٩٠، ليتم نصبه فوق إحدى الآبار، وظلال برج يعمل لأكثر من سنتين، ولم تجر له الصيانة اللازمة؛ فتكسرت زعانفه، وانتهى البرج (مقابلة – محمد صبر). وتم نصب برج آخر على مسجد السنة عام ٢٠٠٥ بمنطقة مشورة، لسد احتياجات المسجد في فترات انقطاع الكهرباء، إلا أن البرجين لم يسهما بشيء يذكر في إطار الإنتاج الوطني من الكهرباء؛ مما يدل على تأخرنا الكبير في الاستفادة من هذه التقنية.

أولاً – الإطار النظري للبحث:

١ – **الموقع والمساحة:** يقع حوض إب مكانياً جنوب محافظة إب، ويشغل مساحة ٢٩٨ كم^{٢}. الشكل (١). ويقع فلكياً بين دائرتي عرض ١٣,٩١٦

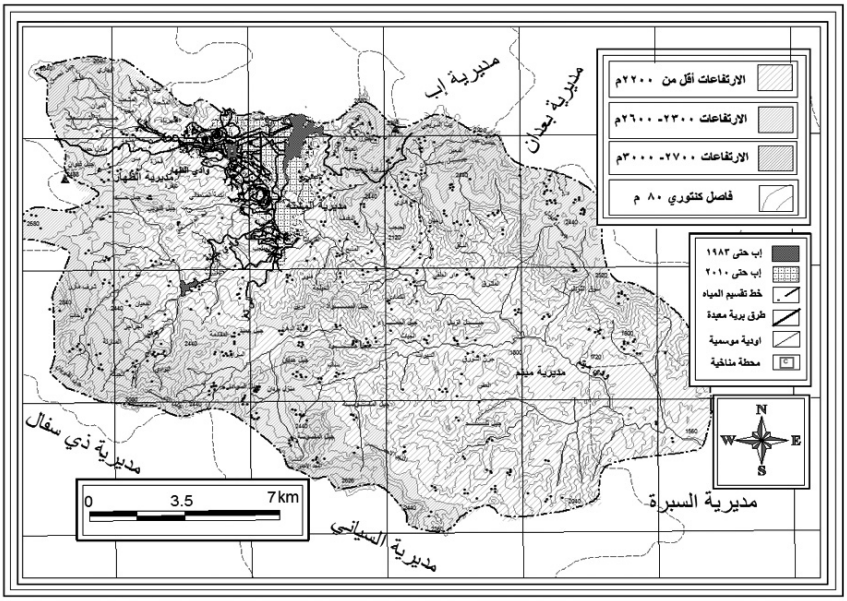
و ١٣,٩٧٩ شمالاً. وبين خطي طول ٤٤,٠٨٩ و ٤٤,٢٠٤ شرقاً. هذا الموقع أثر على منطقة البحث من خلال:

- وقوعها في النطاق المداري، الذي تتعامد عليها أشعة الشمس، مرتين في السنة (موسى،١٩٨٣، ص ١٣٠).
- تفاوت عدد ساعات السطوع الشمسي من ٧ – ٨ ساعات/يوم، ومن ثم اختلاف قيم الحرارة بين حوض إب والبحار المجاورة. الشكل (١)؛ مما يؤدي إلى تباين قيم الضغط الجوي؛ ليصبح الحوض تحت تأثير الرياح الشمالية الشرقية في الشتاء والربيع، والرياح الجنوبية الغربية في الصيف والخريف (الحفيان، ٢٠٠٤، ص٢٠).



المصدر: الشكل من عمل الباحث بواسطة (GIS) بالاعتماد على خريطة طبوغرافية للجمهورية اليمنية بمقياس ١: ١٥٠٠٠٠٠.

الشكل (١) – موقع حوض إب بالنسبة لمحافظة إب والجمهورية اليمنية



المصدر: الشكل من عمل الباحث بواسطة (GIS) بالاعتماد على خريطة طبوغرافية لحوض إب بمقياس ١: ٥٠٠٠٠.

الشكل (٢) – طبوغرافية حوض إب

٢- الدراسات السابقة:

لا يتوافر على مستوى محافظة إب ومنطقة البحث، دراسات سابقة تتعلق بإمكانية الحصول على الكهرباء من طاقة الرياح، وهناك دراسة على مستوى محافظة الحديدة الساحلية غرب اليمن، وهي: دراسة حياة حمود محبوب (٢٠١٠-٢٠١١): توليد الكهرباء من الرياح في اليمن السعيد، جامعة الحديدة، كلية التربية، قسم الفيزياء.

٣- أهمية البحث:

كون البحث يقدم دراسة نظرية عن الرياح، التي تعد من مصادر الطاقة المستدامة، ومن الوسائل المثلى للحصول على الكهرباء، التي تلبي – على الأقل – احتياجات السكان المنزلية والمتطلبات الاقتصادية، في ظل عجز مصادر

الحصول على الكهرباء من الطاقة الأحفورية وانقطاعاتها المتكررة التي لا تحقق احتياجات السكان وأنشطتهم الاقتصادية المختلفة – فإن البحث عمد إلى تقدير الطاقة التي يمكن توليدها من الرياح في حوض إب في وحدة المساحة (م^{٢}) بما يحقق سد العجز الحاصل في الطاقة.

٤ – مشكلة البحث:

تنحصر مشكلة البحث في التساؤلات الآتية:

- هل تتوافر في منطقة البحث متطلبات الحصول على الطاقة الكهربائية من الرياح، من حيث: السرعة والاتجاه؟
- كم معدل الطاقة الكهربائية التي يمكن الحصول عليها من توربينات الرياح في م^{٢}/ث؟
- ما المواقع الأكثر ملاءمة في حوض إب للحصول على الكهرباء من طاقة الرياح؟

٥– فروض البحث:

- يتوافر في حوض إب سرعة رياح مقدارها (س)، يمكن استثمارها في توليد الكهرباء بشكل اقتصادي.
- إن سرعة رياح ٥,٥م/ث توفر طاقة ١٠٧,٢وات/م^{٢}، مما يجعل توليد الطاقة الكهربائية مجدي اقتصادياً.
- مع زيادة الارتفاع في منطقة البحث تزداد سرعة الرياح؛ فتزداد طاقة الكهرباء التي يمكن توليدها.
- هناك مواضع في حوض إب تزداد فيها سرعة الرياح؛ فتكون أكثر ملاءمة لإنتاج الطاقة الكهربائية.

٦– منهجية البحث:

اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي الإحصائي؛ للحصول على مقدار الطاقة الكهربائية التي يمكن توفيرها من الرياح، في وحدة المساحة (م^{٢}) وذلك من خلال الآتي:

تحليل بيانات الرياح التي وفرتها محطة "السيدة أروى" للفترة ٢٠٠٦-٢٠١٠، من حيث: السرعة والاتجاه ومقارنتها، بمتطلبات الحصول على الطاقة الكهربائية من الرياح. والرجوع إلى بيانات محطات مناخية مجاورة لمنطقة البحث، كمحطة ذمار الواقعة شمال منطقة البحث على بعد ١٠٠كم وارتفاع ٢٣٠٠م، لمعرفة اتجاه الرياح في الارتفاعات أكبر من ٢٢٠٠م، ونتيجة لتضرس منطقة البحث – الشكل (٢) – قسمت منطقة البحث إلى ثلاثة نطاقات (A، B،C)، تتباين فيها سرعة الرياح واتجاهها – الشكل (٤) – واعتمد البحث على معادلات رياضية هي:

- معادلة القوة رقم (١) لمعرفة سرعة الرياح في الارتفاعات، التي يزيد ارتفاعها على ١٩٠٠م. الجدول (٤).
- معادلة الطاقة رقم (٢) لمعرفة مقدار الطاقة الكهربائية عند كل ارتفاع، مقدرة بالوات/م^{٢}/ث. الجدول (٧). والاستعانة ببرامج إحصائية Exel، وبرامج GIS، لرسم وتمثيل بيانات الرياح، وعلى مرئيات فضائية من نوع Sartem.

٧ – خصائص طاقة الرياح:

لجأ الإنسان إلى استعمال طاقة الرياح في توليد الكهرباء لعدة اعتبارات أهمها:

- كونها تقنية رخيصة الثمن وذات جدوى اقتصادية والأسرع نمواً في العالم (٢٠٪سنوياً). الجدول (١).
- توافر الوقود الأحفوري؛ لتشكل في المستقبل بديلاً عنه. وحركة الرياح متجددة ولا تنضب.
- لاتطلق أدخنة: Co_2، Ch_4، Sox، Nox المتسببة في خلل الدورة المناخية (مجلة تقنيات الطاقة، ٢٠٠٤، ص ٢٨).
- تسهل في تنمية المناطق النائية، ويمكن وضعها على الأسطح، وتطبيقاتها عديدة (الخياط وإيناس، ٢٠١٠).

- تحافظ على الأراضي؛ إذ إن ٦٠٪ من أراضي مزارع الرياح، تستعمل للزراعة، والرعي، وتربية النحل.

الجدول (١)
سعر إنتاج الكيلو/وات/ساعة/سنة لمختلف مصادر إنتاج الطاقة سنة ٢٠١٣

مصدر الطاقة	الكتلة العضوية	النووية	الفحم	الرياح	حرارة باطن الأرض	وقود الـ H	الشمس
٢٠٠٨– ٢٠١٣	١–١٧	٤–١٢	٢–١٢	٤–١١	٤–١٤	٢–١٢	١٥– ٥٤
تقديرات ٢٠٣٠	٤–١٠	٤–٦	٥–٩	٣–٧	٣–١٣	٢–٩	٦–٣١

Data from US DOE & NREL 2013 p 4.

٨– قياس الرياح في منطقة البحث:

يوجد في حوض إب "محطة السيدة أروى" المناخية[١] الواقعة بمركز البحوث الزراعي، على ارتفاع ١٩٠٠م، توفر المحطة بيانات لسرعة الرياح واتجاهها، على ارتفاع ٢٥م من السطح خلال ٢٠٠٦–٢٠١٠. الجدول (٤). لكن ارتفاع قياس المحطة، لا يقارب مركز دوران العنفات الريحية، متوسطة الاستطاعة، وهذا لا يلبي تطلعات الدولة، والقطاع الخاص للاستثمار في طاقة الرياح بشكل اقتصادي (العبود، ٢٠١٠، ص١٢). كما أنها ليست كافية لإعطاء صورة واضحة، عن سرعة الرياح واتجاهها في بقية ارتفاعات منطقة البحث، وأصبحت

(١) توافر بيانات مناخية، وتتركب محطة قياس الرياح من: حساسين لقياس سرعة الرياح واتجاهها، يركبان على ارتفاع ٤٠م، وآخرين لقياس درجة الحرارة، والضغط يركبان على ارتفاع ١٠م، ومن خلية شمسية، وبطارية خازنة، وصندوق مسجل البيانات، يركب الأخيرعلى ارتفاع ٢,٥– ٣م، الذي يقوم بخزن البيانات وإرسالها إلى كمبيوتر.

المحطة واقعة ضمن النسيج الحضري لمدينة إب، ومنخفضة عن التلال، والروابي، والقمم التي تحيط بها. الشكل (٢).

ثانياً – عوامل إنتاج الطاقة الكهربائية من الرياح:

يتأثر إنتاج الطاقة الكهربائية من الرياح: بكثافة الهواء، ارتفاع برج التوربين، مساحة سطح الدوران، تأثير التوربينات بعضها على بعض (موسى، ٢٠٠٧، ص٤٥). وقد حددت اللجنة الدولية IEC مواصفات التوربين الملائم تبعاً: لمتوسط سرعة الرياح في الموقع V_{ave} وفقاً للجدول (٢)، وسرعة أقوى عاصفة على مدى V_{50}عاماً، ونسبة الاضطراب في تغير سرعة الهواء منسوباً لسرعة قياسية ١٥/م/ث، شريطة أن لا تتجاوز نسبة الاضطراب ١٦٪ – ١٨٪؛ لما لذلك من دور في تحمل توربينات الرياح للإجهادات (يوسف، ١٩٨١، ص٤٤).

الجدول (٢)

سرعة الرياح ودرجة تحملها لأنواع مختلفة من الإجهادات

سرعة الرياح (m/s)	٦,٠	٧,٥	٨,٥	١٠,٠
درجة التحمل للإجهادات	منخفضة	منخفضة	متوسطة	عالية

المصدر: كرم الدين، ٢٠١٢، ص٢٢.

وسنتناول في هذا البحث أثر سرعة الرياح واتجاهها على إنتاج طاقة الكهرباء في حوض إب على النحو الآتي:

١– سرعة الرياح في حوض إب:

يتناسب إنتاج الطاقة الكهربية من توربينات الرياح، تناسباً طردياً مع مكعب سرعة الرياح (الخياط، ٢٠٠٧، ص٨). وتشير الدراسات إلى أن سرعة رياح ٣,٦م/ث، هو المعدل المناسب للحصول على طاقة كهربائية (يوسف، ١٩٨١، ص٤٤). وتزداد سرعة الرياح كلما ارتفعنا إلى أعلى، لتكون الزيادة كبيرة في العشرين متراً الأولى، وتكون سرعتها عند ارتفاع ٥م ضعف سرعتها عند ارتفاع ٠,٣٠سم (نجيب، ١٩٩٦، ص١٢٢).

ويمكن معرفة سرعة الرياح في ارتفاعات حوض إب، بحسب معادلة القوة لـ(Ben gue, 2011, p 454) على النحو الآتي:

$$u = u_{ref}\,(z \div z_{ref})p \qquad (1)$$

حيث إن:

U= سرعة الرياح. u_{ref}= سرعة الرياح في محطة القياس "محطة السيدة أروى".

Z= الارتفاع المطلوب عنده معرفة سرعة الرياح. z_{ref} = ارتفاع محطة القياس "محطة السيدة أروى" (١٩٠٠متر).

P= معامل خشونة السطح.

وبتطبيق المعادلة (١) على منطقة البحث، التي تظهر نتائجها في الجدول (٤) تبين: أنه كلما ارتفعنا في منطقة البحث ١٠٠م، زادت سرعة الرياح ٠,٢م/ث. ومن ثم يمكن أن نميز في منطقة البحث ثلاثة نطاقات رئيسية تختلف فيها سرعة الرياح، الشكل (٤)، على النحو الآتي:

١-١ نطاق الارتفاعات ١٧٠٠- ٢٢٠٠م (A): يعد أكبر نطاقات البحث، ويشغل١٨٢,٧كم^{٢}. جدول (٣). ويتميز بخشونة سطحه الذي يتألف من: مباني مدينة إب ومناطق شبه مستوية ومجاري الأودية الرئيسية كوادي صلبة السيدة أروى، وادي جبلة التي تتخلل تلال وآكام حوض إب. الشكل (٣).

أ - **سرعة الرياح في النطاق A:** يبلغ متوسط سرعة الرياح السنوية في النطاق ٣,٤م/ث. ويتباين المتوسط بحسب الارتفاع؛ فعند ١٩٠٠م بلغ ٣,٣م/ث، وعند ٢٢٠٠م نحو ٣,٨م/ث/سنة، ومع الارتفاع تزداد سرعة الرياح لتكون أكثر ملاءمة للحصول على الطاقة الكهربائية. وعلى المستوى الشهري بلغ متوسط سرعة الرياح الشهرية، من يناير حتى أغسطس > ٣,٦م/ث، وهذا أقل من المتوسط المطلوب، للحصول على الطاقة الكهربائية من الرياح، في مختلف ارتفاعات النطاق. سرعة الرياح في بقية أشهر السنة، من سبتمبر حتى ديسمبر تتباين من ٣,٧- ٥م/ث، ومن ثم فهي أكبر من المتوسط المطلوب، للحصول على طاقة الرياح، ويجعلها ذات جدوى اقتصادية. الشكل(٣). وعلى المستوى الفصلي بلغ

معدل سرعة الرياح، في فصل الشتاء ٣,٦م/ث، والخريف ٤,٣م/ث، وفي الصيف يقل معدل سرعة الرياح عن المعدل المطلوب إلى ٣,٣م/ث، والربيع إلى ٣م/ث. الشكل (٧).

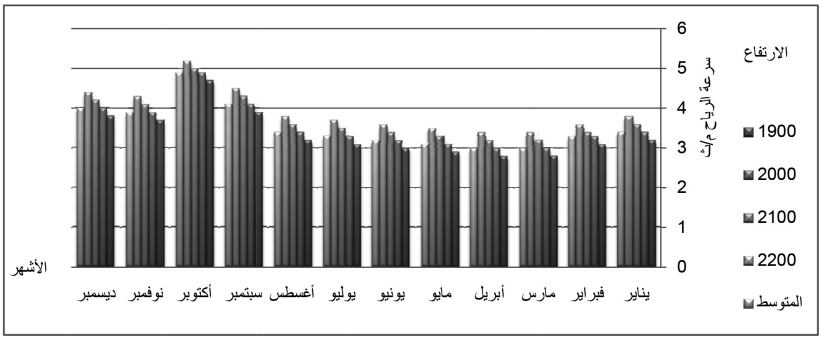
ب - **استغلال طاقة الرياح في النطاق A**: إن خشونة سطح النطاق أدت إلى تدني سرعة الرياح، إلى أقل من المعدل المطلوب، سواء على المستوى الشهري أو الفصلي. ومن ثم يمكن استغلال الرياح في هذا النطاق على النحو الآتي:

- نصب توربينات رياح منزلية، على أسطح مباني مدينة إب، البالغ عددها ٢٢ ألف مبنى؛ فقد أدى التطور المتلاحق للتقنية، إلى ابتكار توربين رياح سويدي، يدور بأي سرعة رياح، وينتج تياراً عالياً (الجنابي، ٢٠٠٨، ص١٢).
- استغلال المناطق التي تزداد عندها سرعة الرياح مثل قمم التلال والممرات الجبلية، وذلك بنصب توربينات الرياح ذات الاستطاعة المتوسطة أو العالية؛ مما يوفر طاقة كهربائية ذات جدوى اقتصادية.
- تعد السفوح الغربية والجنوبية التي ارتفاعها > ٢٠٠٠م، البعيدة عن تأثير سفح جبل بعدان، من جهة الشرق مناطق ملائمة لنصب توربينات الرياح؛ فهي تستطيع استقبال الرياح الجنوبية الغربية، والشمالية الشرقية. الشكل (٦).

الجدول (٣)
نطاقات الرياح في منطقة البحث

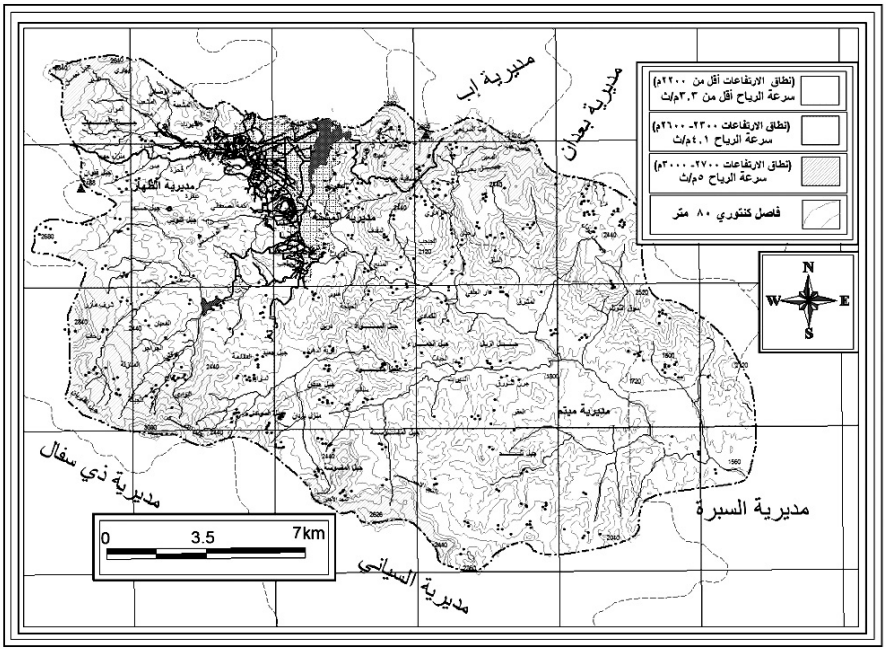
م	النطـــــاق	رمز النطاق	المساحة كم^2
١	نطاق الارتفاعات ١٧٠٠ – ٢٢٠٠	A	١٧٩
٢	نطاق الارتفاعات ٢٢٠٠ – ٢٦٠٠	B	٩٣,١
٣	نطاق الارتفاعات ٢٦٠٠ – ٣٠٠٠	C	٢٦,٥
	الإجمالي	-	**٢٩٨,٦**

الجدول من عمل الباحث بالاعتماد على برنامج GIS.



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (٤).

الشكل (٣) – متوسط سرعة الرياح الشهرية في ارتفاعات النطاق –A

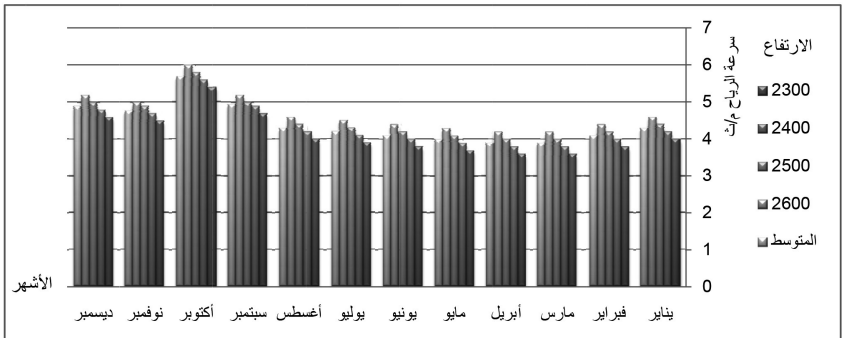


المصدر: بواسطة برنامج (GIS) بالاعتماد على بيانات سرعة الرياح، محطة "السيدة أروى" للفترة ٢٠٠٦–٢٠١٠.

الشكل (٤) – نطاقات سرعة الرياح في حوض إب

١-٢ نطاق الارتفاعات ١٧٠٠- ٢٢٠٠م (B): يشغل النطاق ٩٢,٣كم^{٢}. الجدول (٣). وهو سفوح جبلية، بها روابٍ تشرف على المناطق شبه المستوية، ويلاحظ أن سفوحه الشرقية والشمالية الشرقية، شديدة الانحدار، بينما الغربية والجنوبية الغربية، أطول نسبياً، ومتوسطة الانحدار، مقارنة بالسفوح الشرقية. الشكل (٤).

- **سرعة الرياح في النطاق:** بلغ متوسط سرعتها السنوية ٤,٤م/ث، وهي سرعة ملائمة للحصول على تيار كهربائي. متوسط سرعة الرياح السنوية يتباين مع تغير الارتفاع، فعند ٢٣٠٠م بلغت ٤م/ث/سنة، وعند ٢٦٠٠م نحو ٤,٦م/ث/سنة. الشكل (٤). وتتباين سرعة الرياح على المستوى الشهري في مختلف ارتفاعات النطاق في كل أشهر السنة والتي كانت > ٣,٦م/ث. وبلغت أعلى سرعة لها في أكتوبر، ونوفمبر، وديسمبر، وتفاوتت بين ٤ و ٦م/ث. الشكل (٥)؛ مما يجعل هذه الأشهر ذات أهمية في الحصول على تيار كهربائي من الرياح. وفي بقية أشهر السنة تفاوتت سرعة الرياح، عند مختلف ارتفاعات النطاق بين ٣,٦ و ٤,٨م/ث. الشكل (٥). وعلى المستوى الفصلي تباينت سرعة الرياح لتصل أعلى سرعة لها في الخريف٥,١م/ث، يليه الشتاء ٤,٤م/ث، ثم الصيف ٤,٢م/ث، ثم الربيع الذي تنخفض فيه سرعة الرياح إلى ٣,٩م/ث. الشكل (٧).



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٤).

الشكل (٥) – متوسط سرعة الرياح الشهرية في ارتفاعات النطاق B

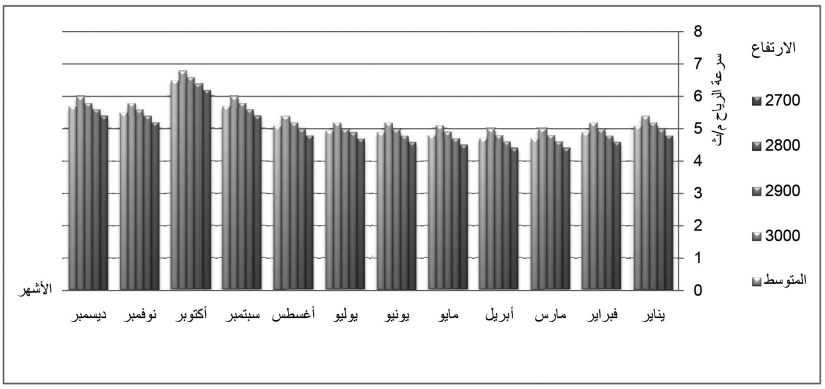
١-٣ نطاق الارتفاعات ٢٦٠٠- ٣٠٠٠م (C): يشغل ٢٦,٢كم^{٢}. الجدول (٣). ويمثل السفوح الجبلية الواقعة بين خطي كنتور ٢٦٠٠ و ٣٠٠٠م. ويلاحظ أن سفوح النطاق في غرب، وجنوب غرب الحوض، هي سفوح متوسطة الانحدار، يراوح انحدارها بين ٦٠ و ٧٠ وتنتهي بقمم جبلية، تشرف على حوض إب. بينما السفوح الواقعة في جهة الشرق والجنوب الشرقي، فهي قصيرة، يزيد انحدارها على ٧٠. الشكل (٣).

- **سرعة الرياح في النطاق (C)**: يلاحظ من الجدول (٤) أن متوسط سرعة الرياح السنوية في هذا النطاق، تبلغ ٥,١م/ث، هذا المعدل أكثر ملاءمة للحصول على تيار كهربائي. ويتباين المتوسط السنوي مع تغير الارتفاع؛ فعند ٢٧٠٠م بلغ ٤,٨م/ث، وعند ٢٨٠٠م وصل إلى ٥م/ث، وعند ٢٩٠٠ نحو ٥,٢م/ث، وعند ٣٠٠٠م زادت سرعتها إلى ٥,٤م/ث. الشكل (٦). وعلى المستوى الشهري يلاحظ أن سرعة الرياح في أكتوبر، ونوفمبر، وديسمبر قد تباينت بين ٥ و ٦م/ث. أما في بقية الأشهر فتفاوتت بين ٣,٦ و ٤,٨م/ث؛ مما يجعل سرعة الرياح في كل أشهر السنة عند مختلف ارتفاعات النطاق ضمن المعدل المطلوب للحصول على تيار كهربائي. الشكل (٦). وعلى المستوى الفصلي يتباين متوسط سرعة الرياح في مختلف فصول السنة بين ٤,٧ و ٩.٥م/ث، ليزداد المعدل في الخريف إلى ٦م/ث.م/ث، يليه الشتاء ٥,٥م/ث، ثم الصيف ٥م/ث م/ث، ثم الربيع ٥م/ث، ومع تغير الارتفاع، تزداد سرعة الرياح بمعدل ٠,٢م/ث، لتكون أكثر ملاءمة للحصول على تيار كهربائي. الشكل (٧).

الجدول (٤)
متوسط سرعة الرياح الشهرية في مختلف نطاقات حوض إب
للفترة ٢٠٠٦– ٢٠١٠

النطاق	الارتفاع	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر	المتوسط
النطاق A	١٩٠٠*	٣,٢	٣,١	٢,٨	٢,٨	٢,٩	٣	٣,١	٣,٢	٣,٩	٤,٧	٣,٧	٣,٨	٣,٣
	٢٠٠٠	٣,٤	٣,٣	٣	٣	٣,١	٣,٢	٣,٣	٣,٤	٤,١	٤,٩	٣,٩	٤	٣,٤
	٢١٠٠	٣,٦	٣,٤	٣,٢	٣,٢	٣,٣	٣,٤	٣,٥	٣,٦	٤,٣	٥	٤,١	٤,٢	٣,٦
	٢٢٠٠	٣,٨	٣,٦	٣,٤	٣,٤	٣,٥	٣,٦	٣,٧	٣,٨	٤,٥	٥,٢	٤,٣	٤,٤	٣,٨
	المتوسط	٣,٤	٣,٣	٣	٣	٣,١	٣,٢	٣,٣	٣,٤	٤,١	٤,٩	٣,٩	٤	٣,٤
النطاق B	٢٣٠٠	٤	٣,٨	٣,٦	٣,٦	٣,٧	٣,٨	٣,٩	٤	٤,٧	٥,٤	٤,٥	٤,٦	٤
	٢٤٠٠	٤,٢	٤	٣,٨	٣,٨	٣,٩	٤	٤,١	٤,٢	٤,٩	٥,٦	٤,٧	٤,٨	٤,٢
	٢٥٠٠	٤,٤	٤,٢	٤	٤	٤,١	٤,٢	٤,٣	٤,٤	٥	٥,٨	٤,٩	٥	٤,٤
	٢٦٠٠	٤,٦	٤,٤	٤,٢	٤,٢	٤,٣	٤,٤	٤,٥	٤,٦	٥,٢	٦	٥	٥,٢	٤,٦
	المتوسط	٤,٣	٤,١	٣,٩	٣,٩	٤	٤,١	٤,٢	٤,٣	٤,٩	٥,٧	٤,٨	٤,٩	٤,٣
النطاق C	٢٧٠٠	٤,٨	٤,٦	٤,٤	٤,٤	٤,٥	٤,٦	٤,٧	٤,٨	٥,٤	٦,٢	٥,٢	٥,٤	٤,٨
	٢٨٠٠	٥	٤,٨	٤,٦	٤,٦	٤,٧	٤,٨	٤,٩	٥	٥,٦	٦,٤	٥,٤	٥,٦	٥
	٢٩٠٠	٥,٢	٥	٤,٨	٤,٨	٤,٩	٥	٥	٥,٢	٥,٨	٦,٦	٥,٦	٥,٨	٥,٢
	٣٠٠٠	٥,٤	٥,٢	٥	٥	٥,١	٥,٢	٥,٢	٥,٤	٦	٦,٨	٥,٨	٦	٥,٤
	المتوسط	٥,١	٤,٩	٤,٧	٤,٧	٤,٨	٤,٩	٤,٩	٥,١	٥,٧	٦,٥	٥,٥	٥,٧	٥,١

* **المصدر:** بيانات محطة السيدة أروى للفترة ٢٠٠٦–٢٠١٠ بتصرف.
سرعة الرياح في بقية الارتفاعات من عمل الباحث وفقاً لنتائج المعادلة (١).



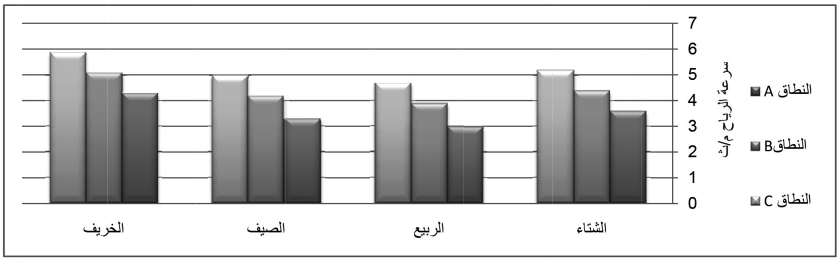
الشكل: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٤).

الشكل (٦) – متوسط سرعة الرياح الشهرية في مختلف ارتفاعات النطاق C

الجدول (٥)
متوسط سرعة الرياح الفصلية في مختلف نطاقات حوض إب

	الارتفاع	الشتاء	الربيع	الصيف	الخريف
النطاق A	١٩٠٠	٣,٤	٢,٨	٣,١	٤,١
	٢٠٠٠	٤,٦	٣,٠	٣,٣	٤,٣
	٢١٠٠	٣,٧	٣,٢	٣,٥	٤,٥
	٢٢٠٠	٣,٩	٣,٤	٣,٧	٤,٧
	المتوسط	٣,٦	٣	٣,٣	٤,٣
النطاق B	٢٣٠٠	٤,١	٣,٦	٣,٩	٤,٩
	٢٤٠٠	٤,٣	٣,٨	٤,١	٥,١
	٢٥٠٠	٤,٥	٤,٠	٤,٣	٥,٢
	٢٦٠٠	٤,٧	٤,٢	٤,٥	٥,٤
	المتوسط	٤,٤	٣,٩	٤,٢	٥,١
النطاق C	٢٧٠٠	٤,٩	٤,٤	٤,٧	٥,٦
	٢٨٠٠	٥,١	٤,٦	٤,٩	٥,٨
	٢٩٠٠	٥,٣	٤,٨	٥,١	٦
	٣٠٠٠	٥,٥	٥,٠	٥,٣	٦,٢
	المتوسط	٥,٢	٤,٧	٥	٥,٩

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٤).



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٥).

الشكل (٧) – متوسط سرعة الرياح الفصلية في نطاقات حوض إب

٢- اتجاه الرياح في حوض إب:

يحدد اتجاه الرياح في منطقة البحث، وفقاً لبيانات محطة "السيدة أروى"، ذات الأهمية الكبيرة في تحديد اتجاه صفوف التوربينات، التي لابد أن تكون متعامدة على اتجاه الرياح، وهذا يرفع من قدرة مزرعة الرياح في توليد أكبر قدر سنوي من الطاقة الكهربائية (خليل، ٢٠١٠، ص٣٨). وتهب على منطقة البحث رياح لا تختلف في اتجاهها العام، عن الرياح التي تهب على اليمن؛ فهي رياح شمالية شرقية صيفاً، ورياح جنوبية غربية شتاء (الحفيان، ٢٠٠٤، ص٧٠). إلا أن هناك عوامل محلية تؤثر على اتجاه الرياح، في مختلف نطاقات البحث، تتمثل في ما يأتي:

٢-١ العوامل المؤثرة على اتجاه الرياح:

أ - **شكل حوض إب:** يتبين من خرائط GIS أن حوض إب منخفض جبلي، يأخذ اتجاهها شمالياً غربياً جنوبياً شرقياً، يبلغ طوله ٢٨,٣كم، وعرضه ١٤,٣كم. ويتباين في اتساعه؛ إذ يضيق في الوسط عند باب ميتم إلى ٢,٨كم، ويتسع في الجنوب الشرقي إلى ٧,٦كم، وفي الشمال الغربي إلى ٩,٨كم. هذه الخصائص تؤثر على اتجاه الرياح التي تهب على منطقة البحث: في الشتاء (الشمالية الشرقية) وفي الصيف (الجنوبية الغربية)؛ فتغير الرياح من اتجاهها، خاصة في نطاق الارتفاعات الدنيا (١٧٠٠-

٢٢٠٠م) بما يتوافق مع شكل الحوض، ويقل تأثير عامل الشكل كلما ارتفعنا إلى أعلى (أبو سمور وحامد، ١٩٩٩، ص ٣٥).

ب – **تضاريس الحوض:** من الشكل (٢) نجد أن حوض إب يتألف من عدد من التضاريس؛ فالجبال تحيط بالحوض من جميع الاتجاهات، وتتباين في ارتفاعها بين ١٥٠٠ و ٣٠٠٠م. كما ينتشر في وسط الحوض عدد من التلال، التي تعرف محلياً بالآكام، مثل أكمة الصعفاني، وجوبلة، ودار الشرف، التي تتخللها عدد من الأودية، هذه التضاريس تؤثر على اتجاه الكتل الهوائية التي تهب على الحوض، ويجعلها تأخذ اتجاهات متباينة (الصليحي، ٢٠١٤، ص١١).

ج – **توجيه الجبال:** يشرف جبل بعدان الشاهق (٣٠٠٠م) على حوض إب من جهة الشرق، ويأخذ الجبل اتجاهاً جنوبياً شرقياً، شمالياً غربياً. ليشكل حائط صد أمام الرياح الغربية، والجنوبية الغربية، القادمة من الغرب والجنوب الغربي صيفاً، ويجبرها على تغيير اتجاهها نحو الجنوب الشرقي؛ حيث ينفتح الحوض، على صورة ممر جبلي يعرف بباب ميتم؛ ليشكل الأخير منطقة انضغاط تتضاعف عنده سرعة الرياح. الشكل (٩). فإذا كانت سرعة الرياح ٤م/ث، فستكون في منطقة الانضغاط ٧م/ث (خليل، ٢٠١٠، ص ١٦)، ومن ناحية ثانية يؤثر جبل بعدان على الرياح الشمالية الشرقية التي تهب على الحوض في الشتاء، ويجعل تأثيرها محدوداً على سطح الحوض، خاصة في الارتفاعات٢٢٠٠. الشكل (١٠).

٢-٢ اتجاه الرياح في نطاقات حوض إب: تؤثر العوامل السابقة، على اتجاه الرياح في مختلف النطاقات على النحو الآتي:

أ – **اتجاه الرياح في النطاق** A: من خلال تحليل وردة الرياح. الشكل (٨)، يتبين أن اتجاه الرياح يكون على النحو الآتي:

– اتجاه الرياح صيفاً: تكون جنوبية بنسبة ٦٣٪، وتهب من بداية أكتوبر

حتى نهاية أبريل. وتصبح غربية بنسبة ١٥٪ خلال مايو ويونيو وسبتمبر.

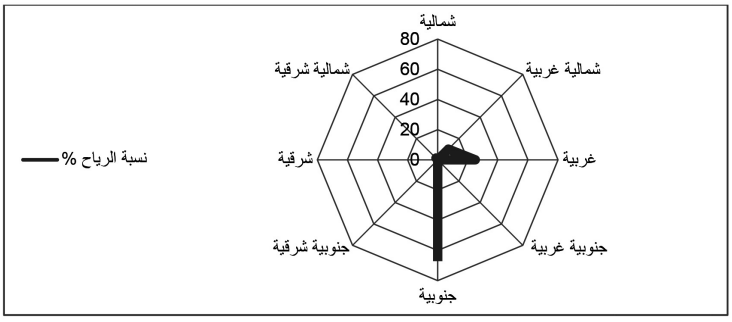
- اتجاه الرياح شتاء: تهب على منطقة البحث الرياح الشمالية الشرقية، التي ظهر تأثيرها بنسبة ١,٦٪. إن تدني هذه النسبة جاء نتيجة لتأثير جبل بعدان الشاهق، الذي يشرف مباشرة على موضع محطة "السيدة أروى" وأقدام سفح جبل بعدان في شرق وشمال شرق الحوض. ويظهر تأثير الرياح الشمالية الشرقية تدريجياً كلما اتجهنا إلى غرب وجنوب غرب الحوض، نتيجة لتلاشي تأثير الجبل كمنطقة ظل رياح. أو كلما ارتفعنا > ٢٠٠٠م. الشكل (١٠).

الجدول (٦)

نسبة تكرار اتجاه الرياح السائدة الشهرية في حوض إب خلال الفترة (٢٠٠٦-٢٠١٠)

الاتجاه	شمالية	شمالية شرقية	شرقية	جنوبية شرقية	جنوبية	جنوبية غربية	غربية	شمالية غربية
النسبة٪	.	١,٦	.	.	٦٣	.	٢٥	١٠

المصدر: بيانات محطة" السيدة أروى" للفترة ٢٠٠٦- ٢٠١٠.



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات الجدول ٦.

الشكل (٨) – وردة رياح حوض إب عند ارتفاع ١٩٠٠م خلال ٢٠٠٦-٢٠١٠

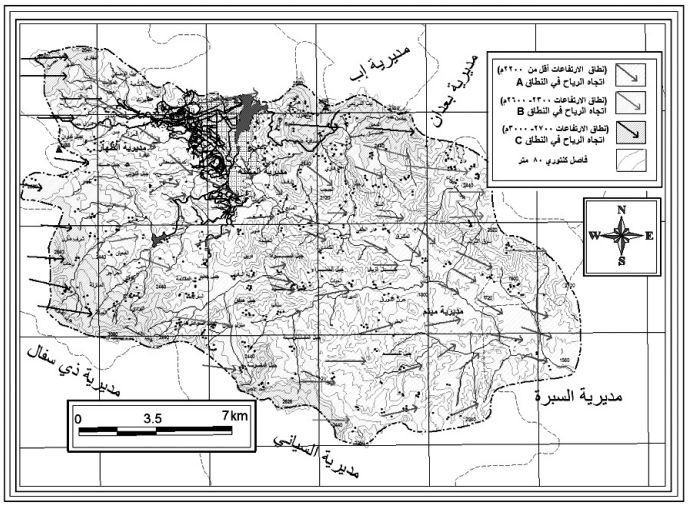
ب – اتجاه الرياح في النطاقين B ، C: يقل تأثير العوامل السابقة، كلما ارتفعنا في هذين النطاقين، وطبقاً لنتائج محطات مناخية تقع عند ارتفاع > ٢٢٠٠م، كمحطة ذمار (٢٣٩٠م)، وتبعد عن منطقة البحث ١٠٠كم شمالاً، ويتبين أن اتجاه الرياح في هذين النطاقين يتوافق مع اتجاه الرياح العامة التي تهب على اليمن؛ فتكون:

- في فصل الصيف: رياحاً جنوبية غربية، وتهب من بداية الصيف حتى منتصف الخريف. الشكل (٩).
- في الشتاء والربيع: شمالية شرقية. الشكل (١٠).

٣– توجيه مزارع الرياح في نطاقات حوض إب: تمثل مناطق الأعراف الجبلية، وقمم التلال والممرات الجبلية، الأماكن الأنسب لتوضع العنفات الريحية، التي تزداد عندها سرعة الرياح (خليل، ٢٠١٠، ص٤٠). وتبعاً لاتجاهات الرياح السابقة يمكن توجيه مزارع الرياح على النحو الآتي:

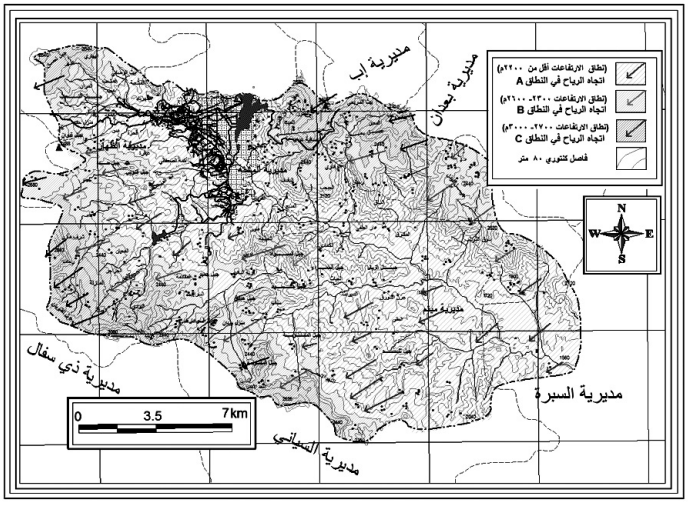
٣–١ توجيه مزارع الرياح في النطاق A: تمثل أسطح المباني وقمم التلال والخوانق مواضع ملائمة، لنصب توربينات الرياح؛ بحيث يمكن في تلك المواضع نصب توربينات رياح تتوافق مع تغير اتجاه الرياح على النحو الآتي:

- توربينات الرياح المنزلية: تتدنى سرعة الرياح، وتغير من اتجاهها في النطاق. لذلك يمكن استعمال توربينات منزلية بقدرة ١٠٠–٤٠٠ وات، تدور بأي سرعة رياح، ومزودة بزعانف تعمل على توجيه التوربين، ويمكن نصبها على أسطح مباني مدينة إب، البالغ عددها ٢٢ ألف مبنى، لتنتج طاقة كهربائية، تلبي الأغراض المنزلية (الكهرباء من الرياح، المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة RCREE، ص١٩).



المصدر: بواسطة (GIS) وفقاً لبيانات محطة "السيدة أروى" على ارتفاع ١٩٠٠م، بيانات محطات "ذمار" على ارتفاع ٢٣٩٠م.

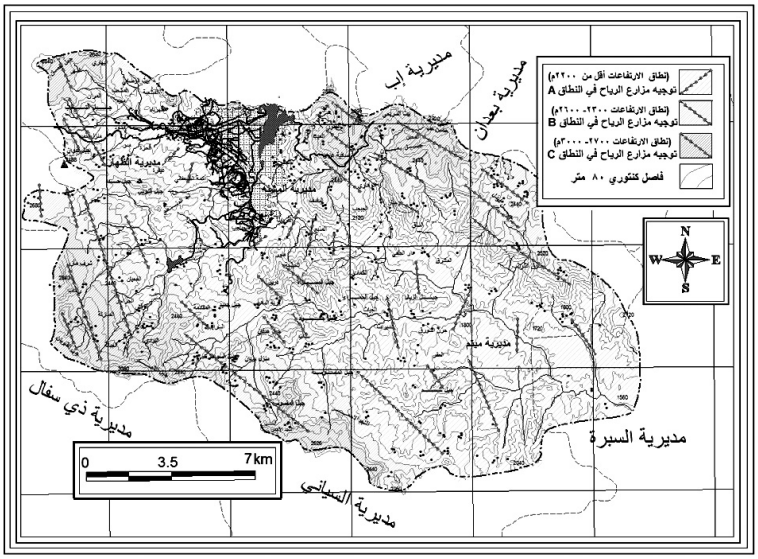
الشكل(٩) – اتجاه الرياح في نطاقات حوض إب صيفاً



المصدر: بواسطة (GIS) وفقاً لبيانات محطة "السيدة أروى" على ارتفاع ١٩٠٠م، بيانات محطات "ذمار" على ارتفاع ٢٣٩٠م.

الشكل (١٠) – اتجاه الرياح في نطاقات حوض إب شتاء

- توربينات الرياح للأغراض الاقتصادية: سرعة الرياح على التلال تكون أكبر منها في الأراضي المحيطة؛ لأن الرياح سوف تصبح مضغوطة في سفح التلة من الاتجاه الذي تهب منه، وتتكرر الحالة نفسها في الخوانق؛ حيث تنضغط في الجهة التي تهب منها وتزداد سرعتها؛ فإذا كانت سرعتها ٣,٦م/ث فستزداد إلى ٦,٦م/ث في منطقة الخانق (خليل، ٢٠١٠، ص٤٠). لذلك يمكن نصب توربينات رياح ذات استطاعة متوسطة، يستطيع التوربين الواحد منها تغطية احتياج أكثر من ٢٠ منزلاً (طاقة الرياح، مجلة الطاقة المتجددة الألمانية dena، ص٧). ويتم توجيه التوربين بشكل يتوافق مع اتجاه الرياح. فممر وادي ميتم مثلاً: يمكن توجيه مزارع الرياح ذات الاستطاعة المتوسطة على شكل صفوف متوالية، تمتد على طول الممر، باتجاه شمالي شرقي – جنوبي غربي. الشكل (١١).



المصدر: بواسطة (GIS) بالاعتماد على بيانات اتجاهات الرياح التي وفرتها محطة السيدة أروى للفترة ٢٠٠٩–٢٠١١

الشكل (١١) – توجيه مزارع الرياح في حوض إب

٣-٢ توجيه مزارع الرياح في النطاقين B, C: تمثل سفوح وأعراف جبل النعمان، وجبال وراف النجد الأحمر، وأعراف جبل بعدان، المشرفة على الحوض من جهة الشرق مناطق ملائمة لنصب توربينات الرياح؛ ليكون توجيه مزارع الرياح في هذه المواضع، على شكل صفوف تأخذ اتجاهاً شمالياً غربياً، جنوبياً شرقياً؛ لتكون الرياح الشمالية الشرقية في الشتاء والربيع والرياح الجنوبية الغربية في الصيف والخريف عمودية عليها. الشكل (١١).

ثالثاً – حساب الطاقة المتولدة من سرعة الرياح:

يمكن حساب الطاقة المتولدة من الرياح في منطقة البحث بحسب (الخياط، ٢٠٠٦، ص٤٥) وفقاً للمعادلة التالية:

$$P = PvxV^3 = wat\backslash m^2 \qquad (2)$$

حيث إن:

P = كمية الطاقة بالوات. V^3 = سرعة الرياح م/ث. Pv = كثافة الهواء، وهي قيمة ثابتة = ١,٢٩كغم/م^٢.

١- تباين طاقة الرياح في نطاقات البحث:

تشير الدراسات إلى أن زيادة ارتفاع برج توربينة الرياح ١م، يؤدي إلى زيادة في الطاقة المتولدة بمعدل ١٪ (محمود، ٢٠١٢، ص١٣) وتبعاً لنتائج المعادلة (٢) التي تظهر في الجدول (٧) يتبين أنه كلما زاد الارتفاع في حوض إب ١٠٠م، زادت كمية الطاقة التي يمكن الحصول عليها من الرياح بمعدل ٠,٠١وات/م^٢/ث. حيث تتباين كمية الطاقة الكهربائية في مختلف نطاقات الحوض من شهر إلى آخر، ومن فصل إلى آخر على النحو الآتي:

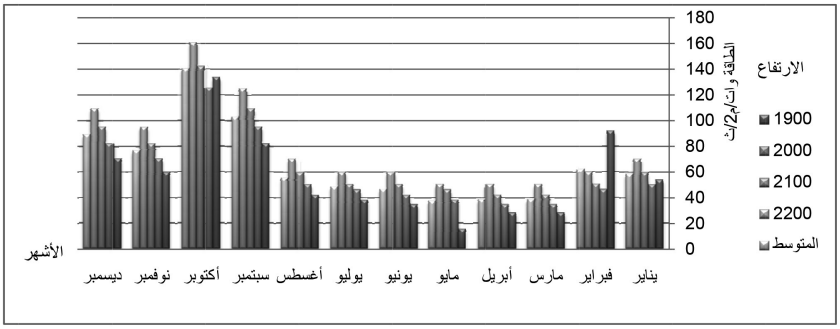
١-١ الطاقة المتولدة من سرعة الرياح في النطاق A:

من خلال الجدول (٧) يتبين أن طاقة الرياح في مختلف ارتفاعات النطاق تتباين على المستوى السنوي أو الشهري أو الفصلي على النحو الآتي:

- على المستوى السنوي: بلغ متوسط الطاقة الكهربائية التي يمكن الحصول عليها في النطاق ٢٣٥٨,٧وات/م^٢/ث. يتباين المتوسط

بحسب الارتفاع؛ فعند ١٩٠٠م بلغ ٦١٥وات/م^{٢}، وعند ٢٠٠٠م بلغ ٢٧١٩وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٢٠٠م بلغ ٣١٦٦وات/م^{٢}.

- على المستوى الشهري: أعلى طاقة كهربائية، يمكن الحصول عليها من الرياح في أكتوبر، وتتباين مع تغير الارتفاع؛ فعند ١٩٠٠م تبلغ ١٣٣,٩وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٠٠٠م نحو ١٢٥,٦وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٢٠٠م تبلغ ١٣٣,٩وات/م^{٢}/ث. وأدنى متوسط، في شهري أبريل ومارس، ويتفاوت من ارتفاع إلى آخر؛ فعند ١٩٠٠م بلغ ٢٨,٣وات/م^{٢}/ث، ويزداد المعدل مع الارتفاع، ليصل عند ٢٢٠٠م إلى ٣٩وات/م/^{٢}/ث. الشكل (١٢).
- على المستوى الفصلي: يعد الخريف أعلى فصول السنة حصولاً على طاقة الرياح؛ فقد بلغ متوسط الطاقة الكهربائية التي يمكن الحصول عليها ١٠٢,٨وات/م^{٢}/ث، يليه الشتاء ٧٠,٤وات/م^{٢}/ث، ثم الصيف ٥٠,٦وات/م^{٢}/ث، ويعد الربيع أقل فصول السنة حصولاً على الطاقة الكهربائية من الرياح؛ إذ بلغ فيه المتوسط ٣٨,٦وات/م^{٢}/ث. الشكل (١٣).



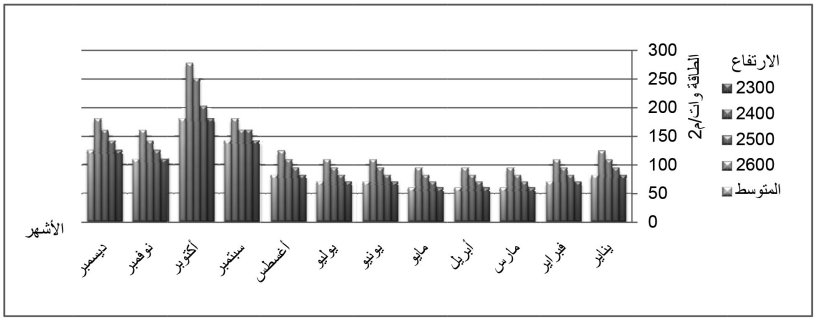
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٧).

الشكل (١٢) – متوسط طاقة الرياح الشهرية (وات/م^{٢}/ث) في مختلف ارتفاعات النطاق A

١-٢ الطاقة المتولدة من سرعة الرياح في النطاق B:

يتبين من الجدول (٧) أن متوسط طاقة الرياح، في مختلف ارتفاعات النطاقات على المستوى السنوي، والشهري، والفصلي تتباين على النحو الآتي:

- على المستوى السنوي: بلغ متوسط الطاقة التي يمكن الحصول عليها ٣٨٥٣,٨وات/م^{٢}/ث، يتباين المتوسط بحسب الارتفاع؛ فعند٢٣٠٠م بلغ ٣٤١٧وات/م^{٢}، وعند ٢٤٠٠م بلغ ٣٦٨٤,٥وات/م^{٢}، وعند ٢٦٠٠م بلغ ٤٢٧٠ وات/م^{٢}.
- على المستوى الشهري: تتباين كمية الطاقة لتصل أعلاها في أكتوبر إلى ٢٢٨,٦ وات/م^{٢}/ث، وأدنى متوسط في مارس، وأبريل، ومايو على التوالي ٩٥,٦وات/م^{٢}/ث. ويتباين المتوسط بحسب الارتفاع؛ فعند ٢٣٠٠م بلغ ١٨١,٤وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٦٠٠م بلغ ٢٧٨,٦ وات/م^{٢}/ث، ويعد مارس، وأبريل أدنى شهور السنة حصولاً على طاقة الرياح، التي بلغ معدلها خلال الشهرين ٧٧,٢وات/م^{٢}/ث على التوالي. وبحسب الارتفاع تتفاوت كمية الطاقة؛ لتصل عند ٢٣٠٠م إلى نحو ٦٠,١وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٦٠٠م تزداد الطاقة الكهربائية إلى ٩٥,٦وات/م^{٢}/ث. الشكل (١٣).



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٧).

الشكل (١٣) – متوسط طاقة الرياح الشهرية (وات/م^{٢}/ث) في مختلف ارتفاعات النطاق B

- على المستوى الفصلي: يعد الخريف أعلى فصول السنة حصولاً على الطاقة الكهربائية، التي بلغ متوسطها ١٨٥,٥وات/م^{٢}/ث، ويتباين المتوسط بحسب الارتفاع؛ فعند ٢٣٠٠م بلغ ١٤٤,٧وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٦٠٠م نحو ٢٠٧,١وات/م^{٢}/ث. يليه الشتاء الذي بلغ متوسط الطاقة الكهربائية ١١٥,٣وات/م^{٢}/ث، ويتباين المتوسط بحسب الارتفاع؛ فعند ٢٣٠٠م بلغ ٩٣وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٦٠٠م نحو ١٣٨,٩ وات/م^{٢}/ث. ثم الصيف في المرتبة الثالثة؛ إذ بلغ متوسط الطاقة التي نحصل عليها فيه ١١٥,١وات/م^{٢}/ث. وتتباين مع الارتفاع لتصل عند ٢٣٠٠م إلى ٧٤,٧وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٦٠٠م نحو ١١٥,١وات/م^{٢}/ث. ويعد الربيع أقل فصول السنة حصولاً على الطاقة الكهربائية من الرياح؛ إذ بلغ متوسطها فيه ٩٥,٦وات/م^{٢}/ث، ويتباين المتوسط مع الارتفاع ليصل عند ٢٣٠٠م إلى ٦٠,١وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٦٠٠م إلى ٩٥,٦وات/م^{٢}/ث. الشكل (١٥).

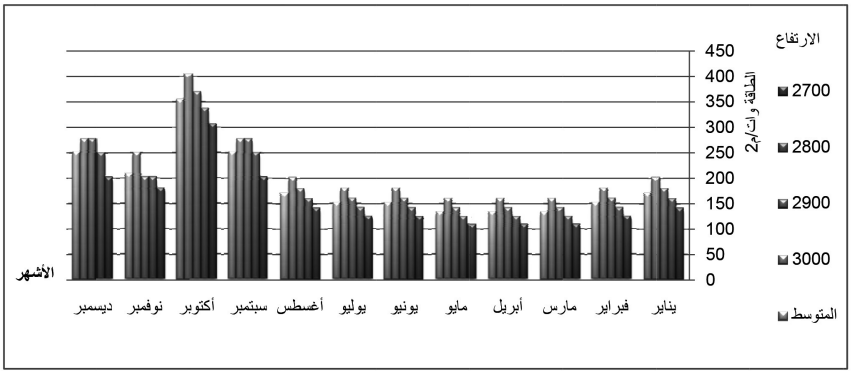
١-٣ الطاقة المتولدة من سرعة الرياح في النطاق C:

في هذا النطاق يرتفع معدل الطاقة التي نحصل عليها في وحدة المساحة م^{٢}، مقارنة بالنطاقين السابقين، لزيادة سرعة الرياح بفعل تدني تأثير عامل خشونة السطح. ويتضح من الجدول (٧) تباين معدل الطاقة الكهربائية التي نحصل عليها من الرياح في النطاق على النحو الآتي:

- معدل طاقة الرياح السنوية: بلغ متوسط طاقة الرياح السنوية التي يمكن الحصول عليها في هذا النطاق ٥١٢٨ وات/م^{٢}/ث. يتباين المتوسط بحسب الارتفاع ليصل عند ٢٧٠٠م إلى٤٥٨٦ وات/م^{٢}، وعند ٢٨٠٠م إلى ٤٩٧٢ وات/م^{٢}، وعند ٣٠٠٠م إلى نحو ٥٦٤٨,٧ وات/م^{٢}.
- طاقة الرياح الشهرية: بلغ أعلى طاقة كهربائية نحصل عليها من الرياح في أكتوبر؛ إذ بلغ متوسطها في مختلف ارتفاعات النطاق نحو ٢٢٨,٦ وات/م^{٢}/ث، وتتباين بحسب الارتفاع؛ فعند ٢٣٠٠م بلغت ١٨١,٤وات/م^{٢}/ث، وعند ٢٦٠٠م نحو ٢٧٨,٦وات/م^{٢}/ث. ويعد مارس وأبريل أدنى شهور

السنة حصولاً على طاقة الرياح؛ إذ بلغ متوسطها خلالهما ١٣٤,٨وات/م^{٢}/ث، ويتفاوت المتوسط مع تغير الارتفاع؛ فعند ٢٧٠٠م، نحو ١٠٩,٧وات/م^{٢}/ث، وتزداد مع الارتفاع لتصل عند ٣٠٠٠م إلى١٦١,٣وات م/^{٢}/ث. الشكل (١٤).

- طاقة الرياح على المستوى الفصلي: يعد الخريف أعلى فصول السنة حصولاً على الطاقة الكهربائية من الرياح؛ إذ بلغ متوسطها ٢٦٧,٨ وات/م^{٢}/ث، وتتباين بحسب الارتفاع؛ فعند ٢٧٠٠م بلغ نحو ٢٣٠,٦ وات/م^{٢}/ث، وتزداد مع الارتفاع؛ فعند ٣٠٠٠م بلغت ٣١١,٩ وات/م^{٢}/ث. يليه الشتاء ١٩٢,٦وات/م^{٢}/ث، وتتباين بحسب الارتفاع؛ فعند ٢٧٠٠م بلغ نحو ١٥٧,١ وات/م^{٢}/ث، وتزداد مع الارتفاع؛ فعند ٣٠٠٠م بلغت ٢٢١ وات/م^{٢}/ث. ثم الصيف ١٥٩,٢وات/م^{٢}/ث، وتتباين مع الارتفاع لتصل عند ٢٧٠٠م إلى١٣١,٣وات/م^{٢}/ث، وعند ٣٠٠٠م نحو ١٨٨,٦وات/م^{٢}/ث. ويعد الربيع أقل الفصول حصولاً على الكهرباء من الرياح؛ إذ بلغ متوسطها ١٣٤,٩ وات/م^{٢}/ث، ويتباين المتوسط مع تغير الارتفاع ليصل عند ٢٧٠٠ إلى ١٥٧,١ وات/م^{٢}/ث، وعند ٣٠٠٠م إلى ١٦١,٣وات/م^{٢}/ث. الشكل (١٥).



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٧).

الشكل (١٤) – متوسط طاقة الرياح الشهرية (وات/م^{٢}/ث) في مختلف ارتفاعات النطاق C

الجدول (٧)
طاقة الرياح الشهرية (وات/م^{٢}/ث) بحسب الارتفاع في حوض إب خلال ٢٠٠٦-٢٠١٠

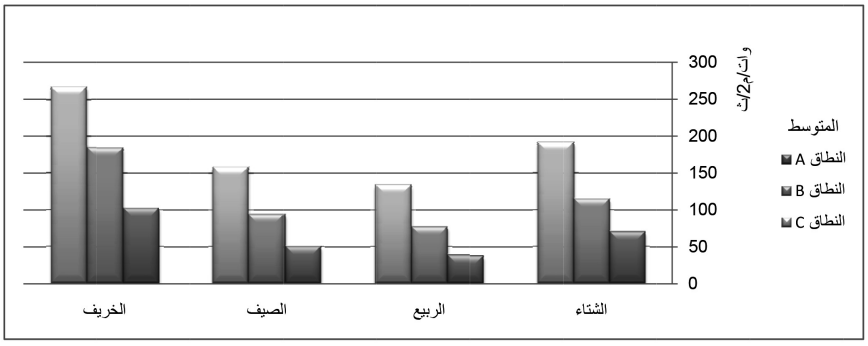
	الارتفاع	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر	المعدل
النطاق A	١٩٠٠	٥٤,٤	٩٢,٣	٢٨,٣	٢٨,٣	١٥,٥	٣٤,٨	٣٨,٤	٤٢,٢	٨٢,٦	١٣٣,٩	٦٠,١	٧٠,٨	٦١٥,٥
	٢٠٠٠	٥٠,٧	٤٦,٤	٣٤,٨	٣٤,٨	٣٨,٤	٤٢,٢	٤٦,٤	٥٠,٧	٩٥,٦	١٢٥,٦	٧٠,٨	٨٢,٦	٢٧١٩
	٢١٠٠	٦٠,١	٥٠,٧	٤٢,٢	٤٢,٢	٤٦,٤	٥٠,٧	٥٠,٧	٦٠,١	١٠٩,٩	١٤٢,٧	٨٢,٦	٩٥,٦	٢٩٣٣,٩
	٢٢٠٠	٧٠,٨	٦٠,١	٥٠,٧	٥٠,٧	٥٠,٧	٦٠,١	٦٠,١	٧٠,٨	١٢٥,٦	١٦١,٣	٩٥,٦	١٠٩,٩	٣١٦٦,٤
	المتوسط	٥٩	٦٢,٤	٣٩	٣٩	٢٧,٨٥	٤٦,٩	٤٨,٩	٥٥,٩	١٠٣,٤	١٤٠,٩	٧٧,٣	٨٩,٧	٢٣٥٨,٧
النطاق B	٢٣٠٠	٨٢,٦	٧٠,٨	٦٠,١	٦٠,١	٦٠,١	٧٠,٨	٧٠,٨	٨٢,٦	١٤٢,٧	١٨١,٤	١٠٩,٩	١٢٥,٦	٣٤١٧,٥
	٢٤٠٠	٩٥,٦	٨٢,٦	٧٠,٨	٧٠,٨	٧٠,٨	٨٢,٦	٨٢,٦	٩٥,٦	١٦١,٣	٢٠٣,١	١٢٥,٦	١٤٢,٧	٣٦٨٤,١
	٢٥٠٠	١٠٩,٩	٩٥,٦	٨٢,٦	٨٢,٦	٨٢,٦	٩٥,٦	١٠٩,٩	١٦١,٣	٢٥١,٦	١٤٢,٧	١٦١,٣	٣٩٧١,٣	٢٦٠٠
	٢٦٠٠	١٢٥,٦	١٠٩,٩	٩٥,٦	٩٥,٦	٩٥,٦	١٠٩,٩	١٠٩,٩	١٢٥,٦	١٨١,٤	٢٧٨,٦	١٦١,٣	١٨١,٤	٤٣٧٠,٤
	المتوسط	١٠٣,٤	٨٩,٧	٧٧,٣	٧٧,٣	٧٧,٣	٨٩,٧	٨٩,٧	١٠٣,٤	١٦١,٧	٢٢٨,٧	١٣٤,٩	١٥٢,٨	٣٨٣٥,٨
النطاق C	٢٧٠٠	١٤٢,٧	١٢٥,٦	١٠٩,٩	١٠٩,٩	١٠٩,٩	١٢٥,٦	١٢٥,٦	١٤٢,٧	٢٠٣,١	٣٠٧,٤	١٨١,٣	٢٠٣,١	٤٥٨٦,٨
	٢٨٠٠	١٦١,٣	١٤٢,٧	١٢٥,٦	١٢٥,٦	١٢٥,٦	١٤٢,٧	١٤٢,٧	١٦١,٣	٢٥١,٦	٣٣٨,٢	٢٠٣,١	٢٥١,٦	٤٩٧٢
	٢٩٠٠	١٨١,٤	١٦١,٣	١٤٢,٧	١٤٢,٧	١٤٢,٧	١٦١,٣	١٦١,٣	١٨١,٤	٢٧٨,٦	٣٧٠,٩	٢٠٣,١	٢٧٨,٦	٥٣٠٦
	٣٠٠٠	٢٠٣,١	١٨١,٤	١٦١,٣	١٦١,٣	١٦١,٣	١٨١,٤	١٨١,٤	٢٠٣,١	٢٧٨,٦	٤٠٥,٦	٢٥١,٦	٢٧٨,٦	٥٦٤٨,٧
	المتوسط	١٧٢,١	١٥٢,٨	١٣٤,٩	١٣٤,٩	١٣٤,٩	١٥٢,٨	١٥٢,٨	١٧٢,١	٢٥٢,٩	٣٥٥,٥	٢٠٩,٨	٢٥٢,٩	٥١٢٨,٤

المصدر: الجدول من عمل الباحث بالاعتماد على معادلة الطاقة (٢) وبيانات الجدول (٤).

الجدول (٨)
متوسط طاقة الرياح الفصلية (وات/م^{٢}) في نطاقات حوض إب خلال ٢٠٠٦-٢٠١٠

النطاق	الارتفاع	الشتاء	الربيع	الصيف	الخريف
النطاق A	١٩٠٠	٧٢,٥	٢٤,٣	٣٨,٥	٩٢,٢
	٢٠٠٠	٥٩,٩	٣٦	٤٦,٤	٩٧,٣
	٢١٠٠	٦٨,٨	٤٣,٦	٥٣,٨	١١١,٧
	٢٢٠٠	٨٠,٣	٥٠,٧	٦٣,٧	١٢٧,٥
	المتوسط	٧٠,٤	٣٨,٦	٥٠,٦	١٠٢,٨
النطاق B	٢٣٠٠	٩٣	٦٠,١	٧٤,٧	١٤٤,٧
	٢٤٠٠	١٠٦,٩	٧٠,٨	٨٦,٩	١٦٣,٣
	٢٥٠٠	١٢٢,٣	٨٢,٦	١٠٠,٤	١٨٥,٢
	٢٦٠٠	١٣٨,٩	٩٥,٦	١١٥,١	٢٠٧,١
	المتوسط	١١٥,٢٧٥	٧٧,٢٧٥	٩٤,٢٧٥	١٨٥,٢
النطاق C	٢٧٠٠	١٥٧,١	١٠٩,٩	١٣١,٣	٢٣٠,٦
	٢٨٠٠	١٨٥,٢	١٢٥,٦	١٤٨,٩	٢٦٤,٣
	٢٩٠٠	٢٠٧,١	١٤٢,٧	١٦٨	٢٨٤,٢
	٣٠٠٠	٢٢١	١٦١,٣	١٨٨,٦	٣١١,٩
	المتوسط	١٩٢,٦	١٣٤,٩	١٥٩,٢	٢٦٧,٨

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٧).



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الجدول (٨).

الشكل (١٥) – طاقة الرياح الفصلية (وات/م^{٢}) في نطاقات حوض إب خلال ٢٠٠٦-٢٠١٠

٢- معدل طاقة الرياح في حوض إب:

تختلف كمية الطاقة الكهربائية في وحدة المساحة (م^{٢})، التي يمكن الحصول عليها من الرياح في منطقة البحث تبعاً لزيادة سرعة الرياح مع تغير الارتفاع، وتباين مساحة كل نطاق. ومن خلال الجدول (٧) تبين أنه يمكن الوصول إلى إجمالي الطاقة التي يمكن أن نحصل عليها في حوض إب على النحو الآتي:

فعلى افتراض أنه يمكن استغلال مساحة ١٠٠٪، فإنه يمكن الحصول على نحو ٩١٥٢٢٠٢٣٠٠ وات/ث، وهذا أمر غير ممكن من الناحية العملية؛ لوجود مناطق غير ملائمة كمناطق ظل الرياح، والطرقات وغيرها. أما إذا تم استغلال ٥٠٪ من مساحة الحوض فإنه يمكن الحصول على ٢٨٦١٩٥٨٨٤٦ وات/ث. وإذ تم استغلال نحو ٣٠٪ من مساحة أراضي الحوض فإنه يمكن الحصول على ٢٦٤٠٢٠٣٠٠١وات/ث.

ولاحظنا أن استغلال الرياح يختلف من نطاق إلى آخر للحصول على الطاقة الكهربائية؛ فكل نطاق يتمتع بصفات تميزه عن الآخر؛ ففي النطاق A مثلث أسطح المباني مناطق ملائمة لنصب توربينات الرياح المنزلية. كما يمكن استغلال المواضع التي تتضاغط عندها سرعة الرياح للأغراض الاقتصادية. بينما النطاقان B، C هما الأكثر جدوى للحصول على طاقة كهربائية من الرياح للأغراض الاقتصادية؛ حيث يتضاعف مقدار الطاقة في وحدة المساحة متر^{٢}، لتزيد سرعة الرياح وتوفر الأراضي التي يمكن حجزها لغرض إنتاج الطاقة الكهربائية من الرياح.

الجدول (٩)
معدل الطاقة (وات/م^{٢}) في نطاقات حوض إب

م	النطاق	المساحة كم^{٢}	المساحة التي يمكن استغلالها بـ م^{٢}			مقدار الطاقة وات/م^{٢}/ث	إجمالي الطاقة بحسب المساحة وات/ث		
			١٠٠٪	٥٠٪	٣٠٪		١٠٠٪	٥٠٪	٣٠٪
١	النطاق A	١٧٩	١٧٩٠٠٠٠	٨٩٥٠٠٠	٥٩٦٦٦٧	٢٣٥٨,٧	٤٢٢٢٠٧٣٠٠٠	٢١١١٠٣٦٥٠٠	١٤٠٧٣٥٧٦٦٧
٢	النطاق B	٩٣,١	٩٣١٠٠٠	٤٦٥٥٠٠	٣١٠٣٣٣	٣٨٣٥,٨	٣٥٧١١٢٩٨٠٠	٧١٤٢٢٥٩٦	١١٩٠٣٧٦٦٠٠

تابع/ الجدول (٩)
معدل الطاقة (وات/م^{٢}) في نطاقات حوض إب

م	النطاق	المساحة كم^{٢}	المساحة التي يمكن استغلالها بـ م^{٢}			مقدار الطاقة وات/م^{٢}/ث	إجمالي الطاقة بحسب المساحة وات/ث		
			١٠٠٪	٥٠٪	٣٠٪		١٠٠٪	٥٠٪	٣٠٪
٣	النطاق C	٢٦,٥	٢٦٥٠٠٠	١٣٢٥٠٠	٨٨٣٣٣	٥١٢٨,٣	١٣٥٨٩٩٩٥٠٠	٦٧٩٤٩٩٧٥٠	٤٢٤٦٨٧٣٤
	الإجمالي	٢٩٨,٦	٢٩٨٦٠٠٠	١٤٩٣٠٠٠	٩٩٥٣٣٣	–	٩١٥٢٢٠٢٣٠٠	٢٨٦١٩٥٨٨٤٦	٢٦٤٠٢٠٣٠٠١

الجدول من عمل الباحث بالاعتماد على الجدولين (٣، ٧) وبرامج GIS - RS ومعادلة الطاقة رقم (٢).

نتائج الدراسة:

١ – يتوفر في منطقة البحث في الارتفاعات ⩽ ٢٢٠٠–٣٠٠٠م، سرعة الرياح المطلوبة ⩽ ٣,٦ م/ث، للحصول على الطاقة الكهربائية للأغراض الاقتصادية.

٢ – تعد طاقة الرياح طاقة آمنة، وتحد من التلوث خاصة في ظل توجه الدولة لإعلان مدينة إب عاصمة سياحية.

٣ – تؤثر تضاريس الحوض في النطاق A على اتجاه الرياح؛ لتأخذ اتجاهات متباينة، تتوافق مع اتجاه تضاريس النطاق، وتؤدي إلى خفض سرعتها إلى أقل من المعدل المطلوب؛ مما يؤثر على استثمار الرياح للحصول على طاقة كهربائية للأغراض الاقتصادية.

٤ – في النطاقين B، C يكون اتجاه الرياح ثابتاً ومتوافقاً مع اتجاه الرياح العام، لتهب الرياح الجنوبية الغربية صيفاً، والرياح الشمالية الشرقية شتاء.

٥ – مع تغير الارتفاع في منطقة البحث، تزداد سرعة الرياح بمعدل ٠,٢ م/ث/ ١٠٠م، وهذا يتباين على المستوى الشهري والفصلي على النحو الآتي:

- تقل سرعة الرياح الشهرية إلى أدنى معدل في شهري مارس وأبريل، لتكون في النطاق A نحو٣م/ث، وفي النطاق B نحو ٤م/ث، وفي النطاق C نحو ٤,٧م/ث.

- تزداد سرعة الرياح الشهرية إلى أعلى معدل في شهر أكتوبر، لتكون في النطاق A نحو ٤,٩م/ث، وفي النطاق B نحو ٥,٧م/ث، وفي النطاق C نحو ٦,٥م/ث.
- تقل سرعة الرياح الفصلية إلى أدنى معدل في الربيع، لتكون في النطاق A نحو ٣م/ث، وفي النطاق B نحو ٣,٩م/ث، وفي النطاق C نحو ٤,٧م/ث.
- تزداد سرعة الرياح الفصلية إلى أعلى معدل في الخريف، لتكون في النطاق A نحو ٤,٣م/ث، وفي النطاق B نحو ٥,١م/ث، وفي النطاق C نحو ٥,٩م/ث.

٦ – مع تغير الارتفاع في منطقة البحث، يزداد معدل الطاقة الكهربائية التي نحصل عليها من الرياح، بمعدل ٠,٠١ كيلوبايت/١٠٠م. وهذا يتباين على المستوى الشهري والفصلي على النحو الآتي:

- يقل معدل الطاقة الكهربائية التي نحصل عليها من الرياح في شهري مارس وأبريل، لتبلغ في النطاق A ٣٩ وات/م^{٢}، وفي النطاق B نحو ٧٧,٣ وات/م^{٢}، وفي النطاق C نحو ١٣٤,٩وات/م^{٢}.
- يزداد معدل الطاقة الكهربائية التي نحصل عليها من الرياح في شهر أكتوبر لتبلغ في النطاق A نحو ١٤٠,٩ وات/م^{٢}، وفي النطاق B نحو ٢٢٨,٧ وات/م^{٢}، وفي النطاق C نحو ٣٥٥,٥ وات/م^{٢}.
- يقل معدل الطاقة الكهربائية التي نحصل عليها من الرياح في الربيع لتبلغ في النطاق A نحو ٣٨,٦ وات/م^{٢} وفي النطاق B نحو ٦٠,١ وات/م^{٢}، وفي النطاق C نحو ١٣٤,٩وات/م^{٢}.
- يزداد معدل الطاقة الكهربائية التي نحصل عليها من الرياح في الخريف لتبلغ في النطاق A نحو ١٠٢,٨وات/م^{٢}، وفي النطاق B نحو١٣٩,٩ وات/م^{٢}، وفي النطاق C نحو٢٦٧,٨ وات/م^{٢}.

٧ – متوسط ما يوفره المتر^{٢} في مختلف ارتفاعات الحوض ٣٧٧٤,٢٦٧

وات/م^{٢}. الجدول (٧). وتتفاوت كمية الطاقة الكهربائية التي نحصل عليها في مختلف النطاقات، لتصل في النطاق A إلى ٢٣٥٨ وات/م^{٢}/ث، وفي النطاق B إلى ٣٨٣٥,٨ وات/م^{٢}/ث، وفي النطاق C الأعلى ارتفاعاً إلى ٥١٢٨ وات/م^{٢}.

٨ – يتوافر في منطقة البحث عدد من ممرات الرياح، خاصة في النطاق A سواء بين التلال، وبين البروزات الجبلية، لتشكل مناطق ملائمة لنصب توربينات الرياح التي تتضاعف عندها سرعة الرياح. الشكل (٦).

توصيات الدراسة:

- عدم الاستهانة بالطاقة التي يمكن أن نحصل عليها من الرياح، مهما كانت سرعة الرياح متدنية.
- رفع الوعي عند المواطنين بأهمية الاستفادة من مصادر الطاقة النظيفة، واستغلالها في الحصول على الطاقة الكهربائية لتلبية متطلباتهم المنزلية.
- إعداد مخطط وطني مزمن، يهدف إلى تحقيق الاكتفاء الذاتي من الطاقة الكهربائية من مختلف المصادر؛ فقوة اقتصادنا الوطني تتحقق من خلال ما نمتلكه من طاقة تلبي حاجة السكان، وحاجة مختلف الأنشطة الصناعية، والزراعية، والتجارية.
- تنويع مصادر الحصول على الطاقة، سواء من الرياح، أو الطاقة الشمسية؛ فمنطقتنا العربية، بما فيها اليمن، مناطق بديلة للطاقة بعد نضوب النفط، خاصة في ظل تنامي تكنولوجيا إنتاج الطاقة من هذه المصادر، وهذا سيحقق استدامة أطول للوقود الأحفوري.
- دعم البحث العلمي، وتأسيس مراكز متخصصة، وتأهيل كوادر تعنى بتقنيات الطاقة المتجددة، والاستفادة من برامج GIS وبيانات الأقمار الصناعية، من خلال ما تقدمه من معلومات في هذا الجانب.
- التوسع في بناء محطات رصد سرعة الرياح؛ لغرض الحصول على

الكهرباء من طاقة الرياح، لتوفير بيانات دقيقة، وتغطية مختلف الارتفاعات.

- حجز مواقع لمزارع الرياح خاصة في النطاقين B، C، قبل أن يطولها التوسع الحضري. الشكل (١١).
- نصب توربينات الرياح المنزلية على أسطح مباني مدينة إب، البالغ عددها نحو ٢٢ ألف مبنى؛ بحيث تكون مزودة بزعانف تساعد على توجيه التوربين مع تغير اتجاه الرياح.
- تشجيع رأس المال الوطني، في الاستثمار في إنتاج الطاقة الكهربائية من الرياح، في ظل توافر الشروط الطبيعية من حيث سرعة الرياح واتجاهها، للحصول على طاقة تغطي ولو جزءاً من العجز الحاصل.
- تسويق تكنولوجيا الحصول على طاقة الرياح من توربينات الرياح، بصورة تسمح للمواطن شراءها، ونصبها على سطح المبنى، بما يحقق الحصول على طاقة كهربائية، تحقق الاكتفاء الذاتي للأغراض المنزلية.
- أخيراً ﴿وَقُلِ ٱعۡمَلُواْ فَسَيَرَى ٱللَّهُ عَمَلَكُمۡ وَرَسُولُهُۥ وَٱلۡمُؤۡمِنُونَۖ وَسَتُرَدُّونَ إِلَىٰ عَٰلِمِ ٱلۡغَيۡبِ وَٱلشَّهَٰدَةِ فَيُنَبِّئُكُم بِمَا كُنتُمۡ تَعۡمَلُونَ﴾. سورة التوبة، آية ١٠٥.

المصادر والمراجع

أولاً – المصادر:

- القرآن الكريم: سورة الحاقة: آية ٦، سورة التوبة: آية ١٠٥.
- طاقة الرياح، مجلة الطاقة المتجددة، الوكالة الألمانية للطاقة DENA، الوزارة الاتحادية للاقتصاد والتكنولوجيا: <www.renewables-made-in-germany.com>.
- رياح التغيير في أنظمة الطاقة العالمية والعربية، مجلة المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة RCREE. ٢٠١٢/٤٢٨٣، ص١٩.
- مجلة البنك الدولي الإلكترونية <www.albankaldawli.org>

ثانياً – المراجع العربية:

- موسى، أسماء مختار. (مارس–٢٠٠٧). أنظمة الإشراف التحكمي عن بعد وتحصيل البيانات لمراقبة مزارع الرياح. الطاقة والحياة. العدد ٢٤.
- الخليل، باسم. (١٥–١٢– ٢٠١٠). طاقة الرياح في سوريا: الواقع والآفاق. المركز الوطني لبحوث الطاقة. ندوة تحديث أطلس طاقة الرياح السوري. آفاق طاقة الرياح.
- أبو سمور، حسن؛ الخطيب، حامد. (١٩٩٩). جغرافية الموارد المائية. الطبعة الأولى. دار صفاء للنشر. عمان.
- فولي، حسن سلطان. (٢٠٠٦). جغرافية الطاقة. دار المؤيد. الرياض.
- خليل، سامر. (١٥–١٢–٢٠١٠). أسس تصميم مزارع الرياح. طاقة الرياح في سوريا: الواقع والآفاق. المركز الوطني لبحوث الطاقة. ندوة تحديث أطلس طاقة الرياح السوري. آفاق طاقة الرياح.
- خليل، عامر. (١٢–١٥– ٢٠١٠). أسس تصميم مزارع الرياح. ندوة تنمية طاقة الرياح في القطر العربي السوري. الهيئة العليا للبحث العلمي.

- رهبان، عبدالرؤوف. (٢٠١١). الأهمية النسبية والنوعية لموارد الطاقة. مجلة جامعة دمشق. المجلد ٢٧. العددان الأول والثاني.
- نجيب، عبدالعظيم محمد. (١٩٩٦). علم المناخ المعاصر. قسم الأراضي والمياه. كلية الزراعة. جامعة الإسكندرية.
- موسى، علي حسن. (١٩٨٣). الوجيز في المناخ التطبيقي. دار الفكر. الطبعة الأولى.
- آل أبو علي، علي مجيد ياسين. (٢٠١٢). إمكانية استغلال طاقة الرياح في قضاء الناصرية. دراسة في جغرافية الطاقة. مجلة آداب ذي قار. العدد ٦. المجلد ٣.
- الحفيان، عوض إبراهيم عبد الرحمن. (٢٠٠٤). أوجه التباين والاختلاف في الجمهورية اليمنية. جامعة صنعاء. مطبعة جامعة صنعاء. العدد الأول.
- يوسف، عياش سعود. (فبراير–١٩٨١). تكنولوجيا الطاقة البديلة. عالم المعرفة. العدد ٣٨.
- أبو حامد، فريد كاظم؛ جعفر، علي. (١٢/١٥/٢٠١٠). تصميم مولد ريحي يستعمل في المناطق المعزولة عن الرياح. جامعة دمشق. ندوة تنمية طاقة الرياح في القطر العربي السوري. الهيئة العليا للبحث العلمي.
- الخياط، محمد مصطفى. (٢٠٠٦). الطاقة: مصادرها – أنواعها استخداماتها، القاهرة. (ديسمبر – ٢٠٠٧). تكنولوجيا طاقة الرياح. مجلة الكهرباء العربية. العدد ٩١.
- الخياط، محمد مصطفى؛ الشيتي، إيناس محمد إبراهيم. (فبراير ٢٠١٠). استخدام نظم المعلومات الجغرافية في تنمية مشروعات الطاقة المتجددة. دراسة حالة مصر بحث منشور في المؤتمر العلمي ١٧ لنظم المعلومات. القاهرة.

- كرم الدين، محمود ماجد. (٢٠١٢). رياح التغيير في أنظمة الطاقة العالمية والعربية. الكهرباء من الرياح. المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة. إسبانيا.
- الجنابي، مصطفى كامل. (٧-٨ أبريل ٢٠٠٨) إمكانية استغلال طاقة الرياح في توليد الكهرباء في العراق. مؤتمر التنمية المستدامة والكفاءة الاستخدامية للموارد المتاحة. جامعة فرحات. المملكة المغربية.
- مقابلة شخصية: فهد محمد شمسان، مدير مكتب مدير مؤسسة الكهرباء سابقاً - منطقة إب، بتاريخ ٢٥/١١/٢٠١٣م.
- مقابلة شخصية: إبراهيم محمد صبر، أكاديمي بقسم الفيزياء بجامعة إب، بتاريخ ٢٠/٣/ ٢٠١٣.
- العبود، نايف. (٢٠١٠). تحليل وتصنيع واختبار دوار ريحي شاقولي يعمل بمبدأ سافونيوس/ داريوس، ندوة آفاق طاقة الرياح. حمص. سوريا.
- الصليحي، هادي محمد. (٢٠١٤). أثر الأمطار على تجدد الماء الجوفي في حوض مدينة إب ١٩٩٠- ٢٠١٣ مؤتمر جيو تونس ٢٠١٤. منشورات علوم جغرافية. العدد ٥٤٥٤.

ثالثاً - المراجع الأجنبية:

- Ben-Jue Tsai and Bao-Shi Shiau. (2011). Experimental study on experimental study on The flow characteristics for wind over atwo-Dimensional upwind slope escarpment. Joumal of manine science and Techonoloogy,Vol.19 No 5, pp 453- 459.
- Fortunato B, Mummolo G, and Cavallera. (2002). G, Economic optimization of wind power plants for isolated locations. Wind Energy (60).
- US DOE & NREL. (2013). Open Energy Inoformation. Available at: < http//:en.openei.org/apps/TCDB/ > (accessed April p 4, 2013)
- World Energy outlook. (2012). international Energy Agency (iea).