Netherlands Enterprise Agency

يونيسف | لكل طفل

جدوى استخدام طاقة الرياح لأنظمة إمدادات المياه في اليمن

بدعم من

وكالة المشاريع الهولندية - الدعم الهولندي للحد من مخاطر الكوارث وتزايدها

جدول المحتويات

1	الملخص التنفيذي	5
2	المقدمة	7
2.1	الخلفية	7
2.2	أهداف المشروع	8
2.3	التضاريس	8
2.4	حالة إمدادات المياه	9
3	نقاط البدء	12
3.1	مصادر البيانات	13
3.2	أداة طاقة الرياح	17
3.3	الافتراضات	17
3.3.1	افتراضات عائد الطاقة	17
3.3.2	افتراضات النموذج المالي	18
4	تكنولوجيا توربينات الرياح	19
4.1	تكنولوجيا التوربينات	19
4.2	منحنى الطاقة	19
4.3	أنظمة ضخ المياه بطاقة الرياح	20
5	لمحة عامة عن موارد الرياح	21
5.1	خريطة الرياح في اليمن	21

5.2 توزيع الرياح 23

5.3 خريطة الموارد المائية 27

5.4 المواقع المصنفة 29

5.5 ملخص الفصل 30

6 التقطع والخيار الهجين 30

6.1 تقطع الرياح 31

6.2 خيار الطاقة الشمسية 33

6.3 الخيار الهجين 34

6.4 ملخص الفصل 35

7 هيكل النموذج المالي 36

7.1 النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية 37

7.1.1 ملخص النفقات التشغيلية والنفقات الرأسمالية 38

7.2 التكلفة المستوية للطاقة 38

7.3 التدفق النقدي 39

7.4 ملخص الفصل 39

8 تحديات البناء والتحديات التشغيلية 40

8.1 نقل التوربين 40

8.2 بناء التوربين 42

8.3 الصيانة 44

8.4 التنوع البيولوجي والقضايا البيئية 44

8.4.1 التصاريح 45

8.5 ملخص الفصل 46

9	حلول الطاقة المتجددة	46
9.1	المنهجية	46
9.2	ملخص تعز – المخا	51
9.3	طاقة الرياح في المواقع الأخرى	52
10	الاستنتاجات والتوصيات	54
10.1	استنتاجات المشروع	54
10.2	التوصيات	55
10.2.1	طاقة الرياح في اليمن	55
11	المراجع	57

1. الملخص التنفيذي

ترغب وكالة المشاريع الهولندية – الدعم الهولندي للحد من مخاطر الكوارث وتزايدها، جنباً إلى جنب مع اليونيسف في اليمن، في دعم الحكومة اليمنية في تقييم خيار استخدام طاقة الرياح لتشغيل منشآت المياه في اليمن. طلبت الحكومة اليمنية من اليونيسف في اليمن دعمها في استكشاف الكيفية التي

يمكـن لطاقـة الريـاح مـن خلالهـا أن تـدعم الطلـب فـي 16 منشـأة ميـاه تقـع فـي 14 محافظة في اليمن.

تــم إجــراء دراســة الجــدوى مــن خــلال التحليــل المكتبــي. نظــراً لعــدم الاســتقرار الاجتمـاعي والسياسـي فـي الـيمن، فإنـه لـم يكـن مـن الممكـن تنفيـذ المشـروع بشـكل مباشــر فــي الــيمن. بــدلاً مــن ذلــك، تــم دعــم بيانــات المشــروع باســتخدام مواقــع موثوقــة للبيانــات مفتوحــة المصــدر مثــل أطلــس الريــاح العــالمي وأطلــس الطاقــة الشمســية العــالمي وعــارض بيانــات الوصــول إلى الطاقــة الخــاص بوكالــة ناســا، وتكملـة ذلـك بالبيانـات وخبـرات الشـركة فـي تطـوير طاقـة الريـاح والطاقـة الشمسـية. تــم التحقــق مــن المعلومــات المتعلقــة بموقــع المشــروع وخصــائص محطــات إمدادات المياه من قبل استشاري محلي.

تـم تطـوير نمـوذج إكسـل لإنشـاء حلـول مصـممة خصيصـاً لكـل محطـة إمـداد بالميـاه. يقـدم هـذا النمـوذج حلـولاً باسـتخدام بيانـات الريـاح والطاقـة الشمسـية، وخصـائص التوربينــات وألــواح الطاقــة الشمســية، ومنحنيــات الطاقــة، والطلــب عــلى الطاقــة، وبيانــات النفقــات الرأســمالية والنفقــات التشــغيلية. يتكــون النــاتج مــن خصــائص الطاقــة المختلفــة؛ بالإضــافة إلى نتــائج النفقــات الرأســمالية والنفقــات التشــغيلية والتكلفة المستوية للكهرباء لكل محطة.

تتــيح هــذه الأداة للمســتخدم فهــم تغطيــة الطاقــة فــي الــيمن ببســاطة عــن طريــق المؤشـرات المتغيـرة فـي لوحـة البيانـات المحـددة. الأداة قابلـة للتعـديل بسـهولة مـن قبل المستخدم مما يجعلها سهلة الاستخدام.

بعـد تقيـيم المنشـآت البـالغ عـددها 16 منشـأة، توصـلنا إلى أن منطقـة المخـا – تعـز سـتكون الموقـع الأكثـر ملاءمـة لتوربينـات الريـاح نظـراً لمتوسـط قـوة سـرعات الريـاح فيهـا عـلى مـدى فتـرات زمنيـة أطـول. مـع ذلـك، فـي حـين تتمتـع هـذه المنطقـة بسـرعات ريـاح أكثـر موثوقيـة، إلا أننـا مـا زلنـا نلاحـظ (عنـد النظـر فـي التحليـل سـاعة بسـاعة) أن طاقـة الريـاح لا يمكنهـا تلبيـة الطلـب لكـل سـاعة. قـد تحـل البطاريـات (باهظـة الـثمن) هـذه المشـكلة جزئيـاً، ولكـن سـتظل هنـاك أيـام تتطلـب مصـادر بديلـة للطاقة.

بقيــة المواقــع منخفضــة إلى متوســطة الملاءمــة، ويرجــع ذلــك أساســاً إلى ســرعات الريــاح المنخفضــة (خاصــة عنــد ارتفاعــات الريــاح بــين 0 و 100 متــر) والتقلبــات اليوميـة والموسـمية القويـة. فـي معظـم الحـالات، تنـتج توربينـات الريـاح الكبيـرة (عنـد ارتفـاع > 100 متـر) إمـا الكثيـر مـن الطاقـة خـلال فتـرات الريـاح والقليـل جـداً مـن الطاقـة خـلال الفتـرات التـي تكـون فيهـا سـرعات الريـاح منخفضـة. هـذا مـن شـأنه أن يـؤدي إلى نظـام غيـر فعـال للغايـة لتشـغيل محطـة إمـداد بالميـاه (التـي تتطلـب إمدادات مستقرة من الطاقة).

النفقــات الرأســمالية المرتفعــة لطاقــة الريــاح (مقارنــة أيضــاً بالنفقــات الرأســمالية المنخفضــة للطاقــة الشمســية) لا تجعــل طاقــة الريــاح الخيــار الأول. يبــين الجــدول أدنـاه النفقـات الرأسـمالية والنفقـات التشـغيلية لمنطقـة المخـا – تعـز (الموقـع الأكثـر ترجيحاً لطاقة الرياح).

جدول رقم 1-1: مزيج التكنولوجيا لمنطقة المخا – تعز

الطلب	تكنولوجيا الطاقة الشمسية	تكنولوجيا طاقة الرياح	البطارية
120 كيلو وات/ساعة 3 محطات إمداد بالمياه	Sunket SKT600 إجمالي 500 وحدة	Vestas 3,45 MW 1 توربين تروس	أيونات الليثيوم قدرة 500 كيلووات (حاوية واحدة)

جدول رقم 1-2: النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية لمنطقة المخا – تعز

	طاقة الرياح		طاقة الرياح + البطارية		الطاقة الشمسية		الطاقة الشمسية + البطارية	
النفقات الرأسمالية	5.388.210,00 أمريكي	دولار	5.719.725,00 أمريكي	دولار	540.000,00 أمريكي	دولار	871.515,00 أمريكي	دولار
النفقات التشغيلية	3.232.926,00 أمريكي	دولار	3.431.835,00 أمريكي	دولار	180.000,00 أمريكي	دولار	522.909,00 أمريكي	دولار
الإجمالي	8.621.136,00 أمريكي	دولار	9.151.560,00 أمريكي	دولار	720.000,00 أمريكي	دولار	1.394.424,00 أمريكي	دولار

من الواضح أن ألواح الطاقة الشمسية أرخص بكثير من توربينات الرياح مما يعني أيضاً فترة أقصر لعائد الاستثمار.

تتطلب طاقة الرياح استثمارات أولية مرتفعة، كما أن تقلبات الرياح في اليمن تجعل قابلية التنبؤ بطاقة الرياح أقل بكثير من الطاقة الشمسية. بالإضافة إلى ذلك، فإن الخبرة في البناء والصيانة موجودة بالفعل فيما يتعلق بألواح الطاقة الشمسية في اليمن، في حين أن الأمر سيحتاج إلى إنفاق المزيد من الوقت والموارد لبناء فريق من الخبراء فيما يتعلق بتوربينات الرياح. علاوة على ذلك،

تتطلب توربينات الرياح الكبيرة رافعات عالية ومقطورات متخصصة وطرق واسعة وممهدة (دون منحدرات حادة أو منعطفات ضيقة) للنقل. يمكن نقل الألواح الشمسية بواسطة شاحنات عامة ولا تتطلب معدات متخصصة وموظفين مدربين تدريباً عالياً للتركيب والصيانة.

الخلاصة

في اليمن، طاقة الرياح ليست الخيار الأول لإمدادات المياه بسبب عدم كفاءتها في ظروف الرياح الحالية، وبسبب التحديات الفنية وتكاليف الاستثمار المرتفعة. من المرجح أن يتم استخدام الطاقة الشمسية لأنها قابلة للتنبؤ بها وقابلة للتطوير وسهلة النقل والتركيب والصيانة، على الرغم من بصمتها الكبيرة على محطات إمدادات المياه الكبيرة.

المنطقة الأكثر ترجيحاً لطاقة الرياح هي منطقة تعز، ولكن حتى هنا، فإنه توجد شكوك بشأن ما إذا كانت طاقة الرياح ستكون بديلاً جيداً للطاقة الشمسية.

في الوقت الحالي، لا تُعد البطاريات (على الرغم من انخفاض أسعارها) حلاً قابلاً للتطبيق بسبب تكلفتها المرتفعة. في ظروف محددة، قد يكون تخزين المياه بديلاً جيداً لتخزين الكهرباء. يتضمن ذلك ضخ المياه في الخزانات خلال فترات زيادة إنتاج الطاقة واستخدامها خلال فترات نقص إنتاج الطاقة. في الوقت الحالي، تُعد هذه الطريقة أقل تكلفة من تخزين الطاقة الكهربائية، ولكنها تتطلب

تضـاريس مرتفعـة أو أبـراج ميـاه. يمكـن اعتبـار طريقـة التخـزين هـذه مناسـبة للمجتمعات الأصغر حجماً، والتي تتطلب كميات صغيرة.

2. المقدمة

2-1 الخلفية

شـهدت الـيمن، الدولـة التـي تواجـه العديـد مـن التحـديات، عقـداً مـن الاضـطرابات ولا تـزال غارقـة بشـدة فـي النـزاع. فـي خضـم هـذه الاضـطرابات، يكـافح اليمنيـون لتلبيـة احتياجـاتهم الأساسـية مـن الغـذاء والميـاه والمـأوى (اللجنـة الدوليـة للصـليب الأحمـر، 2022). المياه، والتي تُعد حاجة أساسية، تتأثر أيضاً بالعوامل التالية:

1) **النمـو السـكاني المرتفـع**: أدى النمـو السـكاني السـريع فـي الـيمن إلى زيـادة استهلاك المياه، مما أدى إلى إجهاد الموارد الحالية.
2) **نقـص مصـادر الميـاه**: أدى السـحب المفـرط للميـاه الجوفيـة عـلى مـدى فتـرة طويلة إلى استنزاف مصادر المياه، مما أدى إلى تفاقم شح المياه.
3) **الاعتمـاد عـلى الميـاه الجوفيـة**: الافتقـار إلى منشـآت إمـدادات الميـاه المسـتدامة يجبـر اليمنيـين عـلى الاعتمـاد بشـكل كبيـر عـلى الميـاه الجوفيـة لتلبية احتياجات الصرف الصحي.
4) **محدوديـة الطاقـة الكهربائيـة**: ظـروف الفقـر فـي الـيمن تحـد مـن الوصـول إلى الكهرباء، مما يعيق ضخ المياه باستخدام الطاقة الكهربائية.

5) **قابليـة التـأثر بالمنـاخ:** تواجـه الـبلاد أنماطـاً مناخيـة لا يمكـن التنبـؤ بهـا، بمـا فـي ذلك موجات الجفاف الطويلة وعدم انتظام هطول الأمطار.

تقليـدياً، كـان اليمنيـون يلبـون احتياجـاتهم مـن الميـاه مـن خـلال الميـاه الجوفيـة التـي يـتم ضـخها يـدوياً أو كهربائيـاً مـن الآبـار. غيـر أن التعقيـدات الجيوسياسـية أضـرت بشـدة بالبنيـة التحتيـة للطاقـة، ممـا أدى إلى عـدم قـدرة تحمـل تكـاليف الكهربـاء والـديزل بالنسـبة للكثيـرين (ReliefWeb، 2021). فـي الوقـت الحـالي، فـإن 74.9٪ فقـط مـن اليمنيـين يمكـنهم الوصـول إلى الكهربـاء، وتعتمـد إمـداداتهم مـن الطاقـة بشـكل كبيـر عـلى الوقـود غيـر المتجـدد (الـديزل) وهـو بـاهظ التكلفـة (البنـك الـدولي، 2021). تعـاني بعـض محطـات إمـدادات الميـاه أيضـاً مـن إمـدادات الوقـود غيـر الموثوقـة ولا يمكنهـا أن تسـتمر فـي توليـدها المحـدود إلا بفضـل مـنح الوقـود التـي تتلقاها من الوكالات الدولية والدول الأجنبية.

للتخفيـف مـن وطـأة هـذا الوضـع، تبحـث اليونيسـف عـن مصـادر جديـدة لإمـدادات الطاقـة. بعـض محطـات إمـدادات الميـاه لـديها بالفعـل ألـواح طاقـة شمسـية لتشـغيل الآبـار والمضـخات. مـع ذلـك، أعربـت اليونيسـف عـن الحاجـة إلى إجـراء تقيـيم أوسـع نطاقـاً لخيـارات الطاقـة المتاحـة (طاقـة الريـاح بشـكل أساسـي). تواصـلت اليونيسـف مـع وكالـة المشـاريع الهولنديـة – الـدعم الهولنـدي للحـد مـن مخـاطر الكـوارث وتزايـدها ووافقـت الوكالـة عـلى تمويـل دراسـة الجـدوى. تـم إجـراء هذه الدراسة من قبل شركة Witteveen + Bos.

يعرض هذا التقرير نتائج دراسة الجدوى هذه.

2-2 أهداف المشروع

يهـدف هـذا المشـروع إلى تقيـيم جـدوى واسـتمرارية اسـتخدام الريـاح كمـورد للطاقـة المسـتدامة لتشـغيل منشـآت إمـدادات الميـاه فـي الـيمن. لتحقيـق هـذه الغايـة، سيتم تناول الأهداف التالية:

1) تقييم موارد الرياح في اليمن لنظام إمدادات المياه فيها.
2) البحـث فـي الحلـول الهجينـة لتلبيـة الطلـب عـلى الطاقـة لنظـام إمـدادات الميـاه في اليمن.
3) الوصول إلى السلامة المالية لأنظمة الطاقة المختلفة في اليمن.
4) تقييم تحديات ومخاطر تركيب توربينات الرياح في اليمن.
5) تنفيذ تقييم هيكلي لجدوى وقابلية استخدام توربينات الرياح في اليمن.
6) اقتراح أفضل مسار للعمل بناءاً على جميع تحليلاتنا الخاصة باليمن.

نظـراً للوضـع الأمنـي المتـدهور فـي الـيمن، تـم تنفيـذ المشـروع إلى حـد كبيـر كدراسـة مكتبيـة مـع مـدخلات مقدمـة مـن مـوظفي اليونيسـف المحليـين (اليمنيـين) واستشاري محلي.

3-2 التضاريس

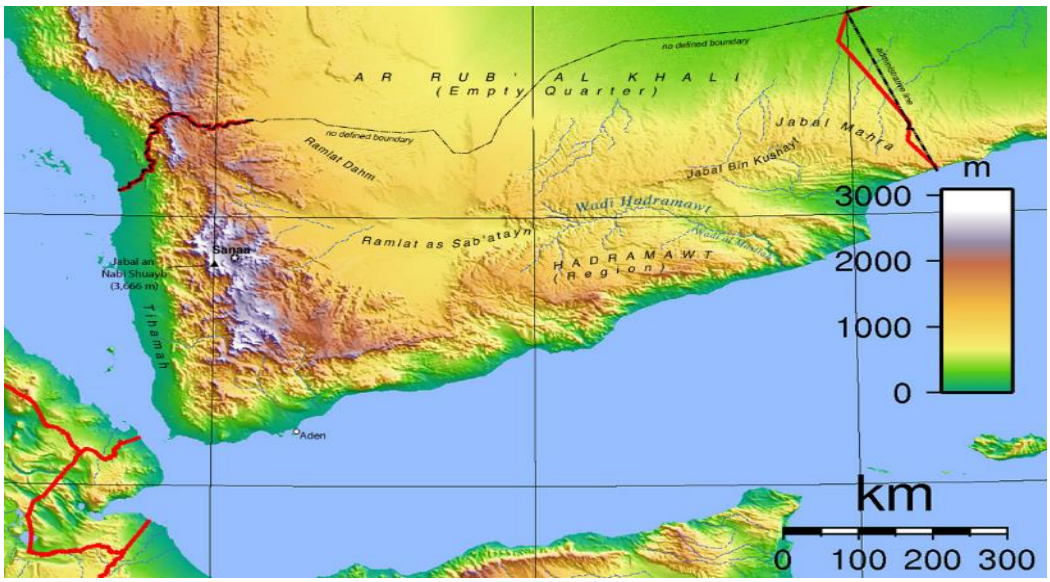
الـيمن، الواقعـة عـلى الطـرف الجنـوبي الشـرقي لشـبه الجزيـرة العربيـة، تشـترك فـي الحـدود مـع المملكـة العربيـة السـعودية مـن الشـمال وعُمـان مـن الشـرق. إلى الغـرب

يقع البحر الأحمر، ويربط مضيق باب المندب البحر الأحمر بخليج عدن. تتمتع اليمن بتضاريس متنوعة مع قمم متعرجة وهضاب قاحلة وسهول ساحلية ضيقة تهيمن عليها الجبال. تتميز المرتفعات الغربية بأراضٍ خصبة وهطول كميات كافية من الأمطار، بينما تتكون المرتفعات الوسطى من هضبة ذات مناخ أكثر جفافاً ولكن يظل هطول الأمطار فيها كافياً في السنوات الرطبة.

تهيمن صحراء الربع الخالي، وهي واحدة من أكبر الصحاري الرملية في العالم، على المنطقة الشمالية. في الشرق، تتلقى الهضاب مثل حضرموت كميات أقل بكثير من الأمطار وهي أكثر جفافاً. يشكل السهل الساحلي لعدن والمخا والحديدة شريطاً ضيقاً من الأراضي المسطحة المعروفة باسم تهامة والتي تقع بمحاذاة البحر الأحمر.

لا توجد أنهار دائمة في اليمن. بدلاً من ذلك، تنتشر الأودية في البلاد، وهي أودية جافة معرضة للسيول الجارفة في حالة حدوث عواصف ممطرة غزيرة. هذا التدفق المتقطع للمياه له تأثير كبير على الأراضي والتضاريس المحيطة (Nations Online، 2024).

شكل رقم 2-1: تضاريس اليمن (Nations Online، بدون تاريخ)



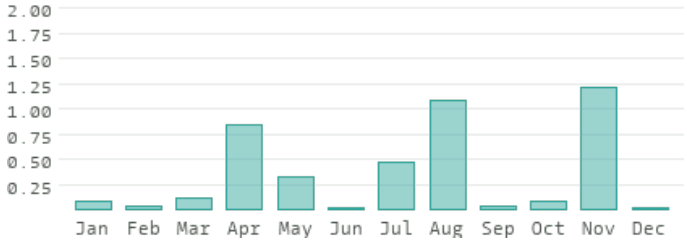
4-2 حالة إمدادات المياه

في هذا القسم، ستتم مناقشة شح المياه في اليمن، يليها نمط استهلاك المياه وحالة إمدادات المياه.

شح المياه

تعتبر اليمن واحدة من أكثر دول العالم حرماناً من المياه، حيث يفتقر أكثر من 50٪ من السكان إلى الوصول الكافي إلى المياه الآمنة والمرضية للاستخدام اليومي (هيومن رايتس ووتش، 2023). في عام 2019، بلغ إجمالي الإمدادات السنوية الحالية من المياه العذبة المتجددة لكل مواطن يمني في المتوسط 76 متر مكعب (البنك الدولي، 2014)، وهذا أقل بكثير من المستوى المعترف به الذي يبلغ 500 متر مكعب للفرد (دينغ، 2017).

شكل رقم 2-2: هطول الأمطار (مم / شهر) في اليمن (WorldData، 2023)

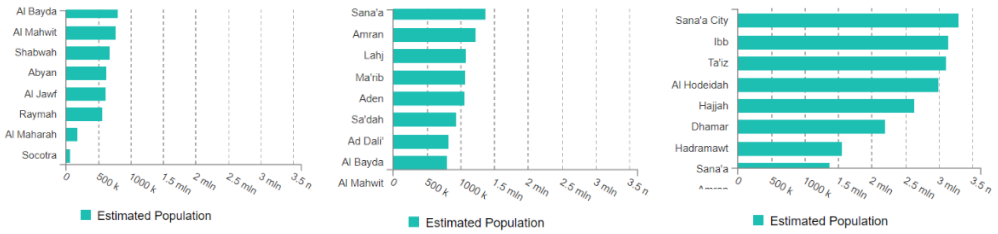


تعاني اليمن من الشـــح المادي للمياه بســـبب قلة هطول الأمطار والافتقار إلى الأنهار المتاحة باســـتمرار. الشـــكل 2-2 أعلاه يمثل بيانات هطول الأمطار المســـتقاة من ثلاث محطات مختلفة في السـنوات العشـرين الماضـية، مما يكشـف أن ثمانية من أصـل اثني عشـر شـهراً تشـهد مسـتويات أقل من 0.50 ملم من الأمطار (WorldData، 2023). مع ذلك، فإنه من الضروري الاعتراف بأن التحديات تمتد إلى ما هو أبعد من مجرد ندرة هطول الأمطار وعدم وجود أنهار؛ أيضـاً تعيق العقبات الاقتصـادية الناشـئة عن النزاعات إنشـاء وصـيانة البنية التحتية الأسـاسـية للمياه ("المشـرقي م.، 2013"، كما ورد في "نعمان أ.، 2019"). تسبب النزاع المستمر في إلحاق أضرار بمنشآت المياه الأساسية، مثل محطة تحلية المياه في تعز في عام 2016 (كليفورد وتريبرت، البنية التحتية للمياه في اليمن التي تعرضت للقصف: تحقيق من استخبارات المصادر المفتوحة، 2016)، ومحطة المياه في الحديدة في عام 2018 (فور، 2018)، وخزانات مدينة صعدة في عام 2022 (The Water Diplomat، 2022). هذا يعزز اعتماد الجمهور على مصـادر المياه الخاصـة الباهظة التكلفة أو محطات المياه المحدودة التي توفرها المنظمات غير الحكومية، مما يعيق بشـــكل أكبر الجهود الرامية إلى التخفيف من حدة أزمة المياه.

استهلاك المياه

أدى النمو السكاني السريع إلى زيادة الضغط على الموارد المائية المحدودة في اليمن بشكل كبير. يبلغ عدد السكان حالياً 29.3 مليون نسمة بمعدل نمو يبلغ 2.3٪ في السنة (نعمان أ.، 2019) مع ترتيب التوقعات للمحافظات لعام 2025 كما هو موضح في الشكل 2-3 أدناه.

شكل رقم 2-3: تعداد سكان المحافظات في اليمن (Nations Online، 2024).



يُخصص أقل من 15٪ من المياه الناتجة للاستهلاك المنزلي، ويُستفاد منها في المقام الأول لأغراض استخدامها كمياه صالحة للشرب. يتم توجيه الجزء الأكبر، حوالي 84٪، نحو الاحتياجات الزراعية، فيما يُخصص المتبقي للعمليات الصناعية والتعدينية (الوكالة الألمانية للتعاون الدولي، 2018).

على عكس الدول الأخرى التي تكفي فيها إمدادات المياه لتغطية الطلبات اليومية المتقلبة، فإن معظم المناطق في اليمن لا يتم ضخ المياه العذبة فيها إلا لعدة ساعات في اليوم. قد تكون هناك اختلافات كبيرة بين المحافظات فيما يتعلق بفترة ضخ المياه. في الحديدة، يمكن ضخ المياه لمدة 22 ساعة؛ بينما في لحج يقتصر ضخ المياه على 8 ساعات فقط. تعتمد هذه الاختلافات على توفر المياه أو الوقود أو مصادر الطاقة الأخرى وحالة منشأة المياه.

إمدادات المياه

تأتي إمدادات المياه الأساسية من المياه الجوفية من خلال الآبار والآبار الارتوازية، في حين أن 0.3٪ فقط من المياه تأتي من منشآت تحلية المياه في عدن. بسبب الاستغلال المكثف للمياه الجوفية، يتجاوز معدل النضوب معدل التجديد بحوالي 0.9 مليون متر مكعب (الوكالة الألمانية للتعاون الدولي، 2018). تشكل مياه الجريان السطحي والعيون في مناطق مستجمعات المياه المصادر الرئيسية لتغذية المياه الجوفية. يتم ضخ مياه معظم الآبار في اليمن باستخدام مولدات الديزل أو شبكة الكهرباء. الطريقة الأكثر شيوعاً لمعالجة المياه هي التعقيم.

شكل رقم 2-4: بناء آبار المياه الجوفية في اليمن (جيفرايت، 2014)

الوضع الحالي

لا يـزال اسـتهلاك الطاقـة فـي الـيمن لتلبيـة الطلـب عـلى الميـاه يتطلـب تحسـينات هائلــة، حيــث تعــد إمــداداتها مــن الطاقــة أحــد الجوانــب الرئيســية. يجــري حاليــاً استكشـاف الطاقـة الشمسـية لتشـغيل منشـآت إمـدادات الميـاه، غيـر أنـه لـم يـتم تنفيـذها بقـدر كـافٍ. تشـير البيانـات إلى أن الطاقـة الشمسـية تسـاهم حاليـاً بنسـبة 6-10٪ مـن الطلـب عـلى الطاقـة اللازمـة لضـخ الميـاه. حتـى الآن، يـتم اسـتخدام ألـواح الطاقــة الشمســية بقــوة 100 – 200 وات فــي المنــاطق الحضــرية، ويــتم اســتخدام ألواح الطاقة الشمسية بقوة أقل من 100 وات في المناطق الريفية.

تـتم تلبيــة غالبيــة الطلــب عــلى الطاقــة حاليــاً مــن خــلال الوقــود غيــر المتجــدد ممــا يجعلهـا باهظـة الـثمن ومتقطعـة عـلى نحـو مـا تـم توضـيحه سـابقاً. مـع ذلـك، وبسـبب اسـتنفاد الإمـدادات التقليديـة بسـبب التـوتر الإقليمـي والأضـرار التـي لحقـت بالبنيـة التحتيـة الناجمـة عـن أعمـال العنـف التـي طـال أمـدها، تعـاني الـيمن منـذ ذلـك الحـين من أزمة طاقة حادة.

فيمـا يتعلـق بالتسـعير، يبلـغ متوسـط تعرفـة الميـاه العامـة 210 ريـال يمنـي للمتـر المكعـب، فـي حـين أن الميـاه مـن المـوردين مـن القطـاع الخـاص تتطلـب سـعراً أعـلى بكثيــر، يتــراوح بــأكثر مــن 4 إلى 5 أضــعاف عنــد حــوالي 1,000 ريــال يمنــي للمتــر المكعـب. تتسـبب أزمـة الطاقـة عـلى النحـو المـذكور أعـلاه فـي تفـاقم الوضـع، ممـا يـؤدي إلى انقطـاع إمـدادات الطاقـة اللازمـة لإمـدادات الميـاه النظيفـة فـي العديـد مـن المنــاطق. نتيجــة لــذلك، تواجــه المحافظــات التــي تعــاني مــن انخفــاض تحصــيل

الرسـوم، مثـل ذمـار وصـنعاء وحجـة، صـعوبات متزايـدة فـي شـراء الوقـود، ممـا يـؤدي إلى انخفاض إنتاج المياه وإمداداتها (الوكالة الألمانية للتعاون الدولي، 2018).

3. نقاط البدء

قامت شـركة Witteveen+Bos بإجراء دراسـة مكتبية للمشـروع في اليمن، باسـتخدام البيانات المتوفرة والبيانات مفتوحة المصدر. امتدت الدراسة في الفترة من 1 يناير إلى 1 مايو 2024. مضى المشروع عبر سبع خطوات رئيسية، وهي:

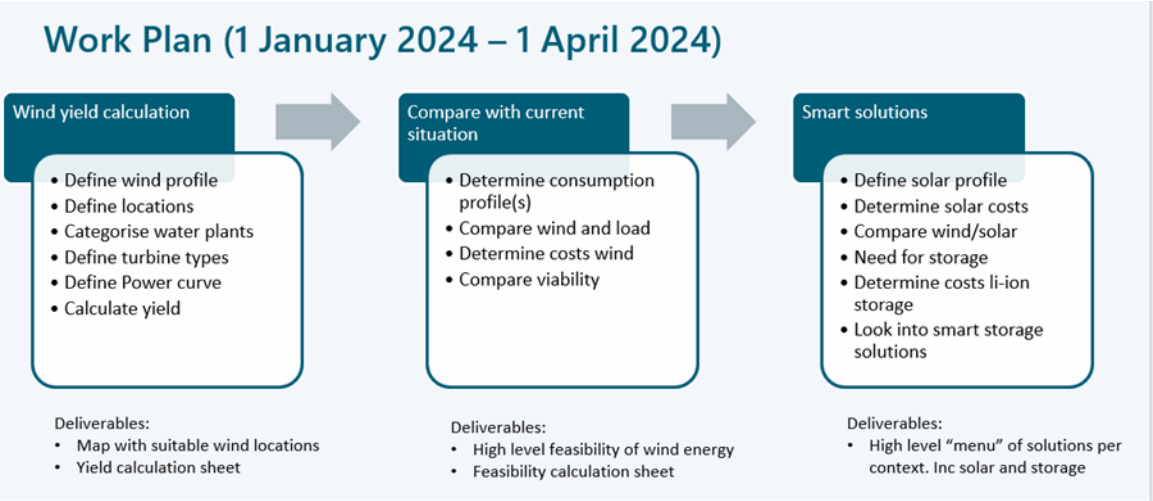
1) جمع بيانات المشروع
2) تطوير الأدوات
3) معالجة بيانات المشروع باستخدام الأدوات التي تم تطويرها
4) الحصول على الناتج ومضامينه
5) تحديد التحديات والمخاطر
6) تعميم حل الطاقة المتجددة
7) الاستنتاجات والتوصيات

تـم تطـوير أداة إكسـل لحسـاب العائـد اليـومي والسـنوي لمـوارد الريـاح فـي الـيمن، وكذلك لتقدير النموذج المالي بناءاً على البيانات التي تم جمعها.

تـم تحليـل نتـائج الأداة (الفصـل الفرعـي 3-1) لتقيـيم جـدوى اسـتخدام طاقـة الريـاح فـي الـيمن. بالإضـافة إلى ذلـك، تـم أيضـاً استكشـاف حلـول هجينـة أخـرى، مثـل الجمع بين حلول طاقة الرياح والطاقة الشمسية أو البطاريات.

ترد خطة العمل بمزيد من التفصيل في الشكل 3-1.

شكل رقم 3-1: خطة عمل المشروع



3-1 مصادر البيانات

لدعم المشروع، تتوفر ثلاثة مصادر بيانات مختلفة أثناء عملية تخطيط المشروع:

8) البيانات المقدمة من العميل
9) البيانات المقدمة من الاستشاري الفرعي المحلي
10) البيانات المأخوذة من مواقع البيانات مفتوحة المصدر الموثوقة

يرد في الجدول أدناه ملخص لجميع البيانات المستخدمة في هذا المشروع.

جدول رقم 3-1: مصادر البيانات ونوع البيانات التي تم جمعها

رقم	المصادر	نوع البيانات التي تم جمعها
1	العميل	- الطلب على الطاقة - حالة إمدادات الطاقة الحالية - حالة مصدر المياه الحالية
2	استشاري فرعي محلي	- مواقع منشآت المياه - التحقق من الطلب الحالي على الطاقة
3	مصادر موثوقة على شبكة الإنترنت	- بيانات الرياح والطاقة الشمسية - خريطة طبقات المياه الجوفية - البيانات التقنية والمالية

ملاحظات:

1) تم أخذ بيانات الرياح والطاقة الشمسية من البيانات الساتلية القائمة على شبكة الإنترنت والبيانات التاريخية.
2) بسبب النزاع الدائر في البلاد، فإن خريطة منشأة المياه تقريبية فقط ولا توضح الموقع الدقيق لمنشأة المياه.
3) تم أخذ البيانات التقنية والمالية من موقع الشركة المصنعة على شبكة الإنترنت والتقديرات الهندسية.

بيانات الطلب على الطاقة

في بداية المشروع، زودتنا اليونيسف بقائمة تضم 16 موقعاً لمنشآت المياه في 14 محافظة مختلفة. قمنا بعد ذلك بالتحقق من هذه البيانات الأولية مع استشاري فرعي محلي، والذي حصل على البيانات الثانوية التي يتم التحقق من معظمها من قبل سلطات

المياه في اليمن. هناك اختلافات في الاحتياجات من الطاقة وعدد الآبار بين المصـــدرين حيث تم جمع البيانات في ســـنوات مختلفة. البيانات المقدمة من العميل تعود إلى عام 2022، بينما البيانات المقدمة من الاســـتشـــاري الفرعي تم جمعها في عام 2024. لذلك، فإننا سوف نستخدم بيانات الاستشاري الفرعي في التحليل لأنها بيانات محدثة.

يـرد ملخـص البيانـات المقدمـة مـن الاستشـاري الفرعـي فـي الجـدول 3-2. تغطـي الاحتياجـات مـن الطاقـة كميـة الطاقـة الحاليـة اللازمـة لضـخ الميـاه مـن بئـر الميـاه الجوفيـة إلى خزانـات الميـاه أو مـن بئـر الميـاه الجوفيـة إلى الخـزان وإلى الشـبكة اعتمـاداً عـلى المواقـع. إلى جانـب الاحتياجـات مـن الطاقـة، قمنـا أيضـاً بعـرض عـدد الآبـار فـي كـل منشـأة ميـاه. تـوفر نسـخة الاستشـاري الفرعـي تفصـيلاً لمنشـآت المياه؛ بما في ذلك العدد الإجمالي للآبار العاملة.

هنـاك اسـتثناء لتعـز والمخـا، حيـث أن الوضـع السياسـي الآن حـرج للغايـة والتواصـل مـع سـلطات الميـاه مقيـد بشـدة. لـذلك، تـم جمـع البيانـات مـن تقريـر عـام 2020. أيضـاً، تـم تقـديم ملاحظـة خاصـة فـي محافظـة لحـج. لا توجـد بيانـات متاحـة عـلى وجـه التحديـد لمنشـأة الميـاه، والاحتياجـات مـن الطاقـة المتاحـة (2,000 كيلـووات) مخصصة لجميع مناطق فرع لحج.

جدول رقم 3-2: ملخص المعلومات المقدمة من الاستشاري الفرعي المحلي لكل منشأة من منشآت المياه

رقم	المحافظة	منشأة المياه	بيانات الاستشاري الفرعي (عام 2024)	
			العدد التقريبي للآبار العاملة	الاحتياجات من الطاقة غير المتجددة (كيلووات)
1	صعدة	تلمص	5	480
2	صنعاء	حقل مياه جبل نقم شرق مدينة صنعاء	31	1524
3	صنعاء	جبل تلال الريان – حقل مياه عطان جنوب مدينة صنعاء	20	1931
4	عمران	الحقل الشرقي	7	675
5	الحديدة	الحقل الكوري والهولندي	13	1600
6	تعز	المدينة	20	2320
7	تعز	حقل آبار الطبيلية	4	120
8	عدن	حقل آبار المناصرة	12	331
9	عدن	حقل آبار مياه بير أحمد	42	4769
10	عدن	حقل آبار مياه بير ناصر	46	2708
11	لحج	حقل وادي بنا	5	2000

رقم	المحافظة	منشأة المياه	بيانات الاستشاري الفرعي (عام 2024)	
			العدد التقريبي للآبار العاملة	الاحتياجات من الطاقة غير المتجددة (كيلووات)
12	حضرموت	حقل موشاه	5	500
13	أبين	حقل زنجبار	11	500
14	ذمار	حقل المدينة	15	405
15	إب	جبل أرياب	3	88
16	إب	شبان	3	2000
المتوسط			-	**1372**

استناداً إلى هذه البيانات، تم وضع الافتراضات التالية:

- لا توجد علاقة خطية بين عدد الآبار والطلب على الطاقة لكل منشأة مياه. أحد الأسباب هو المكونات الكهربائية المختلفة (مثل مضخات المياه ونظام النقل ونظام التوزيع ومنشأة التعقيم) والمناطق المدرجة في حساب الاحتياجات من الطاقة من قبل سلطات المياه.
- الطلب على الطاقة يمثل الطاقة المطلوبة لتشغيل كل منشأة مياه كل ساعة.
- البيانات متعلقة بسنة محددة، لذلك قد تكون هناك تغييرات في الطلب، إلى جانب احتمال أن تكون بعض الآبار غير عاملة.
- يُفترض أن الطلب على الطاقة ثابتاً، وإن كان ذلك غير واقعي بسبب عدم وجود بيانات حول تقلب الطلب.

مواقع منشآت المياه

جمع الاستشاري الفرعي بيانات مواقع منشآت المياه من السلطات المحلية للمياه. سيتم اســتخدام بيانات هذه المواقع لتحديد مواقع توربينات الرياح المحتملة. نظراً لمحدودية البيانات المتاحة وقيود السياسات في اليمن، لم يتمكن الاستشاري الفرعي من الإفصاح عن الموقع الدقيق للآبار (خط العرض وخط الطول)، بل قدم خرائط تم جمعها عند توفرها.

لأغــراض اختيــار المنــاطق المحتملــة لتركيــب توربينــات الريــاح، تســتخدم هــذه الدراسـة تقريـب تقريبـي فقـط مـن جوجـل إيـرث (Google Earth) إلى جانـب أطلـس الرياح العالمي.

يعـرض الشـكل 3-2 لمحـة عامـة عـن منشـآت الميـاه المختـارة مـع إبرازهـا بـدبابيس أو مناطق صفراء. عندما لا تتوفر مواقع الآبار، يتم تحديدها في مدينة أو قرية.

شكل رقم 3-2: لمحة عامة عن منشآت المياه المختارة في جميع أنحاء اليمن

خريطة طبقات المياه الجوفية من تقرير فني

تم الحصول على بيانات طبقات المياه الجوفية من خريطة طبقات المياه الجوفية المتضمنة في تقرير فني متاح عبر الإنترنت (غن، 1995). على الرغم من أن هذه البيانات قديمة جداً، إلا أنه لا توجد معلومات جديدة أخرى ذات مصدر مفصل تغطي جميع طبقات المياه الجوفية في اليمن يمكن الوصول إليها عبر الإنترنت. من المهم معرفة أنه نظراً لكون المسوحات الميدانية المباشرة أكثر صعوبة وتكلفة، فإن رسم خرائط طبقات المياه الجوفية يعتمد بشكل كبير على المعرفة العلمية في ذلك الوقت ويمكن أن تكون غير موضوعية (غن، 1995)، وبالتالي ستكون هناك حاجة إلى دراسة أكثر شمولاً إذا كانت هناك حاجة إلى نتيجة أكثر واقعية ودقة. يبسّط هذا المشروع نوع طبقات المياه الجوفية الممثلة في الخريطة الأصلية ويستخرج فقط طبقات المياه الجوفية عالية الإنتاجية وطبقات المياه الجوفية المتراكبة والمياه الجوفية المالحة / القليلة الملوحة لتكون ثلاث وسائل إيضاح مميزة كما هو موضح في الشكل 5-1 والشكل 5-2 والشكل 5-3. تم تمثيل طبقات المياه الجوفية عالية الإنتاجية في هذه الدراسة "كطبقات مياه جوفية محتملة"، حيث يُفترض أنها تتمتع بحجم أكبر أو نفاذية مواتية.

بيانات الرياح من أطلس الرياح العالمي

بيانات الرياح من أطلس الرياح العالمي تم الحصول عليها من شركة فورتكس، وهي شركة متخصصة في تقييم موارد الرياح، في حين تم دعم النمذجة من قبل خبير الرياح في جامعة الدانمارك التقنية. تم الحصول على البيانات السنوية وبيانات مؤشر الرياح من هنا للتقييم السنوي. كان نوع البيانات المأخوذة من أطلس الرياح العالمي هو سرعة الرياح الشهرية لجميع المواقع المختارة وتمت تكملتها ببيانات مؤشر الرياح.

بيانات الطاقة الشمسية من أطلس الطاقة الشمسية العالمي

بيانات الطاقة الشمسية من أطلس الطاقة الشمسية العالمي تم الحصول عليها من مجموعة من عمليات الرصد الساتلي والقياسات الأرضية والنمذجة العددية. كان نوع البيانات المأخوذة من أطلس الطاقة الشمسية العالمي هو الإشعاع الشمسي الشهري وتم دعمها بخريطة الحرارة الشمسية للعام بأكمله.

بيانات الرياح والطاقة الشمسية من وكالة ناسا

بيانات الرياح والطاقة الشمسية من عارض بيانات الوصول إلى الطاقة الخاص بوكالة ناسا تم الحصول عليها من بيانات الجو العلوي والتي تحتوي على معلومات من المسابير اللاسلكية (الارتفاع ودرجة الحرارة والرياح والرطوبة) وأجهزة دروبسوند والمناطيد الكشافة ورياح الطائرات. تُستخدم المنهجية المتبعة للحصول على البيانات لأغراض النمذجة كل ساعة. كان نوع البيانات المأخوذة من موقع ناسا على شبكة الإنترنت هو بيانات الرياح والطاقة الشمسية لكل ساعة لمدة عام.

مقارنة بين البيانات المأخوذة من أطلس الرياح العالمي ووكالة ناسا

تـوفر البيانـات المـأخوذة مـن أطلـس الريـاح العـالمي معيـاراً عالميـاً للريـاح ومتوسـط نمذجـة مـوارد الريـاح. مـع ذلـك، ونظـراً لأن أطلـس الريـاح العـالمي لا يسـتخدم صـور الأقمـار الصـناعية المباشـرة، فـإن البيانـات المـأخوذة مـن أطلـس الريـاح العـالمي قـد لا تكـون دقيقـة مثـل البيانـات المـأخوذة مـن عـارض بيانـات الوصـول إلى الطاقـة الخـاص بوكالـة ناسـا. تـم اسـتخدام البيانـات المـأخوذة مـن أطلـس الريـاح العـالمي بشـكل متكـرر فـي هـذه الدراسـة لأنهـا تفاعليـة بـالألوان وسـهلة الفهـم مـن قبـل القـارئ غيـر الفنـي. عـلى عكـس بيانـات وكالـة ناسـا حيـث يمكـن أن يصـل القيـاس إلى أسـاس كـل سـاعة ويرجـع تاريخـه إلى مـا قبـل 20 عامـاً، وهـو أمـر مفيـد جـداً لنمذجـة البيانـات التـي لـن يـتم عرضـها عـلى نطـاق واسـع فـي هـذا التقريـر. ينبغـي أن تكـون البيانـات التـي تـم الحصـول عليهـا مـن أطلـس الريـاح العـالمي ووكالـة ناسـا فـي نفـس العـام، حيـث أن أحـدث ملخـص للبيانـات مـن أطلـس الريـاح العـالمي يعـود لعـام 2022، كما تم الحصول على بيانات الطقس من وكالة ناسا لعام 2022.

2-3 أداة طاقة الرياح

لكـل موقـع مـن مواقـع إمـدادات الميـاه خصـائص الريـاح الخاصـة بـه (القـوة والاختلافـات اليوميـة والموسـمية) بالإضـافة إلى الاحتياجـات مـن الطاقـة. أيضـاً، هنـاك حلـول عديـدة ممكنـة لكـل موقـع (الاخـتلاف فـي أنـواع التوربينـات وخيـارات البطاريـات). تـم تطـوير "أداة طاقـة الريـاح" مـن أجـل تقيـيم أفضـل الحلـول التـي تتوافـق مـع الظـروف المحليـة والاحتياجـات مـن الطاقـة. لمقارنـة خيـارات طاقـة

الريـاح بخيـارات الطاقـة الشمسـية، تـم أيضـاً تضـمين حسـابات الطاقـة الشمسـية في أداة طاقة الرياح.

تـم تطـوير أداة طاقـة الريـاح باسـتخدام ميكروسـوفت إكسـل. يبـين النـاتج كميـة الطاقـة المولـدة مـن المؤشـرات المخصصـة بالإضـافة إلى المخرجـات الماليـة مثـل التكلفـة المسـتوية للطاقـة والتـدفق النقـدي لأخـذها فـي الحسـبان فـي دراسـة الجـدوى. تـم عـرض لوحـة معلومـات الأداة والنتـائج لكـل محطـة إمـداد بالميـاه فـي الملحق الأول.

3-3الإفتراضات

نظـراً لبسـاطة الحسـاب ونقـص المعلومـات، فـإن هنـاك العديـد مـن الافتراضـات الجوهريـة فيمـا يتعلـق ببيانـات الإدخـال عنـد اسـتخدام أداة إكسـل. تـم وضـع الافتراضات لتلبية احتياجات حساب عائد الطاقة وحساب النموذج المالي.

3-3-1إفتراضات عائد الطاقة

- البيانـات المدخلـة المسـتخدمة هـي متوسـط بيانـات الأقمـار الصـناعية ونمـاذج الطقـس عـلى المـدى الطويـل. بالتـالي، فإنهـا سـتُظهر العائـد الـذي يمكـن توقعـه بنـاءاً عـلى متوسـط القـيم عـلى المـدى الطويـل. لا تؤخـذ تقلبـات الطقـس اليومية أو الأسبوعية في الاعتبار.

- بيانات الرياح المدخلة هي بيانات الأقمار الصناعية رفيعة المستوى. من أجل إجراء حساب دقيق لدراسة الجدوى، فإنه يلزم إجراء قياسات على الأرض. يمكن استخدام النتائج في هذه الورقة كمؤشر على ما إذا كان النظام الهجين من طاقة الرياح والطاقة الشمسية يمكن أن يكون حلاً للقيام بمزيد من التحري في المنطقة المعينة.
- لا تؤخذ كثافة الهواء في الاعتبار في هذا الحساب. قد ينتج عن هذا خطأ بنسبة مئوية ضئيلة في العائد.
- يُفترض أن الطلب على الطاقة من منشآت المياه ثابت على مدار 24 ساعة طوال العام.
- من المهم ملاحظة أننا لا نأخذ في الاعتبار وقت بدء التشغيل ونفحص كل ساعة على حدة لتحديد ما إذا كان الطلب قد تمت تلبيته.
- استندت حسابات عائد الطاقة إلى نظام خارج الشبكة.
- تم أخذ نسبة 15٪ من الفاقد من طاقة الرياح في الاعتبار لجميع التوربينات.
- تم أخذ نسبة 20٪ من كفاءة عائد الطاقة الشمسية في الاعتبار.
- تم أخذ نسبة 80٪ من كفاءة المضخة في الاعتبار لتقدير كمية المياه التي يتم ضخها في الساعة.
- تستند افتراضات موارد الرياح (العائد الإجمالي، فاقد الطاقة، التوافر، الموسمية) إلى إجمالي إنتاج الطاقة لتوربين واحد مختار.

- تستند افتراضات موارد الطاقة الشمسية (العائد الإجمالي، الكفاءة، التوافر، الموسمية) إلى إجمالي إنتاج الطاقة لعدد الألواح مختار ونوع اللوحة.
- تم تحديد قدرة البطارية بقدرة قصوى تبلغ 2.5 ميجاوات.
- من المفترض أن يكون خزان المياه بسعة 5,000 متر مكعب، مع أنبوب بطول 100 متر وارتفاع 12 متر وقطر 250 مم ومعدل تدفق 106.4 متر مكعب/ساعة.

2-3-3 افتراضات النموذج المالي

- من المفترض أن تكون فترة البناء سنة واحدة.
- من المفترض أن تكون فترة التشغيل 20 النفقات الرأسمالية لتوربينات متعددة.
- يُفترض أن تكون النفقات التشغيلية السنوية نسبة مئوية من النفقات الرأسمالية اعتماداً على التكنولوجيا مع زيادة سنوية بنسبة 5٪.
- يعتمد سعر الطاقة على تكلفة توليد الطاقة المحلية باستخدام مولدات الديزل. من المفترض أنه يمكن استهلاك أو بيع كل الطاقة المنتجة بهذا السعر. فيما يتعلق بالتوربينات الأكبر حجماً على وجه الخصوص، قد يؤدي هذا إلى تقدير مرتفع للإيرادات.
- بالمثل، كانت التكلفة المستوية للطاقة المبينة أعلاه هي الحساب النظري حيث تم بيع كل الطاقة المنتجة. من الناحية العملية، فإن الطاقة

المستهلكة من قبل الجمهور هي فقط التي يتم احتسابها كإيرادات، نظراً لأن مزيج الطاقة الأخير في اليمن لا يزال يخضع لهيمنة الطاقة غير المتجددة مثل الوقود الأحفوري. إذا تم تنفيذ طاقة الرياح بشكل أكبر في اليمن، فقد يحدث تحول في مجال الطاقة ويؤثر على التدفقات النقدية العامة بما في ذلك ارتفاع التكلفة المستوية للطاقة. ينطبق التنويه أيضاً على جميع تفاصيل مزيج الطاقة في الملحق.

- لا يشير التدفق النقدي المحتسب إلى الأموال المتحصلة، بل الأموال المدخرة.
- لا يؤخذ التضخم في الاعتبار.

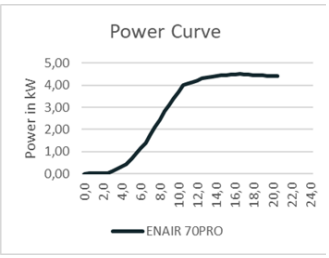
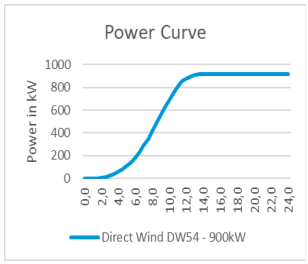
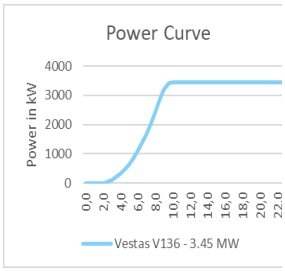
في الفصل التالي، سنتطرق إلى دراسة تكنولوجيا توربينات الرياح ومواصفاتها.

4. تكنولوجيا توربينات الرياح

4-1 تكنولوجيا التوربينات

في هذا الفصل، يتحول تركيزنا نحو تكنولوجيا التوربينات، وتحديداً استكشاف أنواع التوربينات المختلفة التي تم النظر فيها بعناية لأغراض مشروعنا. تم جمع مواصفات التوربينات المختارة من الشركات المصنعة. اخترنا ثلاثة توربينات مختلفة بارتفاعات مختلفة للمحور، تم اختيارها بشكل استراتيجي لالتقاط الرياح على ارتفاعات مختلفة. يقدم الجدول رقم 4-1 لمحة عامة شاملة عن التوربينات قيد الدراسة، حيث يوفر كل منها مزايا فريدة لمشروعنا.

جدول رقم 4-1: أنواع التوربينات

الفئة	توربين صغير	توربين متوسط	توربين كبير
ارتفاع المحور	10 متر	50 متر	100 متر
النوع	E70 Pro Enair	Direct Wind DW54	Vestas V136
الطاقة القصوى (كيلووات)	5.5	900	3450
نطاق السرعة	8 – 12 م/ث	5.5 – 7.5 م/ث	6 – 8.5 م/ث
الموقع الإلكتروني	https://www.enair.es/en/small-wind-turbines/e70pro	https://ewtdirectwind.com/products/dw54/	https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-3-45-MW
منحنى الطاقة			

2-4 منحنى الطاقة

يوضح منحنى الطاقة لتوربين الرياح مقدار الطاقة الكهربائية التي يمكن للتوربين توليدها عند سرعات رياح مختلفة. إنه مثل رسم بياني يوضح كفاءة تحويل طاقة الرياح إلى كهرباء. في الرسم البياني، يمثل المحور السيني (x) سرعة الرياح (تقاس بالمتر في الثانية أو الميل في الساعة)، بينما يمثل المحور الصادي (y) طاقة التوربين الناتجة (بالكيلووات). يزداد إنتاج توربينات الرياح مع سرعات الرياح التي تتبع منحنى رياح محدد يسمى منحنى الطاقة. كما نرى من منحنيات الطاقة، عند السرعات المنخفضة (أقل من 6 م/ث)، يتم توليد القليل من الطاقة أو لا يتم توليدها على الإطلاق. مع زيادة سرعة الرياح، من 6 م/ث إلى 13 م/ث، تزداد أيضاً الطاقة الناتجة بشكل كبير. أخيراً، بعد 13 م/ث، يستقر إنتاج الطاقة. هذه علاقة نموذجية بين سرعة الرياح وطاقة التوربين الناتجة.

في هذا التقرير، تستند النتائج التي تم الحصول عليها إلى استخدام توربينات Vestas V136 حيث يبلغ ارتفاع محورها 100 متر. يستند الأساس المنطقي لتعميم التوربينات الكبيرة إلى توافر موارد الرياح في اليمن والتي سيتم شرحها بمزيد من التفصيل في الفصل التالي.

3-4 أنظمة ضخ المياه بطاقة الرياح

توربينات الرياح التي تضـــخ المياه تقوم بضـــخ المياه من الآبار والبرك والآبار الارتوازية لأغراض مياه الشرب وأنظمة الري الصغيرة وأحواض الملح وتربية الأسماك وما إلى ذلك. هناك نوعان رئيسـيان، وهما توربينات الدفع المباشـر وتوربينات التروس. التوربين الأكثر اسـتخداماً له محور أفقي دوار بقطر 3 – 5.5 متر، مع 12 – 24 شـفرة مثبتة أعلى برج من الفولاذ الخفيف بارتفاع 10 – 20 متر. يتم ربط الدوار بمضخة ترددية قطرها 50 – 150 مم من خلال ذراع توصيل.

تبـدأ هـذه التوربينـات فـي رفـع الميـاه عنـدما تقتـرب سـرعة الريـاح مـن 8 – 10 كيلـومتر فـي السـاعة. فـي العـادة، يكـون التـوربين قـادراً عـلى ضـخ الميـاه بمعـدل يتـراوح مـا بـين 1,000 – 8,000 لتـر فـي السـاعة، اعتمـادًا عـلى سـرعة الريـاح وعمـق منسـوب الميـاه ونـوع التـوربين. تسـتطيع التوربينـات ضـخ الميـاه مـن أعمـاق تصـل إلى 60 متراً.

تتمتـع توربينـات ضـخ الميـاه بميـزة عـدم الحاجـة إلى الوقـود لتشـغيلها، وبالتـالي يمكـن تركيبهـا فـي المنـاطق النائيـة التـي تكثـر فيهـا الريـاح حيـث لا يمكـن اسـتخدام وسـائل ضـخ الميـاه التقليديـة الأخـرى. مـع ذلـك، فـإن توربينـات ضـخ الميـاه لهـا حـدود أيضـاً. لا يمكـن تشـغيلها بشـكل مـرضٍ إلا فـي أنظمـة الريـاح المتوسـطة (12 – 18 كـم فـي السـاعة). عـلاوة عـلى ذلـك، هنـاك حاجـة إلى عنايـة خاصـة فـي وقـت اختيـار الموقـع؛ حيـث يجـب أن تكـون المواقـع خاليـة مـن العوائـق مثـل المبـاني والأشـجار في المناطق المحيطة.

تكلفة النظام التي تتراوح ما بين 5,000 – 10,000 دولار أمريكي تجعل هذا الحل مثيرًا للاهتمام للاستخدام الجماعي (القرى الريفية النائية). سوف يضخ التوربين الماء فقط من البئر إلى خزان أو صهريج. لا يقوم التوربين بتشغيل نظام لإمدادات المياه.

شكل رقم 4-1: نظام ضخ المياه باستخدام طاقة الرياح

5. لمحة عامة عن موارد الرياح

يبدأ هذا الفصل بتقييم أولي لسرعات الرياح وتقلباتها في كل موقع من هذه المواقع لتحديد مدى ملاءمتها لتركيب توربينات الرياح. الهدف الرئيسي هو تحديد المواقع التي توفر ظروفاً مواتية لتوربينات طاقة الرياح. سننظر في التباين المكاني للرياح في اليمن إلى جانب توزيعها على المواقع البالغ عددها 14 موقع. كما نقوم بفحص التباين الزماني لسرعات الرياح في هذه المواقع والموارد المائية في كل موقع. من خلال أخذ كل هذه العوامل في الاعتبار، نقوم بتصنيف المواقع

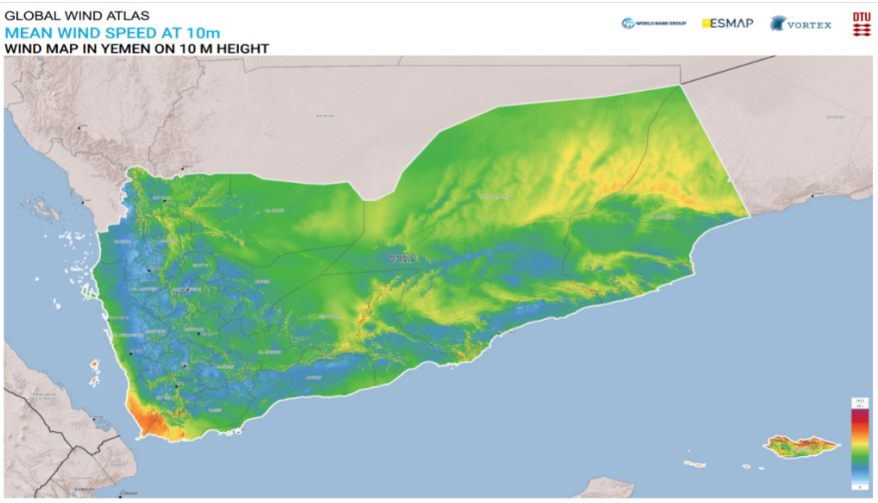
البـالغ عـددها 14 موقـع مـن الأفضـل إلى الأقـل مـن حيـث الإمكانـات فيمـا يتعلـق بطاقة الرياح.

5-1 خريطة الرياح في اليمن

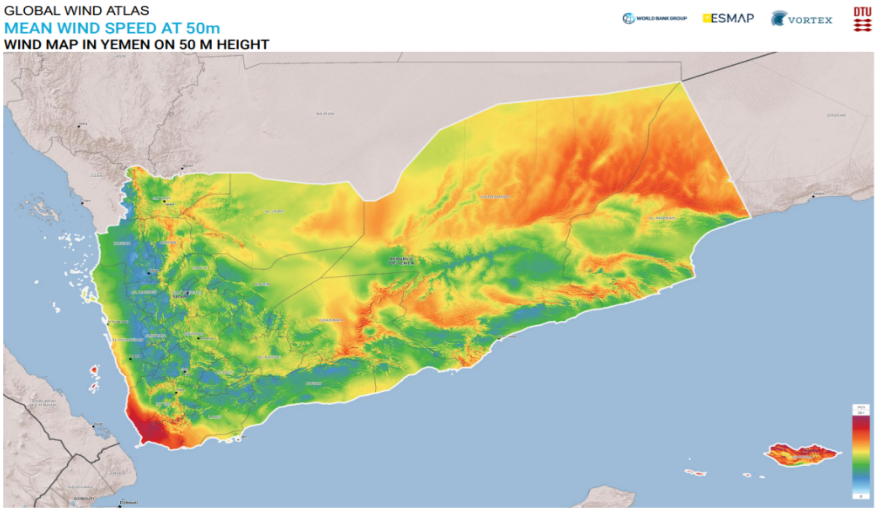
يوضـح الشـكل 5-1 والشـكل 5-2 والشـكل 5-3 خصـائص سـرعة الريـاح فـي جميـع أنحـاء الـيمن عـلى ارتفـاع 10 متـر و 50 متـر و 100 متـر عـلى التـوالي. المنـاطق المحـددة بـاللون الأحمـر والبرتقـالي والأصـفر (الـداكن) هـي منـاطق يحتمـل أن تكـون بهـا سـرعات ريـاح كافيـة لتوربينـات الريـاح (سـرعات ريـاح تزيـد عـن 6 – 7 متـر فـي الثانيـة). المنـاطق المحـددة بـاللون الأزرق والأخضـر هـي منـاطق ذات سـرعة ريـاح غير كافية.

ملاحظـة: هـذه تمثـل متوسـط السـرعات السـنوية. فـي معظـم المواقـع يمكـن ملاحظـة تباين يومي وموسمي، وأحياناً مع فترات طويلة من الرياح غير الكافية.

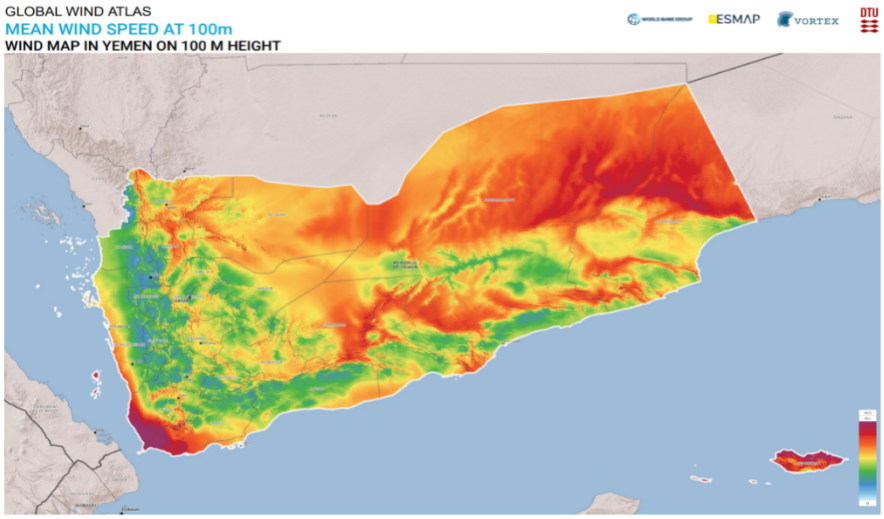
شكل رقم 5-1: خريطة الرياح في اليمن على ارتفاع 10 متر (أطلس الرياح العالمي، 2024)



شكل رقم 5-2: خريطة الرياح في اليمن على ارتفاع 50 متر (أطلس الرياح العالمي، 2024)



شكل رقم 5-3: خريطة الرياح في اليمن على ارتفاع 100 متر (أطلس الرياح العالمي، 2024)



النتائج الرئيسية

من بين الارتفاعات الثلاثة المختلفة، يبلغ أدنى متوسط لسرعة الرياح حوالي 5 متر/ثانية وهو على ارتفاع 10 أمتار. متوسط سرعة الرياح هذا أقل من سرعة الرياح المحددة اللازمة لإنتاج طاقة كبيرة من التوربين. على ارتفاع 50 متر، يزداد متوسط سرعة الرياح إلى حوالي 7 متر في الثانية، مما يجعل إنتاج طاقة الرياح ممكناً، ومع ذلك، لا يزال هذا ليس الخيار الأكثر قابلية للتطبيق. على ارتفاع 100 متر، يبلغ متوسط سرعة الرياح حوالي 8 متر/ثانية وهو الخيار الأفضل لارتفاع توربينات الرياح من بين الخيارات الأخرى. لذلك، سيركز هذا التقرير بشكل أساسي على سرعات الرياح على ارتفاع 100 متر مع التحقق سريعاً من جدوى تطبيق ذلك على ارتفاعات أخرى.

2-5 توزيع الرياح

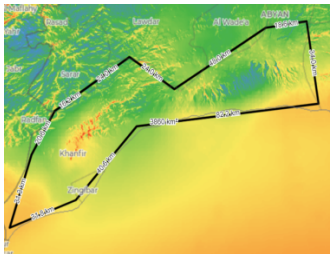
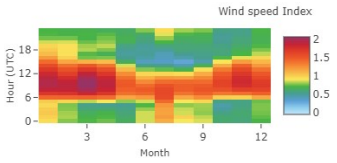
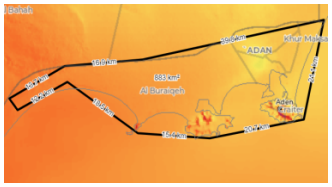
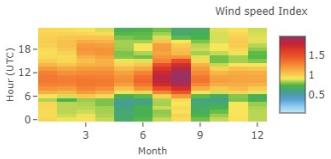
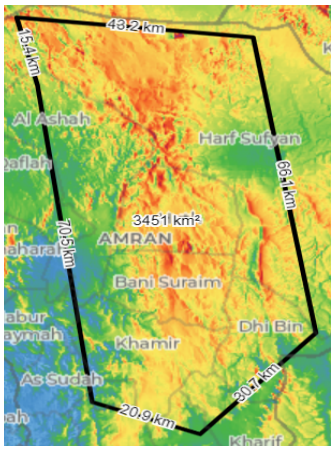
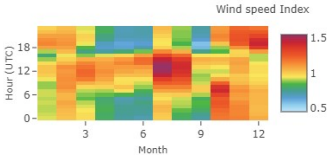
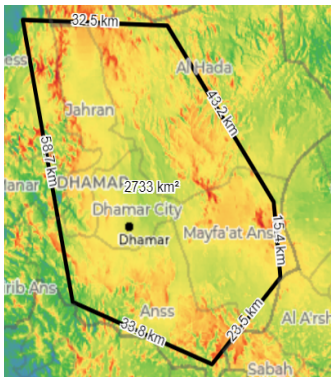
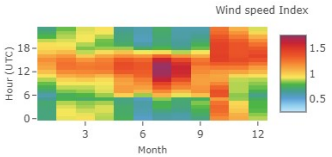
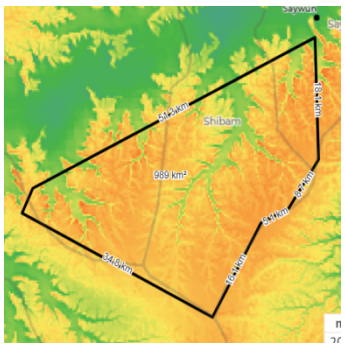
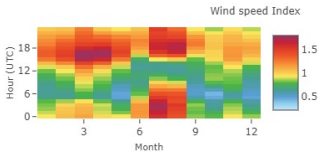
استناداً إلى الشكل 5-3 الذي يمثل سرعات الرياح على ارتفاع 100 متر، تميل المناطق الجنوبية الغربية والشمالية الشرقية إلى أن يكون متوسط سرعات الرياح فيها أعلى من وسط اليمن. يركز هذا القسم على التباين المكاني والزماني السنوي لسرعات الرياح لكل موقع باستخدام الخرائط الحرارية، والتي تم تلخيصها في الجدول رقم 5-1.

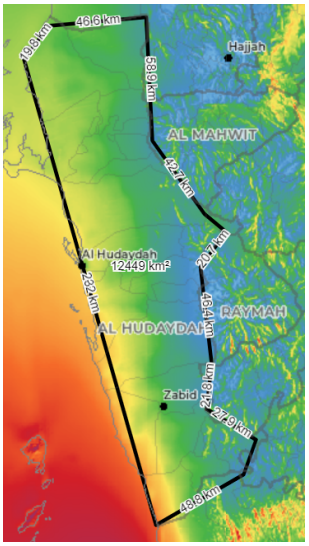
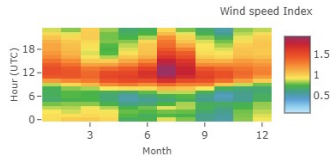
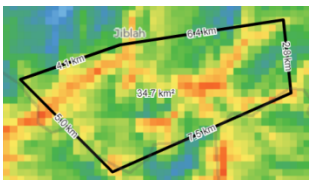
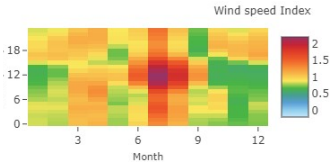
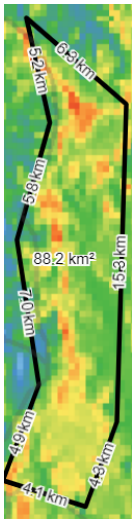
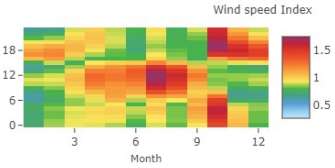
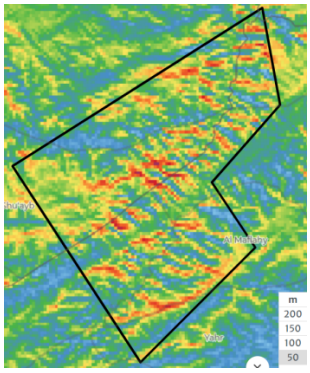
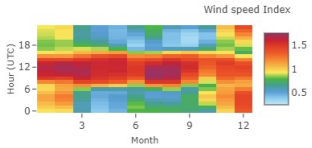
استند تحديد المنطقة المختارة إلى تقديرات الفريق بشأن أقرب مسافة إلى المجتمع وخريطة المياه، والذي سيتم شرحه لاحقاً.

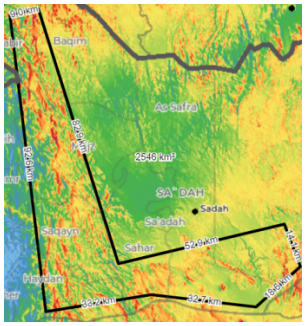
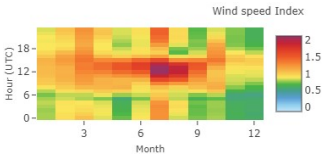
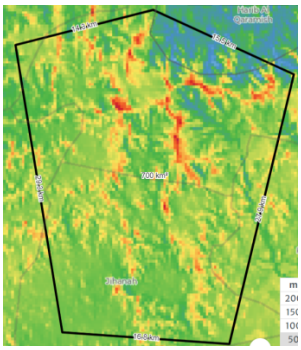
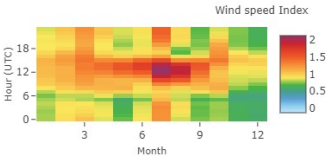
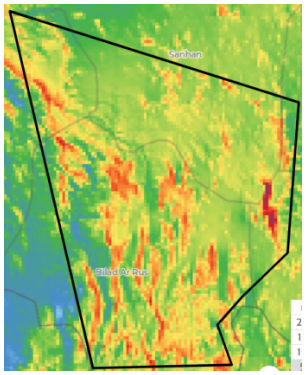
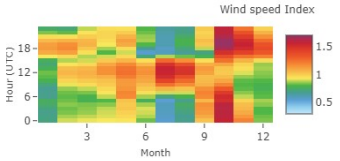
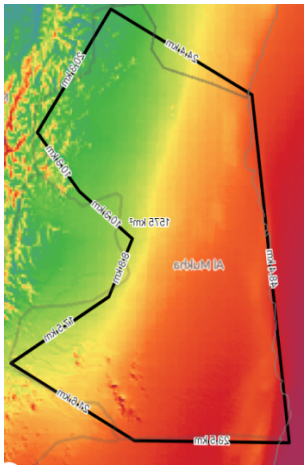
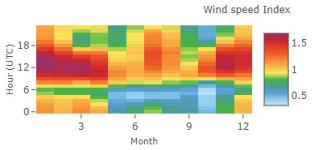
يبين الجدول أدناه الخصائص الرئيسية للمناطق البالغ عددها 14 منطقة. يوضح عمود "التباين المكاني للرياح" متوسط سرعات الرياح في منطقة مختارة (كلما كان اللون ضارباً إلى الأحمر الداكن، كلما كانت ظروف الرياح أفضل). يوضح عمود "التباين الزماني السنوي" التباين على مدار العام (المحور الأفقي) واليوم (المحور الرأسي، 24 ساعة). تشير الألوان بالأحمر والبرتقالي والأصفر الداكن إلى رياح قوية، بينما تشير الألوان بالأخضر والأزرق إلى ظروف رياح سيئة.

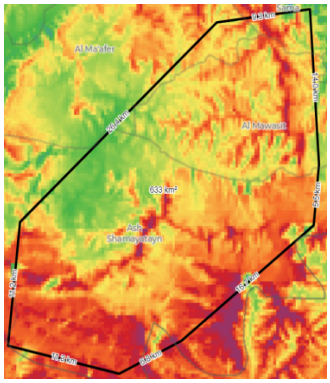
جدول رقم 5-1: خصائص الرياح وتقلباتها (أطلس الرياح العالمي، 2024)

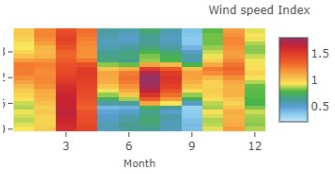
رقم	الموقع	التباين المكاني للرياح (100 متر)	متوسط السرعة (متر/ثانية)	التباين الزماني السنوي (100 متر)

1	أبين		5.75	
2	عدن		6.77	
3	عمران		7.81	
4	ذمار		6.45	
5	حضرموت		6.39	

6	الحديدة		6.5	
7	إب – جبلة		6.67	
8	إب – اليمن		6.66	
9	لحج		7.27	

10	صعدة		7.93	
11	شرق صنعاء		6.73	
12	جنوب صنعاء		7.42	
13	تعز – المخا		9.53	

14	تعز – المدينة		8.58

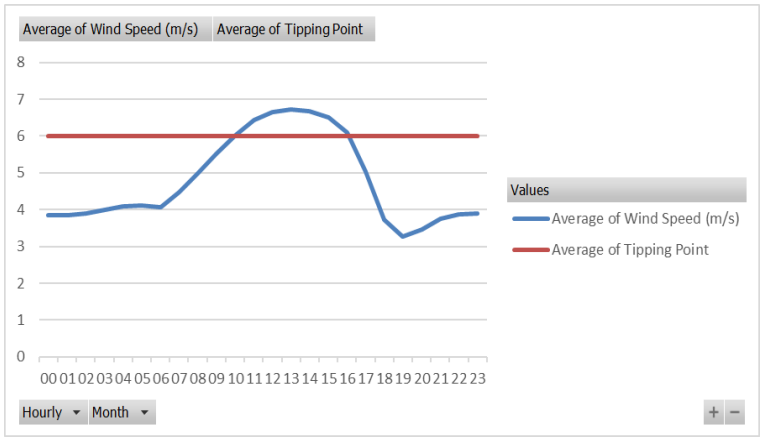
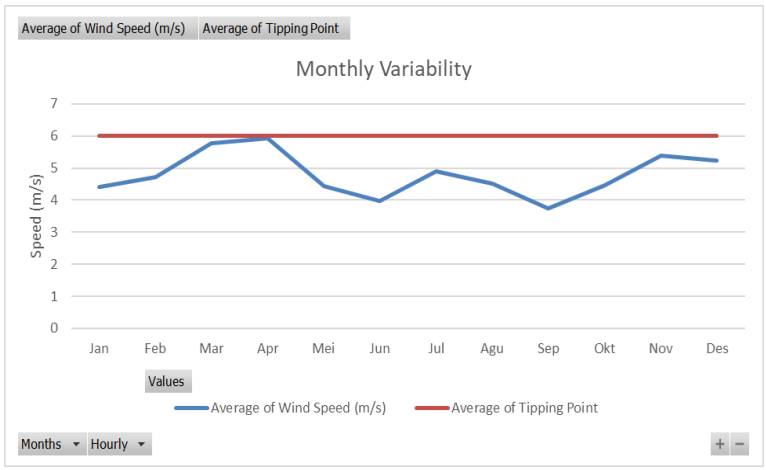


النتائج الرئيسية

كما هو متوقع، تتمتع المواقع في المنطقة الجنوبية الغربية من اليمن بأعلى متوسط لسرعات الرياح، بما في ذلك مدينة تعز، وتعز – المخا، وعدن والحديدة. بقية البلاد توجد فيها مواقع ذات سرعات رياح معتدلة إلى منخفضة. من الناحية الزمانية، تتمتع جميع المواقع البالغ عددها 14 موقع بأعلى سرعات رياح في منتصف العام، وخاصة من يونيو إلى أغسطس. خلال معظم الأشهر، تكون سرعات الرياح أعلى أثناء النهار وأقل في الليل.

يبين الجدول رقم 5-2 أدناه مثالاً لحالة التقلبات السنوية واليومية لسرعات الرياح في أبين.

جدول رقم 5-2: مقارنة تقلبات الرياح في أبين

رقم	رسم بياني للمقارنة	النتائج
1		تتجاوز سرعة الرياح نقطة التحول فقط خلال النهار، من الساعة 8 صباحاً حتى الساعة 6 مساءاً. هذا يعني أنه في اليوم العادي، تكون طاقة الرياح أكثر ربحية (إن وجدت) خلال هذه الساعات.
2		على أساس سنوي، لا يستوفي المتوسط الشهري لسرعة الرياح في أبين الحد الأدنى البالغ 6 متر/ثانية. وهذا له آثار على إنتاج الطاقة على أساس سنوي.

3-5 خريطة الموارد المائية

بالإضافة إلى خصائص سرعة الرياح، فإن الموارد المائية في اليمن، بما في ذلك عدة أنواع من طبقات المياه الجوفية، يتم عرضها أيضًا بدرجات مختلفة من الألوان وفقاً لهذه الخصائص:

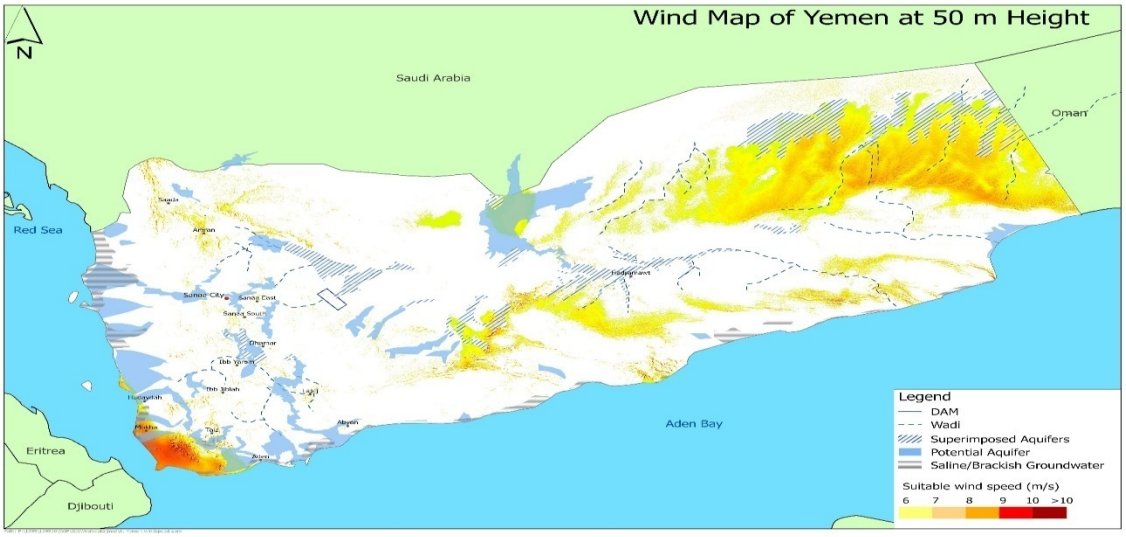
- طبقة المياه الجوفية المحتملة، التي يُفترض أنها ذات إنتاجية عالية

- طبقة المياه الجوفية المتراكبة، والتي قد تكون أو لا تكون ذات إنتاجية عالية اعتماداً على أنواعها، ويجب إجراء المزيد من البحث
- المياه الجوفية المالحة أو قليلة الملوحة، والتي تكون أكثر تكلفة من معالجة المياه الجوفية القياسية حيث تتطلب المعالجة بتحلية المياه
- الأودية أو الوديان أو القنوات التي تكون جافة ماعدا في موسم الأمطار

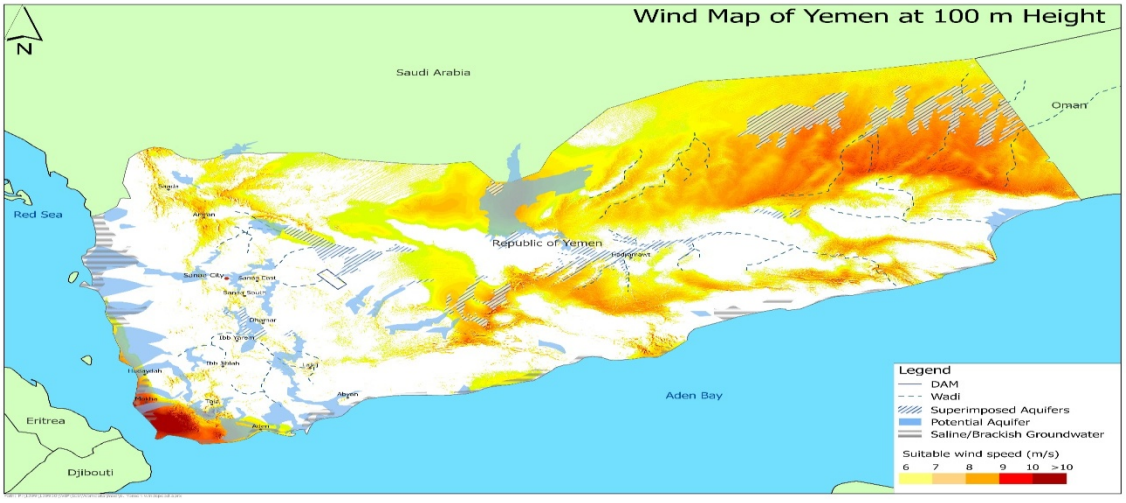
كما تم وضع توزيعات سرعة الرياح على ثلاثة ارتفاعات مختلفة، 10 متر و 50 متر 100 متر لدراسة الموقع الأمثل لتوليد طاقة الرياح.

شكل رقم 5-4: تقاطع الرياح وطبقة المياه الجوفية في اليمن على ارتفاع 10 متر

شكل رقم 5-5: تقاطع الرياح وطبقة المياه الجوفية في اليمن على ارتفاع 50 متر



شكل رقم 5-6: شكل رقم 5-5: تقاطع الرياح وطبقة المياه الجوفية في اليمن على ارتفاع 100 متر



النتائج الرئيسية

تشـير الخرائط أعلاه إلى توافر طبقات المياه الجوفية المحتملة مع الأخذ أيضـاً في الاعتبار بسـرعة الرياح في مناطق في مختلف أنحاء اليمن. اسـتناداً إلى الخرائط، تتوفر المياه الجوفية بالقرب من السـاحل الغربي وجنوب غرب ووسـط اليمن في الشـمال. تشـمل المناطق الأفضـل قرباً من الخزانات الجوفية (أقل من 10 كم) تعز والمخا وعدن وأبين والحديدة وذمار. المناطق التي تتسـم برياح قوية في الشـرق في الغالب لا توجد فيها طبقات مياه جوفية محتملة متاحة، ولكن توجد العديد من طبقات المياه الجوفية المتراكبة، على سبيل المثال في حضرموت. كما توجد وديان، ولكنها موسمية ولا يمكن الاعتماد عليها تماماً.

في القسم التالي، سنقوم بدراسة المواقع حسب ترتيب الأفضلية من حيث تركيب التوربينات.

4-5 المواقع المصنفة

بعد تقييم خصائص الرياح وخريطة طبقات المياه الجوفية في اليمن، تم تصنيف المواقع البالغ عددها 14 موقع في الجدول 5-3، بدءاً من إمكانات طاقة الرياح الأعلى. الاعتبارات الرئيسية هي التباين المكاني والزماني لسرعات الرياح في المواقع. بعد ذلك، تم إقران هذه التصنيفات الأولية بمعلومات حول قرب مصدر المياه (طبقات المياه الجوفية) من المناطق المختارة لتوفير منظور أكثر شمولاً.

بناءاً على الاعتبارات، فإن أفضل المواقع هي:

1) مدينة تعز: مناسبة على ارتفاع 10 متر و 50 متر و 100 متر مع مسافة أقل من 10 كم من طبقات المياه الجوفية المحتملة
2) تعز – المخا، جنوب صنعاء: مناسبة لارتفاعات 50 متر و 100 متر مع مسافة أقل من 10 كم من طبقات المياه الجوفية المحتملة
3) صعدة: مناسبة لارتفاعات 50 متر و 100 متر مع مسافة تزيد عن 20 كم من طبقات المياه الجوفية المحتملة

يمكن اعتبار المواقع الأخرى مناسبة فقط لتركيب التوربينات على ارتفاع 100 متر، ومع ذلك، حتى على ارتفاع 100 متر، بناءاً على اعتباراتنا، فإن مسألة إنشاء طاقة الرياح في منشآت ضخ المياه ليست مثالية.

جدول رقم 5-3: المواقع المصنفة لخيار الرياح

رقم	الموقع	سرعة الرياح على ارتفاع 10 متر	سرعة الرياح على ارتفاع 50 متر	سرعة الرياح على ارتفاع 100 متر	توافر المياه الجوفية
1	تعز – المخا	6,31	8,21	9,53	✓✓✓
2	مدينة تعز	6,68	7,26	7,81	✓✓✓
3	صعدة	6,43	7,22	7,93	✓
4	جنوب صنعاء	6,04	6,78	7,42	✓✓
5	عمران	5,64	6,84	7,81	✓
6	عدن	4,35	5,79	6,77	✓✓✓
7	إب جبلة	5,84	6,28	6,67	✓
8	لحج	7,1	6,99	7,27	✓
9	إب يريم	5,65	6,19	6,66	✓✓
10	شرق صنعاء	5,44	6,1	6,73	✓✓
11	الحديدة	4,16	5,5	6,5	✓✓✓
12	ذمار	4,76	5,71	6,45	✓✓✓
13	حضرموت	4,5	5,51	6,39	✓✓✓ (طبقات مياه جوفية متراكبة)
14	أبين	3,97	4,95	5,75	✓✓✓

✓✓✓: تتوفر طبقات المياه الجوفية المحتملة على مسافة أقل من 10 كم من المنطقة المختارة

✓✓: تتوفر طبقات المياه الجوفية المحتملة على مسافة تتراوح بين 10 – 20 كم من المنطقة المختارة

✓: تتوفر طبقات المياه الجوفية المحتملة على مسافة تزيد عن 20 كم من المنطقة المختارة

5-5 ملخص الفصل

يقدم هذا الفصل لمحة عامة عن تقييم موارد الرياح في اليمن، مع تسليط الضوء على تقلبات سرعة الرياح وأنماط التوزيع وتوافر المياه. من خلال التحليل التفصيلي، حددنا العديد من المواقع المواتية لتوليد طاقة الرياح، لا سيما على ارتفاعات حوالي 100 متر حيث تكون سرعات الرياح أعلى. الجدير بالذكر أن توزيع الرياح يتركز في منطقة الجنوب الغربي، وتحديداً بالقرب من تعز وحضرموت الصحراء. من خلال دمج خرائط سرعة الرياح مع البيانات الخاصة بطبقات المياه الجوفية المحتملة، توصلنا إلى ضرورة تصنيف المواقع على أساس تفضيلات تركيب التوربينات. في هذا التقرير، سنركز بشكل أساسي على موقع تعز – المخا مع التحقق سريعاً من جدوى تطبيق ذلك في المواقع الأخرى.

في الفصل التالي، سنتطرق إلى دراسة تقطع طاقة الرياح؛ بالإضافة إلى استكشاف الخيار الهجين من خلال الجمع بين الطاقة المتجددة واستخدام البطارية لتوليد الطاقة.

6. التقطع والخيار الهجين

تواجه مصادر الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية تحدياً كبيراً مع التقطع (التقلب). في هذا السياق، يشير التقطع إلى القدرة على تلبية الطلب باستمرار على مدار الساعة.

لـذلك، عنـد النظـر فـي حالـة تعـز – المخـا (عـلى سـبيل المثـال)، حيـث يكـون متوسـط سرعة الرياح مرتفعاً، فإنه من الضروري تقييم تقطع طاقة الرياح.

1-6 تقطع الرياح

فـي هـذا التقريـر، نمثـل التقطـع باسـتخدام اللـونين الأخضـر والأحمـر. يشـير اللـون الأخضـر إلى وقـت تلبيـة طلـب محطـة إمـدادات ميـاه، بينمـا يشـير اللـون الأحمـر إلى عـدم تلبيـة الطلـب. يمثـل المحـور الرأسـي 24 سـاعة فـي اليـوم، بينمـا يمثـل المحـور الأفقي 365 يوماً في السنة.

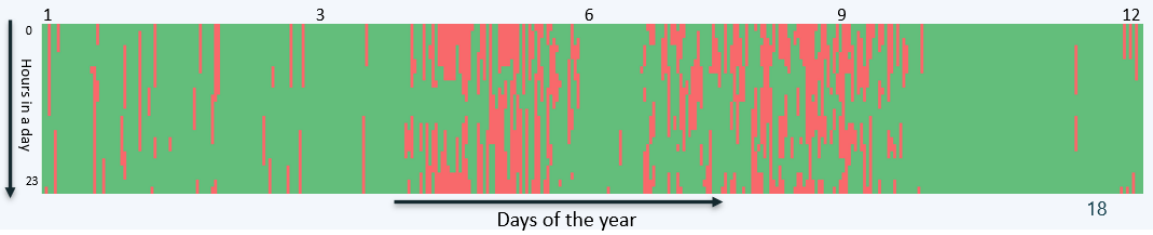
فيمـا يتعلـق بجميـع خيـارات الطاقـة، تمـت إضـافة بطاريـات بسـعة مخصصـة. فـي العديـد مـن مـزارع الريـاح أو مـزارع الطاقـة الشمسـية، تُسـتخدم البطاريـات لتحقيـق اسـتقرار النـاتج أو لتـوفير الطاقـة خـلال سـاعات مـع طاقـة الريـاح أو الطاقـة الشمسـية الآن. نظـراً لأن البطاريـات باهظـة الـثمن، فـإن معظـم أنظمـة البطاريـات صـغيرة نسبياً وتُستخدم فقط لسد فترات زمنية قصيرة (ساعات وليس أيام.(

كـان النـوع المرجعـي للبطاريـة المسـتخدمة هـو ليثيـوم أيـون، بسـعة وحـدة واحـدة تبلـغ 500 كيلـووات لكـل حاويـة، ويمكـن إعـدادها لتخـزين الطاقـة حتـى 2.5 ميجـا وات عـن طريـق تجميعهـا معـاً. فـي حالـة تعـز – المخـا، كانـت سـعة البطاريـة المختـارة 500 كيلـووات بينمـا كـان الطلـب 120 كيلـووات فقـط. عنـد تحليـل موقـع آخـر ذو طلـب أكبر، سيتم تعديل سعة البطارية الأعلى سعة وفقاً لذلك.

باستخدام بيانات سرعة الرياح المستقاة من عارض بيانات الوصول إلى الطاقة الخاص بوكالة ناسا لعام 2022، يوضح الشكل 6-1 التقطع باستخدام توربين رياح واحد على ارتفاع 100 متر في تعز – المخا. في الشكل 6-2 قمنا بتضمين بطارية 500 كيلو وات. يوضح الشكل 6-1 أن هناك فترات عديدة من نقص الإنتاج في الفترة مايو – يونيو والفترة يوليو – أكتوبر (الخطوط الحمراء)، ولا سيما في الليل. يوضح الشكل 6-2 أن البطاريات تقلل بشكل كبير من نقص الإنتاج.

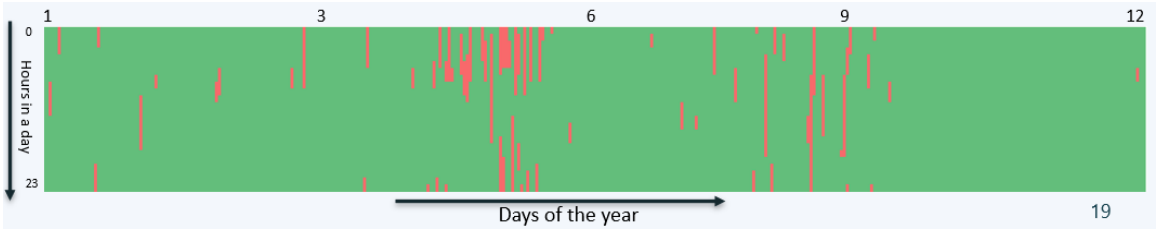
على نحو ما ذُكر في نقاط البدء، فإنه من المهم أن نشير إلى أننا لا نأخذ في الاعتبار وقت بدء التشغيل ونفحص كل ساعة على حدة لتحديد ما إذا كان الطلب قد تمت تلبيته.

شكل رقم 6-1: تقطع الرياح في تعز – المخا بدون استخدام بطارية



يوضح الشكل 6-2 الرسم البياني لتقطع الرياح مع البطارية.

شكل رقم 6-2: تقطع الرياح في تعز – المخا مع استخدام بطارية 500 كيلووات

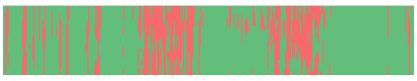
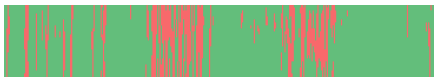
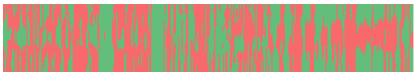
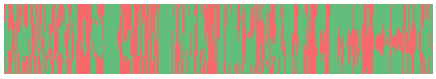


النتائج الرئيسية

في تعز – المخا، حتى مع أفضل خصائص الرياح والطلب المعتدل، لا تزال هناك بعض الانقطاعات خاصة من مايو إلى يونيو ومن يوليو إلى أكتوبر. إضافة بطارية في تعز – المخا تقلل بشكل كبير من تقطع الطلب الذي تتم تلبيته على مدار عام كامل مع بعض الانقطاعات في مايو وأغسطس. مع ذلك، من المهم معرفة أن الطلب في تعز – المخا صغير ويمكن تلبيته باستخدام توربين واحد. غير أنه في مواقع أخرى، يمكن أن يصل الطلب على الطاقة إلى 2,320 كيلووات في الساعة، وهو ما قد يكون من الصعب على توربين واحد تلبيته.

لتوضيح مشكلة التقطع بشكل أكبر، تم عرض المواقع الثلاثة التالية في الجدول 6-1 أدناه. تم تحديد عدد التوربينات بحيث يغطي الحد الأدنى من قدرة إنتاج طاقة الرياح الطلب. تم تعديل سعة البطارية لنفس السبب. عندما لا تؤدي إضافة المزيد من التوربينات إلى إحداث تغييرات كبيرة، فإنه سيتم إرجاع عدد التوربينات إلى التكوين الأصلي.

جدول رقم 6-1: تقطع الرياح في أفضل المواقع الأخرى

الموقع – الطلب	توربين فقط	توربين + بطارية
تعز (4 توربينات) – الطلب 2,320 كيلووات/ساعة		
صعدة (2 توربينات) – الطلب 791 كيلووات/ساعة		
جنوب صنعاء (2 توربينات) – الطلب 1,931 كيلو وات/ساعة		

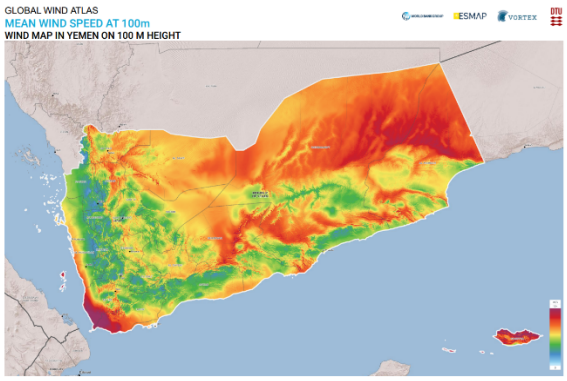
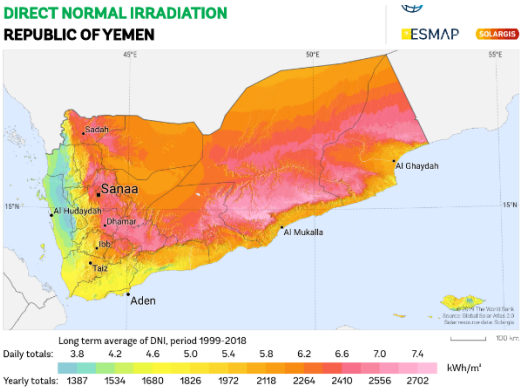
يبين الجدول أعلاه أنه حتى مع التوربينات الإضافية في المناطق الأكثر رياحاً في اليمن، لا تتم تلبية الطلب على الطاقة لكل ساعة في السنة. على الرغم من أن البطارية تخفف من المشكلة، إلا أنه لا يزال هناك قدر كبير من الوقت عندما يكون هناك انقطاع في التيار الكهربائي. هذا يوضح أن طاقة الرياح وحدها قد لا تكون الحل، وفي القسم التالي، سنستكشف خيار استغلال الطاقة الشمسية.

2-6 خيار الطاقة الشمسية

يبين الجدول 6-2 مقارنة بين خصائص طاقة الرياح وخصائص الطاقة الشمسية في جميع أنحاء البلاد. تم الحصول على بيانات الطاقة الشمسية من أطلس الطاقة الشمسية العالمي (أطلس الطاقة الشمسية العالمي، 2024). تُظهر

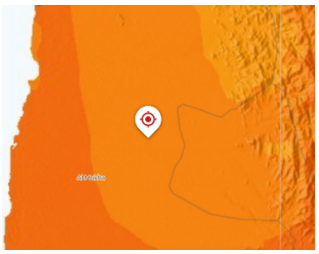
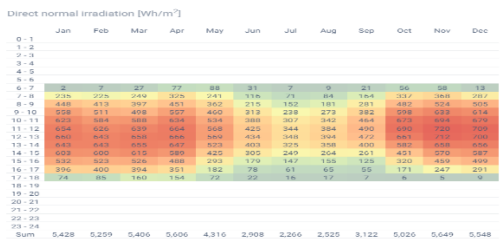
المقارنة أن الموارد الشمسية تتميز بتباين مكاني أقل مقارنة بموارد الرياح مما يؤدي إلى توزيع عادل للموارد الشمسية في جميع أنحاء البلاد.

جدول رقم 6-2: مقارنة عامة بين طاقة الرياح والطاقة الشمسية في اليمن (أطلس الطاقة الشمسية العالمي، 2024)، (أطلس الرياح العالمي، 2014)

موارد الرياح في اليمن	الموارد الشمسية في اليمن
	

في هذا المشروع، نأخذ في الاعتبار ألواح الطاقة الشمسية بقدرة 600 وات لتلبية الطلب في حالة تعز – المخا. يبين الجدول 6-3 متوسط التباين المكاني والزماني السنوي للإشعاع الشمسي في تعز – المخا.

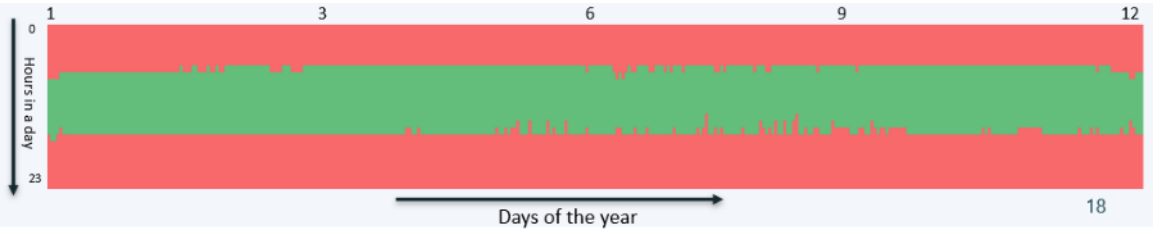
جدول رقم 6-3: خصائص الطاقة الشمسية

الإشعاع	خريطة الإشعاع الشمسي	مؤشر الإشعاع الشمسي
1,872 كيلووات ساعة/متر مربع		

تبدو الطاقة الشمسية أكثر قابلية للتنبؤ بها خلال النهار، بينما يمكن أن تؤدي إضافة البطارية إلى إطالة فترة توفر الطاقة. يستخدم تكوين الخلايا الشمسية أدناه 500 لوح بقدرة 600 وات لكل منها لتغطية الطلب الذي يبلغ 120 كيلووات في الساعة. ينطبق هذا الرقم على موقع به آبار مياه متعددة، في التقرير القطري السابق، يستخدم بئر مياه واحد من 175 إلى 200 لوح طاقة شمسية (اليونيسف، 2018). توافر 500 لوح لموقع واحد يعتبر معقولاً جداً.

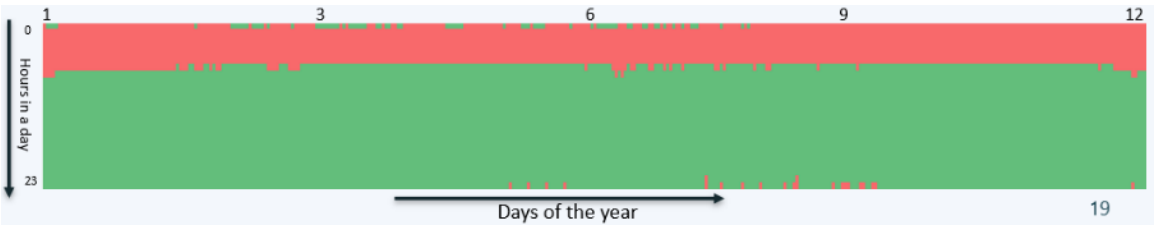
تم توضيح تقطع الطاقة الشمسية في تعز – المخا بدون استخدام بطارية في الشكل 6-3.

شكل رقم 6-3: تقطع الطاقة الشمسية في تعز – المخا بدون استخدام بطارية



تم توضيح الرسم البياني لتقطع الطاقة الشمسية مع استخدام بطارية في الشكل 6-4.

شكل رقم 6-4: تقطع الطاقة الشمسية في تعز – المخا مع استخدام بطارية 500 كيلووات



النتائج الرئيسية

قابلية التنبؤ بالطاقة الشمسية على مدار العام أكثر من قابلية التنبؤ بطاقة الرياح لأن الطاقة الشمسية قادرة على الاستمرار لمدة 6 ساعات تقريباً كل يوم دون أي انقطاع. في أماكن مثل تعز – المخا، حيث الطلب صغير، فإن توفر 500 لوح طاقة شمسية يُعد كافياً، لكن ارتفاع الطلب قد يقتضي المزيد منها والتي قد تحتاج إلى مساحة أكبر. من خلال إضافة بطارية، فإنه يمكننا الحصول على الطاقة دون انقطاع لمدة 12 ساعة تقريباً.

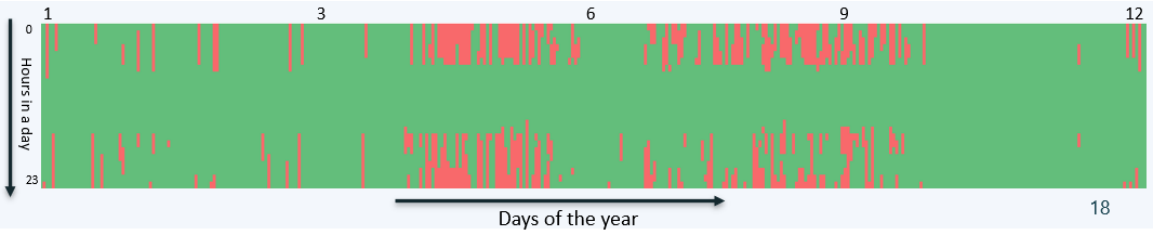
في القسم التالي، سنتطرق إلى دراسة نظام هجين يجمع بين توربينات الرياح وألواح الطاقة الشمسية وكيف يؤثر على التقطع.

3-6 الخيار الهجين

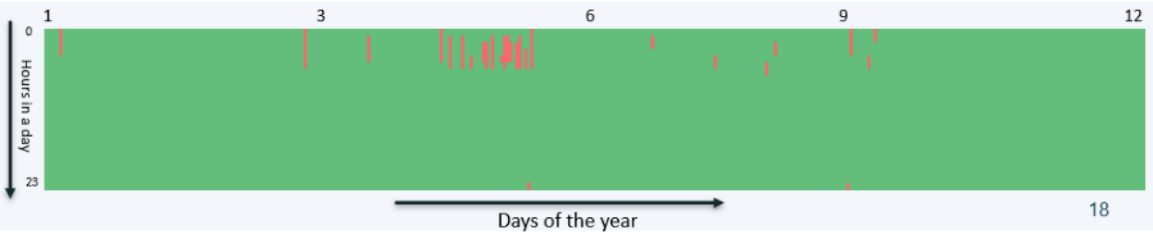
يكشف تحديد خيارات طاقة الرياح والطاقة الشمسية بشكل منفصل عن خصائص مميزة للطاقة. إنتاج طاقة الرياح متقطع، في حين يتم إنتاج الطاقة الشمسية باستمرار خلال ساعات النهار. الجمع بين كليهما يمكن أن يعالج بشكل فعال تقطع الطاقة. يتضمن الخيار الهجين المقترح إضافة ألواح الطاقة الشمسية لتكملة تشغيل التوربين.

يوضح الشكل 6-5 الرسم البياني للتقطع بعد إضافة ألواح الطاقة الشمسية إلى التوربين، بينما يوضح الشكل 6-6 النظام الهجين مع استخدام بطارية إضافية.

شكل رقم 6-5: التقطع في النظام الهجين في تعز – المخا بدون استخدام بطارية



شكل رقم 6-6: التقطع في النظام الهجين في تعز – المخا مع استخدام بطارية 500 كيلووات



النتائج الرئيسية

يؤدي الجمع بين الطاقة الشمسية وطاقة الرياح إلى تقليل التقطع بشكل عام، ومع استخدام البطارية، لا يكاد يكون هناك انقطاع إلا لبضع ليالٍ في العام. يمكن حل ذلك باستخدام بطارية ذات قدرة أعلى إلى جانب إضافة المزيد من ألواح الطاقة الشمسية.

6-4 ملخص الفصل

يناقش هذا الفصل تقطع الطاقة المتجددة والخيارات البديلة الأخرى التي يمكن النظر فيها. في حين أن طاقة الرياح يمكن أن تلبي الطلب في مواقع معينة، فإن المناطق ذات خصائص الرياح الأقل ملاءمة تشهد تقطعاً غير منتظم للطاقة. تؤدي إضافة بطارية إلى نظام طاقة الرياح أو النظام الهجين أو نظام الطاقة

الشمسية إلى إضافة بضع ساعات يومياً من إمدادات الطاقة، ولكن عدد الساعات قد لا يكون كبيراً. يبدو أن النظام الهجين هو أفضل نظام لتوافر الطاقة على مدار العام، ولكن ينبغي النظر بعناية في تكلفة الاستثمار المرتفعة. ثمة اعتبار آخر يتمثل في انخفاض الطلب على الطاقة في بعض المواقع، في حال أنه يمكن للتوربين أن ينتج الكثير من الكهرباء فقط لتغطية طلب صغير جداً على الطاقة، وهو ما يُنظر إليه أيضاً على أنه عدم كفاءة النظام.

يُوصى بتوسيع البنية التحتية للطاقة الشمسية لتلبية النطاق الواسع من الطلب، ومع ذلك فإن الاعتبار الرئيسي هو أنه مع مساحة تشغيل أكبر، فإن هذا يشير إلى نطاق أكبر من الصيانة. يتطلب تركيب التوربينات وجود مرافق مسبقة (أي الطرق) ومعدات ثقيلة خاصة للشحن والتركيب والصيانة. كل ما سبق يحتاج إلى مهندسين أو خبراء متخصصين في التوربينات. يمكن الاطلاع على مزيد من التفاصيل حول تحديات تركيب توربينات الرياح في الفصل 8. في المقابل، فإن الطاقة الشمسية أكثر سهولة من حيث إمكانية إنشائها وتركيبها وصيانتها من توربينات الرياح.

في الفصل التالي، سنقوم بتفحص النموذج المالي لإنشاء توربينات الرياح، وكذلك نظام الطاقة الشمسية والنظام الهجين.

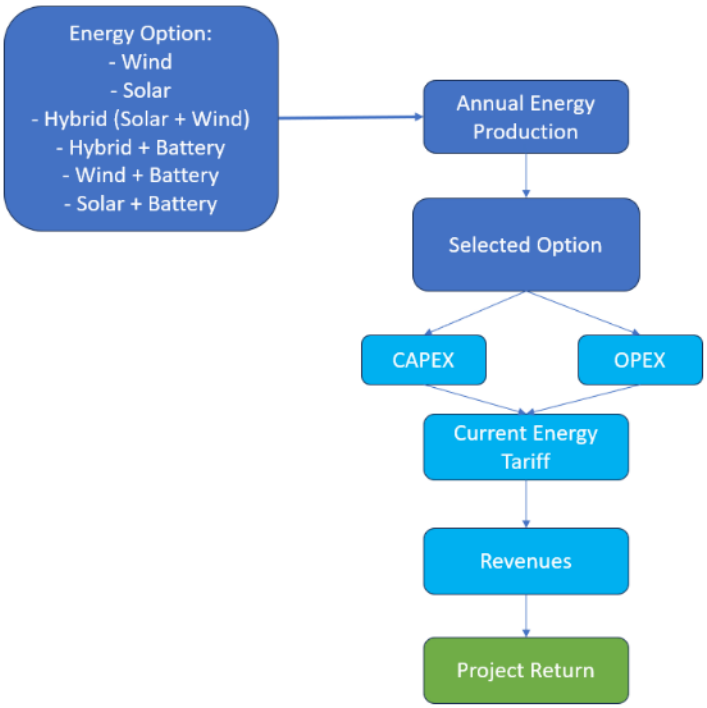
7. هيكل النموذج المالي

سنركز في هذا القسم على الهيكل المالي لمختلف النظم التي تمت مناقشتها؛ نظام توربينات الرياح ونظام ألواح الطاقة الشمسية ونظام البطاريات. تم اتباع أسلوب منهجي حيث نبدأ بتقدير الإنتاج السنوي للطاقة ونقوم بمقارنته بالطلب على الطاقة في الموقع.

يتّبع النموذج الموضح في الشكل 7-1 أدناه المنطق التدريجي على النحو التالي:

1) هناك أربعة خيارات متاحة لموقع واحد، وهي طاقة الرياح والطاقة الشمسية وطاقة الرياح مع البطارية والطاقة الشمسية مع البطارية.
2) سيتم تزويد كل خيار بالإنتاج السنوي للطاقة بما في ذلك الطلب على الطاقة في الموقع المحدد.
3) سيتم بعد ذلك المضي قدماً في الخيار المحدد في الحساب المالي (النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية)،
4) تعتمد إيرادات المشروع على الطاقة المولدة وتعرفة الكهرباء الأخيرة لكل وحدة طاقة.
5) يحسب النموذج عائد المشروع بناءاً على إجمالي إيرادات المشروع وتكلفته.

شكل رقم 7-1: مخطط التدفق المالي



1-7 النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية

نظام التوربينات

جدول رقم 7-1: النفقات الرأسمالية لجميع أنواع التوربينات

حساب النفقات الرأسمالية للتوربين	نسبة سعر التوربين	3.45 – Vestas V136 ميجاوات
سعر التوربين (دولار أمريكي)	٪100	3.450.000.00 دولار أمريكي (Vestas، 2024)
النقل	٪3.2	109.710,00 دولار أمريكي

حساب النفقات الرأسمالية للتوربين	نسبة سعر التوربين	3.45 – Vestas V136 ميجاوات
التركيب	3.0٪	103.500,00 دولار أمريكي
شبكة الكهرباء	30.0٪	1.035.000,00 دولار أمريكي
الأعمال المدنية	20.0٪	690.000,00 دولار أمريكي
إجمالي النفقات الرأسمالية		5.388.210,00 دولار أمريكي
مدة النفقات التشغيلية (20 عام)	3٪/سنة	3.232.926,00 دولار أمريكي

نظام ألواح الطاقة الشمسية

جدول رقم 7-2: النفقات الرأسمالية لجميع أنواع ألواح الطاقة الشمسية

حساب النفقات الرأسمالية لألواح الطاقة الشمسية (500 لوح)	نسبة سعر ألواح الطاقة الشمسية	Sunket - SKT600
سعر ألواح الطاقة الشمسية (دولار أمريكي)	100,0٪	100,000.00 دولار أمريكي (Solar Feeds، 2024)
النقل	10.0٪	10.000,00 دولار أمريكي
التركيب	35.0٪	35.000,00 دولار أمريكي

حساب النفقات الرأسمالية لألواح الطاقة الشمسية (500 لوح)	نسبة سعر ألواح الطاقة الشمسية	Sunket - SKT600
شبكة الكهرباء	15.0٪	15.000,00 دولار أمريكي
الأعمال المدنية	20.0٪	20.000,00 دولار أمريكي
إجمالي النفقات الرأسمالية		180.000,00 دولار أمريكي
مدة النفقات التشغيلية (20 عام)	1٪/سنة	36.000,00 دولار أمريكي

البطارية

جدول رقم 7-3: النفقات الرأسمالية للبطارية

بطارية 500 كيلو وات	نسبة سعر البطارية	ليثيوم
سعر البطارية (دولار أمريكي)	100,0٪	208.500,00 دولار أمريكي (Generac، 2024)
النقل	6,0٪	12.510,00 دولار أمريكي
التركيب	3,0٪	6.255,00 دولار أمريكي

بطارية 500 كيلو وات	نسبة سعر البطارية	ليثيوم
شبكة الكهرباء	٪30,0	62.550,00 دولار أمريكي
الأعمال المدنية	٪20,0	41.700,00 دولار أمريكي
إجمالي النفقات الرأسمالية		331.515,00 دولار أمريكي
مدة النفقات التشغيلية (20 عام)	٪3/سنة	198.909,00 دولار أمريكي

7-1-1 ملخص النفقات التشغيلية والنفقات الرأسمالية

يعرض الجدول أدناه ملخص النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية لمدة 20 عاماً من الاستثمار لجميع أنواع مزيج التكنولوجيا.

جدول رقم 7-4: ملخص النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية لجميع أنواع مزيج التكنولوجيا

	طاقة الرياح	طاقة الرياح + البطارية	الطاقة الشمسية	الطاقة الشمسية + البطارية
النفقات الرأسمالية	5.388.210,00 دولار أمريكي	5.719.725,00 دولار أمريكي	540.000,00 دولار أمريكي	871.515,00 دولار أمريكي
النفقات التشغيلية	3.232.926,00 دولار أمريكي	3.431.835,00 دولار أمريكي	180.000,00 دولار أمريكي	522.909,00 دولار أمريكي
الإجمالي	**8.621.136,00 دولار أمريكي**	**9.151.560,00 دولار أمريكي**	720.000,00 دولار أمريكي	**1.394.424,00 دولار أمريكي**

7-2 التكلفة المستوية للطاقة

سيتم استخدام التكلفة المستوية للطاقة لكل خيار للمقارنة. كلما انخفضت التكلفة المستوية للكهرباء كلما كانت التكنولوجيا أكثر كفاءة من حيث التكلفة حيث أنها تتطلب تكلفة أقل لتوليد 1 كيلووات في الساعة من الطاقة.

مع ذلك، فإن أفضل تغطية للطلب على الطاقة لا تعني بالضرورة أدنى تكلفة مستوية للكهرباء، والعكس صحيح. الخيار الأفضل هو الخيار الذي يغطي الطلب على الطاقة مع الحفاظ على تكلفة مستوية معقولة للكهرباء والتي قد تختلف من مكان إلى آخر. نظراً لأن التعرفة الحالية للطاقة في اليمن غير معروفة، فقد تم تقدير السعر استناداً إلى البلدان المجاورة ذات الأوضاع المماثلة، مما نتج عنه سعر عند 0.05 لكل كيلووات ساعة. تم تلخيص التكلفة المستوية للكهرباء في الجدول 7-5 أدناه.

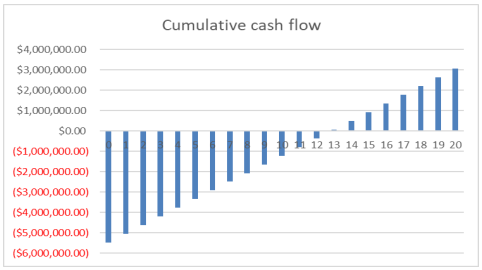
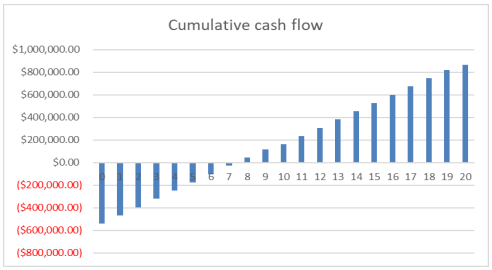
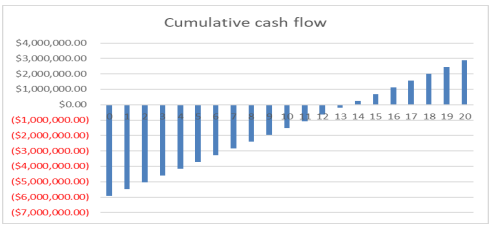
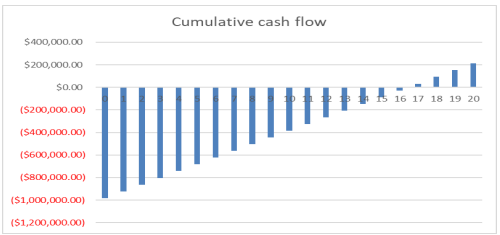
جدول رقم 7-5: التكلفة المستوية للكهرباء حسب مزيج التكنولوجيا في تعز – المخا

التفاصيل	طاقة الرياح	الطاقة الشمسية
بدون بطارية	0.0835 دولار أمريكي/كيلووات ساعة	0.0376 دولار أمريكي/كيلووات ساعة
مع بطارية	0.0902 دولار أمريكي/كيلووات ساعة	0.0787 دولار أمريكي/كيلووات ساعة

3-7 التدفق النقدي

التـــدفق النقـــدي لجميـــع الخيـــارات متـــاح فـــي الجـــدول 7-6. وقـــد تضـــمنت هـــذه التـــدفقات النقديـــة بالفعـــل النفقـــات الرأســـمالية والنفقـــات التشـــغيلية، وتـــم تحديـــدها على مدار 20 عاماً من التشغيل.

جدول رقم 7-6: محاكاة التدفق النقدي لجميع أنواع مزيج التكنولوجيا

التفاصيل	طاقة الرياح	الطاقة الشمسية
بدون بطارية		
مع بطارية		

الرســـوم البيانية للتدفق النقدي أعلاه هي مجرد حســـابات نظرية، حيث قد لا يكون من الناحية العملية بيع الطاقة بالكامل والحصول على 100٪ من الإيرادات هو الحال. بالنسبة لأي مزيج طاقة، يُعد الانتقال الطاقي أمراً ضـرورياً ويؤثر على التمويل وتسـعير الطاقة. في حالة طاقة الرياح، في حال لم يكن بمقدور الانتقال الطاقي توفير سـوى نسـبة صـغيرة من إنتاج الطاقة، فإن التكلفة المسـتوية للكهرباء سـتصـبح أعلى. هذا يؤدي إلى ارتفاع سـعر الطاقة، وفي ظل الوضع المالي الأخير في اليمن، قد لا يتمكن الجمهور من تحمل تكلفتها. الحل يكمن في دعم الطاقة المتجددة بالطاقة الأخرى غير المتجددة خلال مرحلة الانتقال، وتطبيق دعم الطاقة والسعر حتى يتمكن الجمهور من تحمل تكاليف الطاقة واستخدامها.

4-7 ملخص الفصل

يسلط الفصل الضوء على المزايا النسبية للطاقة الشمسية مقارنة بطاقة الرياح، استناداً إلى كل من تغطية الطاقة والتحليلات المالية. كما يوضح الفصل أن دمج مئات الألواح الشمسية لا يوفر تغطية طاقة فائقة فحسب، بل يثبت أيضاً أنها أكثر فعالية من حيث التكلفة مقارنة بتركيب توربين واحد. الاستثمارات الأولية والنفقات التشغيلية وتكاليف الصيانة المرتبطة بطاقة الرياح تتجاوز بكثير تلك المرتبطة ببدائل الطاقة الشمسية. بالإضافة إلى ذلك، فإن أي مزيج يتضمن ألواح الطاقة الشمسية تنتج عنه فترة استرداد أقصر، الأمر الذي يعزز جاذبية حلول الطاقة الشمسية.

مع ذلك، فإنه من المهم ملاحظة أن الحسابات والرسوم البيانية التي تم عرضها هي تنبؤات نظرية، تخضع للتغيرات المحتملة عند التنفيذ الفعلي على الأرض بسبب عوامل مثل تغيير الخطط وتقلب الأسعار والقيود الزمنية. من الناحية العملية، قد تنحرف الإيرادات الفعلية المتولدة من مبيعات الطاقة عن التوقعات النظرية، مما يدفع باعتبارات من قبيل الاستراتيجيات المالية، بما في ذلك الدعم المحتمل، لمعالجة أي فوارق وتحسين العائد على الاستثمار.

في الفصل التالي، سنحدد العقبات التي قد تواجهها اليمن في حال إصرارها على التوجه نحو طاقة الرياح.

8. تحديات البناء والتحديات التشغيلية

في حال كانت اليمن تخطط لتركيب التوربينات، فإنه سيتعين عليها أيضاً أن تأخذ في الاعتبار مسائل النقل والبناء والتشغيل والصيانة. سيستكشف هذا الفصل المزيد حول التحديات التي تواجهها اليمن المتعلقة بطاقة الرياح.

8-1 نقل التوربين

لتوليد الطاقة من توربين الرياح، يجب نقل التوربين إلى الموقع، وهذا يتطلب التخطيط الدقيق مع أخذ عوامل مختلفة في الاعتبار. بالنظر إلى تنوع التضاريس في اليمن، فإنه ينبغي اعتماد طريقة النقل الصحيحة. في هذا القسم، سنتحدث بالتفصيل عن طرق النقل المختلفة. بشكل عام، يتم توفير إرشادات النقل من قبل الشركة المصنعة للتوربينات.

النقل البحري

يتم تصنيع معظم توربينات الرياح في المصانع (في الخارج) ويجب نقل التوربينات على متن سفن كبيرة، بعضها مصمم خصيصاً لنقل توربينات الرياح. في حين يتم تصنيع غلاف برج التوربين بمقاطع قصيرة، فإن شفرات التوربين (التي يصل طولها إلى 100 متر) تُصنع على شكل واحد ويتعين شحنها ونقلها كاملة.

توجد في اليمن حوالي عشرة موانئ رئيسية يمكن فيها تفريغ التوربينات من السفن الكبيرة. ميناء عدن هو الميناء الأكبر (عدن هي الميناء الرئيسي في اليمن). هناك العديد من خيارات الموانئ القريبة من مزارع الرياح المحتملة في منطقة تعز. في هذا المشروع لم نقم بتقييم خصائص الرسو والتفريغ لكل ميناء.

شكل رقم 8-1: الموانئ في اليمن

النقل البري

تشكل شفرات التوربين الطويلة (يصل طولها إلى 100 متر) التحدي الأكبر في النقل البري. عندما تسمح التضاريس (عدم وجود جبال شديدة الانحدار وطرق منحنية ممهدة بلا عوائق)، يتم نقل الشفرات في الغالب بواسطة مقطورات طويلة مسطحة. غير أنه في ظروف التضاريس الأكثر صعوبة (المنحنيات الضيقة

والطـرق المتموجـة)، فإنـه غالبـاً مـا يـتم نقـل الشـفرات بواسـطة شـاحنات متخصصـة لرفـع الشـفرات تسـمح للشـفرات بالالتفـاف حـول العوائـق عـن طريـق الـدوران و / أو الرفـع. لا توجـد شـاحنات رفـع الشـفرات هـذه فـي الـيمن ومـن غيـر المـرجح أن يـتم استيراد هذه الشاحنات لنقل بضعة توربينات فقط.

شكل رقم 8-2: مقطورة مسطحة تنقل شفرة توربين

شكل رقم 8-3: شاحنة رفع الشفرات

شكل رقم 8-4: شاحنات رفع الشفرات التي تُستخدم في التضاريس الجبلية للتنقل عبر المنحنيات الضيقة

يتطلب نقل الشفرات عن طريق البر بعضاً من الحد الأدنى من الظروف، مثل عُرض الطريق (5 أمتار على الأقل)، ورصف الطريق (دون أسطح طرق زلقة أو غير سوية، وقدرة تحمُّل كافية)، والانحدار (لا يزيد الانحدار عن 8 – 10٪)، والانحناء (منحنيات بنصف قطر 15 – 20 متر). قد لا تتوفر هذه الظروف في المناطق الريفية من اليمن، مما يستلزم تحسين الطرق أو حتى بناء الطرق بتكلفة باهظة، والتي قد تبلغ 200,000 دولار أمريكي – 1,000,000 دولار أمريكي لكل كيلومتر، حسب ظروف التضاريس.

8-2 بناء التوربين

في حين أن معظم مكونات التوربين يتم استيرادها ويشكل النقل معظم التحديات الفنية، فإن بعض جوانب البناء تشكل تحدياً بنفس القدر. على سبيل المثال، يجب رفع كَنّة المحرك ("الرأس" أو التوربين مع المولد ونظام نقل الحركة) وشفرات التوربين إلى أعلى غلاف التوربين الذي يبلغ ارتفاعه 75 – 100

متـر. يتطلـب هـذا رافعـات عاليـة المـدى والتـي قـد لا تتـوفر (بسـهولة) فـي الـيمن. أنظر الصورة أدناه.

شكل رقم 8-5: رافعة عالية المدى ترفع شفرات التوربين

بالإضـافة إلى رفـع كَنّـة المحـرك وشـفرات التـوربين، فـإن بنـاء الأسـاس قـد لا يكـون مهمة سهلة إذ أنه يتطلب الخبرة والعمال المدربين.

هناك نوعان رئيسيان من الأساسات:

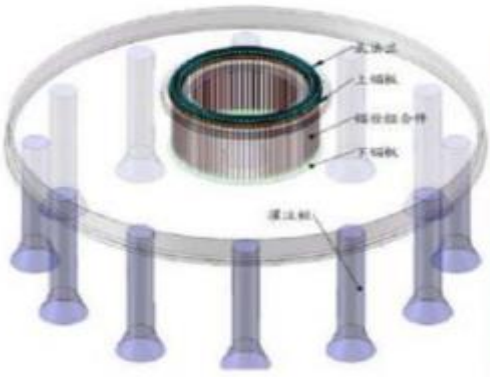
- الأساسـات القائمـة عـلى الجاذبيـة، وهـي عمليـاً عبـارة عـن "قـدم" خرسـانية كبيـرة وثقيلـة تُثبّـت التـوربين فـي مكانـه عـن طريـق الـوزن. غالبـاً مـا يسـتخدم هـذا الأسـاس فـي التربـة الناعمـة والمواقـع التـي تتـوفر فيهـا مسـاحة كافيـة (قـد يبلغ قطر الأساس 40 – 50 متر).
- الأساسـات القائمـة عـلى الركـائز، حيـث يـتم دفـع الركـائز العميقـة فـي الصـخور. تتطلـب هـذه التقنيـة المزيـد مـن الخبـرة الجيوتقنيـة والحفـارات المتخصصـة، إلا أن لهـا بصـمة أصـغر إلى حـد مـا مقارنـة بالأساسـات القائمـة عـلى الجاذبيـة.

لـذلك، فإنـه غالبـاً مـا تُسـتخدم عـلى قمـم الجبـال حيـث تكـون المسـاحة محـدودة. تتطلـب هـذه التقنيـة كميـة أقـل مـن الخرسـانة وحديـد التسـليح مقارنة بالأساسات القائمة على الجاذبية.

لبنـاء توربينـات الريـاح، هنـاك حاجـة إلى مسـاحة عمـل تبلـغ 50 × 100 متـر للسـماح بالرافعات والشاحنات ووضع شفرات التوربينات الطويلة.

شكل رقم 8-6: الأساسات القائمة على الجاذبية

شكل رقم 8-7: الأساسات القائمة على الركائز



التصميم الكهربائي

لا يمكن تغذية محطة إمدادات المياه مباشرة بالكهرباء التي تولدها توربينات الرياح، ولكن يجب أن تستقر، وأن يتم ضبط التردد والجهد بما يتلاءم مع احتياجات محطة الضخ. يتطلب ذلك محولات وبطاريات ومعدات كهربائية أخرى، وهو ما يتطلب عاملين مدربين للبناء والصيانة.

نظراً لأن توربينات الرياح توضع عادةً على قمم الجبال والتلال، في حين أنه من المتوقع أن تكون محطات الضخ في الأودية (بالقرب من طبقة المياه الجوفية)، فإن هناك حاجة إلى خطوط نقل لربط التوربين بمحطة الضخ.

3-8 الصيانة

تبدأ دورة الصيانة النموذجية لتوربينات الرياح بالفحوصات الروتينية: تخضع توربينات الرياح للفحوصات الروتينية بانتظام، عادةً كل ستة أشهر إلى عام واحد. يتم فحص العناصر التالية:

1) الشفرات: يتم فحص الشفرات بحثاً عن التشققات والأضرار الناجمة عن التعرض لأشعة الشمس ودرجات الحرارة القصوى والتآكل. تساعد الفحوصات المنتظمة في تحديد المشاكل مبكراً ومنع المزيد من الضرر.
2) فحص علبة التروس: يتم فحص علبة التروس، وهي مكون بالغ الأهمية، بحثاً عن البلى والتلف. يمكن أن تتعطل علب التروس بعد الاستخدام لفترة طويلة، مما يؤثر على أداء التوربين.

3) تقييم المولد: التأكد من عمل المولد بشكل صحيح. يمكن أن تتسبب المشاكل الميكانيكية أو الكهربائية في تعطل المولد.
4) فحص المحامل: يتم فحص المحامل بحثاً عن علامات التآكل؛ كما يتم فحص التشحيم.
5) تنظيف كَنّة المحرك: إزالة الغبار والحطام.
6) فحص الأسلاك: الفحص المنتظم للأسلاك يمنع حدوث ماس كهربائي وحرائق محتملة.

يجب إجراء فحوصات الصيانة هذه من قبل موظفين مدربين جيداً نظراً لأن مساحة العمل خطيرة (العمل على المرتفعات). قد يشكل هذا تحدياً، حيث لا يوجد على الأرجح مهندسون محليون مدربون في مجال طاقة "الرياح". على الرغم من أن اليمن نفذت الطاقة الشمسية كمصدر للطاقة المتجددة منذ ما يقرب من عقد من الزمان، إلا أن طاقة الرياح شيء جديد.

4-8 التنوع البيولوجي والقضايا البيئية

تنطوي توربينات الرياح على بعض المخاطر المتعلقة بالتنوع البيولوجي والبيئة. بعض المخاطر أكثر انتشاراً في المناطق الساحلية؛ بينما البعض الآخر أكثر انتشاراً في المناطق الجبلية.

جدول رقم 8-1: المخاطر والأثر والتخفيف (البراء م. مصطفى، 2018)

المخاطر	الأثر	المنطقة المتأثرة (جبلية/ساحلية/كلاهما)	التخفيف
نفوق الطيور والخفافيش	يمكن أن يكون لهذا النفوق آثار دائمة على الأنواع المعرضة للخطر بل وحتى على النظم البيئية	كلاهما	يمكن لمزارع الرياح التي يتم اختيار موقعها بشكل صحيح (بعيداً عن طرق الهجرة) والتقنيات (الإنذار المبكر، وتقنيات التخويف) تقليل هذه المخاطر إلى الحد الأدنى
تتطلب مزارع الرياح (الكبيرة) مساحة كبيرة للتركيب والتشغيل.	يمكن أن يؤثر فقدان الموائل على التنوع البيولوجي المحلي، وخاصة بالنسبة للأنواع المهددة بالانقراض	كلاهما	الاختيار والتخطيط الاستراتيجي للموقع أمر ضروري.
يمكن أن تؤثر ضوضاء واهتزازات التوربينات على المجتمع والحياة البرية القريبة	اضطراب في سلوك الحيوانات وأنماط التعشيش والتغذية.	كلاهما	يمكن أن يؤدي التصميم والموضع المناسبين إلى تقليل هذه التأثيرات

أثناء التشغيل، سينتج التوربين الكبير ضوضاء قد تزعج الأحياء المجاورة. نظراً لأن اليمن ليست بلداً به توزيع للرياح القوية، فإن الرياح القوية قد تهب بالقرب من الأحياء الموجودة في المنطقة الجبلية. إذا تم تركيب توربين الرياح في المنطقة الساحلية، مثل عدن والمخا، فإنه يجب أن يتم اختيار الموقع بعيداً عن الشاطئ أو بعيداً عن الميناء وأنشطة الشحن. قد تقتضي هذه العملية وضع سياسات جديدة ونقل المجتمع المحلي.

1-4-8 التصاريح

لـم نقـم بتقيـيم الإطـار القـانوني اليمنـي بشـأن طاقـة الريـاح. فيمـا يلـي، نسـتعرض التصاريح النموذجية المطلوبة لتركيب توربينات الرياح في جميع أنحاء العالم.

جدول رقم 8-2: التصريح المطلوب لتوربينات الرياح (WINDExchange، 2024)

التصاريح	التفاصيل
تصريح البناء	• مطلوب للتركيب المادي لبرج التوربين والأسـاس والهياكل المصاحبة. • يكفل الامتثال لقوانين البناء ومعايير السـلامة المحلية.
تصريح تغيير استخدام الأراضي	• يعالج استخدام الأراضي والموقع. • يتحقق من أن التوربين المقترح يلتزم بلوائح تغيير استخدام الأراضي. • قـد يتضـمن اعتبـارات مثـل التراجع عن حـدود الملكية وحدود الضوضاء والتأثير البصري.
التصريح الكهربائي	• مطلوب لربط التوربين بشبكة الكهرباء. • يكفل التدابير المناسـبة للتسـليك والتأريض والسلامة.
التصريح البيئي	• مطلوب في حـال كـان تركيـب التوربين يؤثر على الموارد الطبيعية (على سـبيل المثال الأراضـي الرطبة وموائل الحياة البرية). • يكفل الامتثال للقوانين البيئية.
تصريح هيئة الطيران	• إذا تجاوز التوربين ارتفاعاً معيناً (عادةً 200 قدم)، سـيتعين عليك الحصـول على تصـريح من هيئة الطيران و / أو القوات الجوية.

	• يكفل سلامة الحركة الجوية.
اتفاقية الربط البيني للمرافق	• إذا كانت الحكومة تخطط لربط التوربين بالشبكة، فإنه يجب العمل مع شركة المرافق التابعة لها. • الحصول على اتفاقية تحدد المتطلبات والإجراءات الفنية.

قبل تركيب توربين أو حتى بناء مزرعة رياح، يتعين على اليمن وضع لوائح وسياسات ومعايير محددة لتشغيل توربينات الرياح. يجب أن تكون جميع المكونات المتعلقة بالطاقة المتجددة مع توربينات الرياح واضحة ومتاحة للجمهور، لأن المهندسين والجمهور سيستخدمون هذه الوثائق كدليل إرشادي أثناء الانتقال الطاقي. حيث أنه في هذه المرحلة قد يتغير مزيج الطاقة وسعر الطاقة بشكل غير منتظم.

5-8 ملخص الفصل

يلخص هذا الفصل العملية الصعبة متعددة الأوجه التي ينطوي عليها تركيب التوربينات، مع التأكيد على الحاجة إلى التخطيط الدقيق الذي يشمل التصميم والنقل والبناء والصيانة المستمرة. هذا مهم بشكل خاص بالنسبة لليمن حيث أن سرعات الرياح المنخفضة تستلزم بناء توربينات كبيرة وعالية المدى يصعب نقلها وبنائها.

في حال كانت اليمن تخطط لاستخدام طاقة الرياح، فإن المرافق الموجودة مسبقاً مثل البنية التحتية للطرق واقتناء المعدات الثقيلة، مهمة لضمان إمكانية

الوصـول والجـدوى. مـن المحتمـل أن تكـون البنيـة الأساسـية للطـرق فـي المنـاطق الجبليـة غيـر ملائمـة لنقـل التوربينـات الكبيـرة وسـتكون هنـاك حاجـة إلى إحـداث تعديلات (مكلفة) على الطرق، مما يؤدي إلى نشوء أعباء مالية على المشاريع.

9. حلول الطاقة المتجددة

فـي هـذا الفصـل، نسـتعرض منهجيـة تصـميم حلـول الطاقـة المتجـددة لكـل موقـع. سنسـتخدم حالـة دراسـة فـي محافظـة تعـز (المخـا) حيـث تتمتـع هـذه المنطقـة بـأعلى إمكانـات الريـاح. تـم تطبيـق المنهجيـة أيضـاً فـي 15 منشـأة ميـاه أخـرى. تـرد فـي الملحق 1 نتائج جميع المنشآت.

9-1 المنهجية

تتكون المنهجية من الخطوات التالية:

- تحديد الاحتياجات من الطاقة والمعلومات المتعلقة بإمدادات المياه
- تحديد خصائص الرياح
- تحديد التكنولوجيا المختارة (التوربينات والبطاريات)
- تقييم الرسم البياني لتقطع الرياح فقط وطاقة الرياح مع استخدام بطارية
- تحديد الخيار الأفضل أداءً
- الجانب المالي (النفقات الرأسمالية، النفقات التشغيلية)
- الجوانب المتعلقة بالبناء

الخطوة 1: الاحتياجات من الطاقة في تعز – المخا

1) الطلب على الطاقة: 120 كيلو وات في الساعة

2) مجموعة الآبار: 4 آبار

3) حجم المياه: 1,224 متر مكعب يومياً

أنظر أيضاً الجدول أدناه.

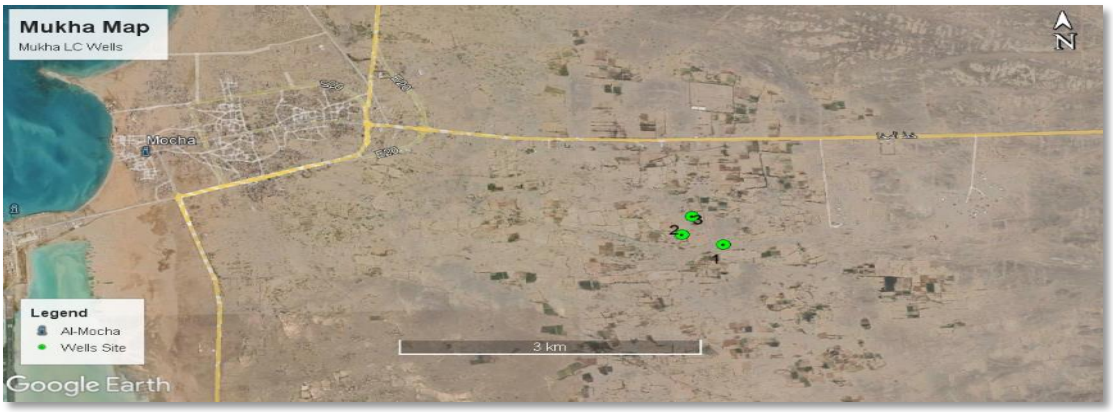
شكل رقم 9-1: تفاصيل منشأة المياه (المصدر: الاستشاري الفرعي المحلي)

NO	Governarate	District	Capacity	Current Status	Applied Load (Total Energy Requirement)
			L/s		Kw
1	Taiz	Mukha	11.7	Working	60
2	Taiz	Mukha	11.7	Working	
3	Taiz	Mukha	11.7	Working	60
4	Taiz	Mukha	7.5	Working	
		Total	42.5		120

توجد في تعز – المخا 4 منشآت مياه حيث يبلغ إجمالي الاحتياجات من الطاقة 120 كيلووات في الساعة وتبلغ القدرة الحالية على ضخ المياه في الثانية 42.5 لتر وتبلغ القدرة الإجمالية 1,224 متر مكعب يومياً.

تنويه: قد تختلف البيانات المقدمة من الاستشاري الفرعي المحلي والعميل بشكل كبير. يحدث هذا لأن الطاقة المحسوبة قد يكون مصدرها مكون كهربائي أصغر أو أكبر. بيانات العميل تم الحصول عليها في عام 2022، في حين أن الاستشاري الفرعي المحلي جمع البيانات في عام 2024. بالتالي، تم اختيار الطلب على الطاقة من بيانات الاستشاري الفرعي المحلي.

شكل رقم 9-2: خريطة آبار المياه في المخا (المصدر: مستشار فرعي محلي)



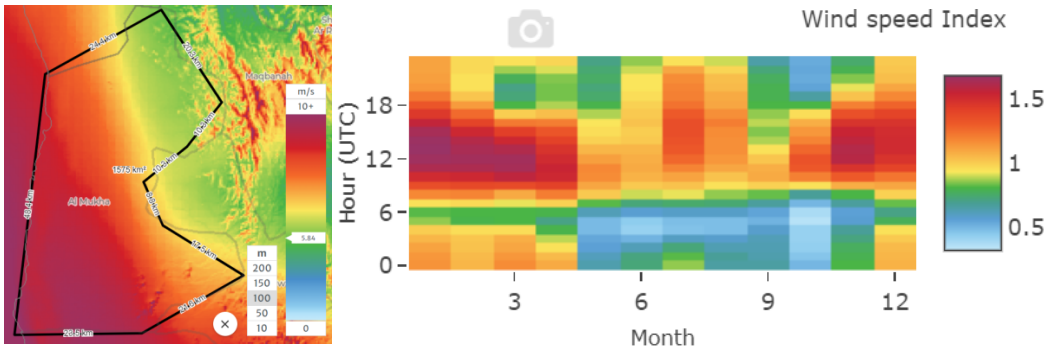
الخطوة 2: خصائص الرياح في تعز – المخا

الخطوات الفرعية:

1) حدد اختيار الموقع الذي تكون فيه الرياح القوية محتملة على أطلس الرياح العالمي على شبكة الإنترنت.
2) اختر منطقة برتقالية إلى حمراء تشير إلى رياح قوية.
3) ثم قم بتنزيل مؤشر سرعة الرياح من المنطقة المختارة.

متوسط سرعة الرياح في 10٪ من المناطق الأكثر رياحاً: 9.54 متر/ثانية

شكل رقم 9-3: خصائص الرياح في تعز – المخا. المصدر: أطلس الرياح العالمي.



تكـون سـرعة الريـاح فـي تعـز – المخـا أقـوى مـن نـوفمبر إلى أبريـل (أثنـاء النهـار)، بينمـا تهـب الريـاح فـي بقيـة العـام بسـرعة معتدلـة مـن السـاعة 6 صـباحاً حتـى منتصـف الليل.

الخطوة 3: المكونات الفنية

توربينات الرياح

بناءاً على متوســط ســرعات الرياح عند ارتفاعات مختلفة، تم تحديد التوربينات ذات ارتفاعات المحور المطلوبة. في حالة تعز – المخا، كان متوســط ســرعة الرياح كافياً عند ارتفـاع 50 متر. عنـد ارتفـاع 100 متر، فـإن التوربينـات من نوع DIRECTWIND900KW و Vestas3.45MW تُعد عملية. نظراً لأن توربين Vestas يتمتع بإنتاجية أعلى، فقد تم اختياره باعتباره التوربين المفضل.

البطارية

يـتم تقـدير سـعة البطاريـة بنـاءاً عـلى الطلـب المتوقـع وعائـد الطاقـة مـن تـوربين الريـاح المختـار. مـن الناحيـة المثاليـة، يجـب أن تكـون السـعة القصـوى للبطاريـة ضـعفي إلى ثلاثة أضعاف الطلب.

يبلغ الطلب على الطاقة في تعز – المخا 120 كيلووات، وبالتالي فإن سعة البطارية المختارة تبلغ حوالي 500 كيلووات. يختلف الطلب في المواقع المختلفة، وستكون خيارات سعة البطارية مختلفة أيضاً.

ملخص تفضيلات التكنولوجيا في تعز – المخا

جدول رقم 9-1: التكنولوجيا المختارة

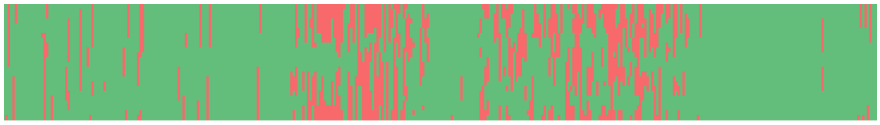
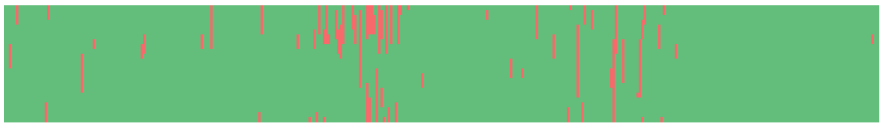
الموقع	تعز – المخا
الطلب على الطاقة	120 كيلووات في الساعة بشكل ثابت
نوع التوربين	Vestas 3.45 ميجاوات
عدد التوربينات	1
سعة البطارية	ليثيوم أيون 500 كيلووات
طاقة البطارية	يُفترض أنها ذات طاقة لا نهائية

الخطوة 4: تقطع الطاقة

يتم تقييم القدرة والطاقة باستخدام رسم بياني للتقطع. تُظهر الأجزاء الخضراء من الرسم البياني للتقطع الأوقات التي يلبي فيها إنتاج الطاقة أو يزيد عن الطلب على الطاقة، بينما تُظهر الأجزاء الحمراء الأوقات التي يكون فيها الطلب على الطاقة أعلى من الإنتاج. يبين الجدول أدناه مقارنة بين الخيارات المختلفة لحالة تعز – المخا. هناك خياران معروضان: توربين بدون بطارية وتوربين مع بطارية.

يُظهر المحور الرأسي الساعات من 00 إلى 23، بينما يُظهر المحور الأفقي اليوم من 1 يناير إلى 31 ديسمبر، كما يتوفر عدد الأشهر لتسهيل القراءة. اللون الأحمر الذي يشير إلى نقص الإنتاج، يعني أن إنتاج الطاقة لا يمكنه تلبية الطلب. اللون الأخضر الذي يشير إلى وقت التشغيل، يعني أن إنتاجية الطاقة يمكنها تلبية الطلب.

جدول رقم 9-2: تقطع مزيج التوربين في حالة تعز – المخا

مزيج الطاقة	تقطع الطاقة
توربين بدون بطارية	
توربين مع بطارية	

الخطوة 5: التقييم المالي

تم حساب النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية للخيار المحدد. تشمل النفقات الرأسمالية للتوربين سعر التوربين والنقل والتركيب والأعمال المدنية (بافتراض الظروف الأساسية، مثل سهولة التضاريس). في حين تم الحصول على سعر التوربين من الشركات المصنعة للتوربينات، تم تقدير الباقي بما في ذلك النفقات التشغيلية على النحو المذكور في الافتراضات الأولية.

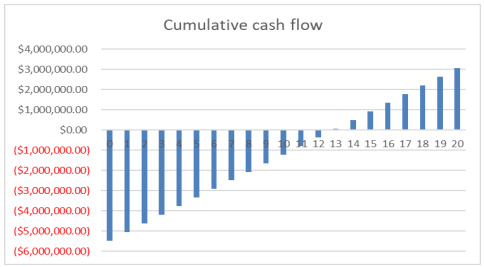
جدول رقم 9-3: النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية لمنطقة تعز – المخا

حساب التكنولوجيا	نسبة سعر التكنولوجيا	Vestas 3.45 ميجاوات
سعر التوربين (دولار أمريكي)	100٪	3.450.000.00 دولار أمريكي

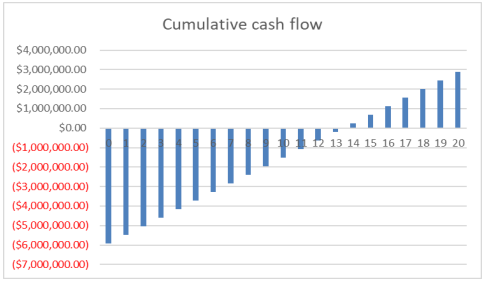
حساب التكنولوجيا	نسبة سعر التكنولوجيا	Vestas 3.45 ميجاوات
النقل	٪6,0	207.000,00 دولار أمريكي
التركيب	٪3,0	103.500,00 دولار أمريكي
شبكة الكهرباء	٪30	1.035.000,00 دولار أمريكي
الأعمال المدنية	٪20	69.000,00 دولار أمريكي
إجمالي النفقات الرأسمالية		5.485.500,00 دولار أمريكي
النفقات التشغيلية لمدة 20 عام	٪3 من النفقات الرأسمالية سنوياً	3.291.300,00دولار أمريكي

يستخدم حساب التدفق النقدي سعر الطاقة في اليمن بواقع 0.05 دولار أمريكي/كيلووات ساعة (راجع نقاط البدء). هذا السعر عرضة للتغيير ويجب تعديله بناءاً على المعلومات الجديدة.

شكل رقم 9-4: التدفق النقدي لمدة 20 عام



شكل رقم 9-5: التدفق النقدي التراكمي للتوربينات والبطاريات



الخطوة 6: الجوانب المتعلقة بموقع التوربين المحتمل في تعز – المخا (أنظر أيضاً الشكل 9-2 والشكل 9-6)

التضاريس

نظراً لمحدودية البيانات المقدمة من الاستشاري المحلي، فقد تم الحصول على معلومات التضاريس من جوجل إيرث وتم التحقق منها من خلال خريطة التضاريس الجبلية من أطلس الرياح العالمي. تتكون التضاريس في تعز – المخا من هضبة يبلغ ارتفاعها 500 متر.

النقل

تقع منطقة التوربين المحتملة بالقرب من الطريق الرئيسي المنطلق من ميناء المخا. لا توجد عوائق مرئية.

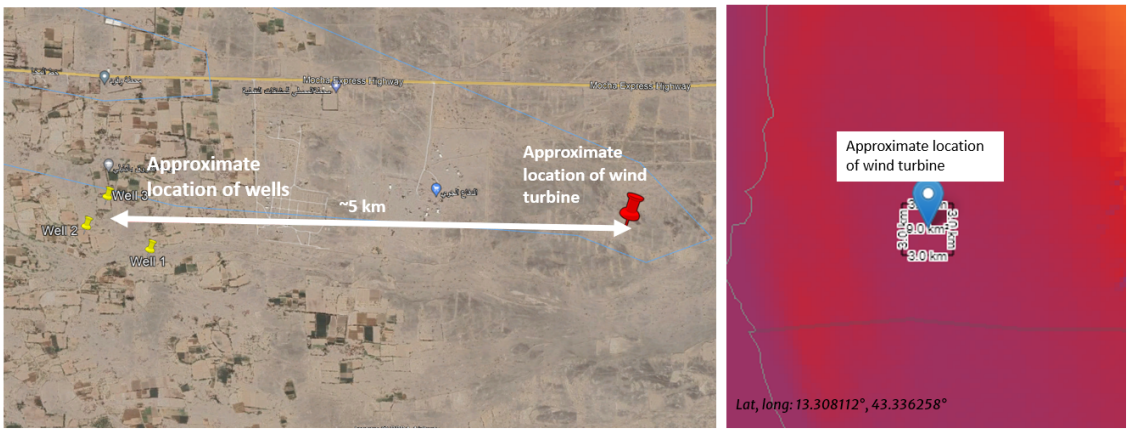
التركيب

إجمالي عدد التوربينات التي سيتم تركيبها هو توربين واحد. يجب أن يكون موقع التوربين مثالياً تهب فيه الرياح أكثر. في حالة المخا، تهب الرياح بقوة بالقرب من شاطئ البحر، وبالتالي يمكن بناء التوربين بالقرب من شاطئ البحر، كما هو موضح في الصورة أدناه.

يمكن تركيب التوربين على مسافة 5 كم من مجموعة آبار المياه. تعتبر هذه المنطقة موقعاً مناسباً لأنها تقع على بعد أكثر من 500 متر من الأحياء أو المباني الأخرى وهي بعيدة عن مطار المخا، الأمر الذي لن يسبب اضطراباً في حركة الملاحة الجوية أيضاً

(Wind Watch، 2010). مع هذه المسافة، يمكن أيضاً قياس خط النقل ليتم بناءه بطول حوالي 5 كم.

شكل رقم 9-6: المنطقة الموصى بها لموقع معدات توربين الرياح في تعز – المخا (جوجل إيرث، 2024)



9-2 ملخص تعز – المخا

سرعة الرياح في تعز – المخا كافية لاعتبار طاقة الرياح مصدراً للطاقة: يمكن أن يغطي إنتاج طاقة الرياح الطلب في معظم الأوقات على مدار العام. كما أنها موقع جيد يسهل الوصول إليه بالقرب من ميناء وطريق رئيسي من شأنه تسهيل نقل التوربينات وأدوات البناء. التضاريس سهلة والمساحة واسعة. كل هذه العوامل مجتمعة تجعل هذا الموقع موقعاً رئيسياً لطاقة الرياح.

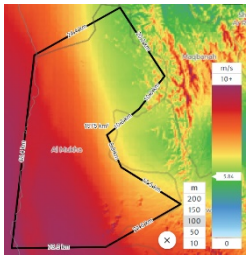
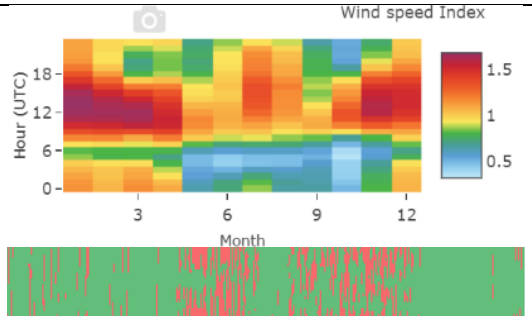
ومع ذلك، فإن النظر في استخدام طاقة الرياح لمحطات إمدادات المياه سيتطلب تقييم المزيد من العوامل مثل التكاليف الاستثمارية وتكاليف الصيانة وتوافر الموظفين المدربين والمعدات المتخصصة.

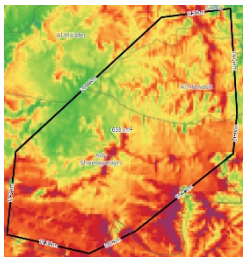
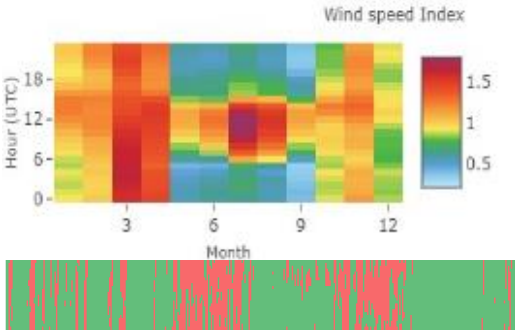
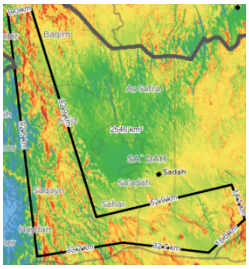
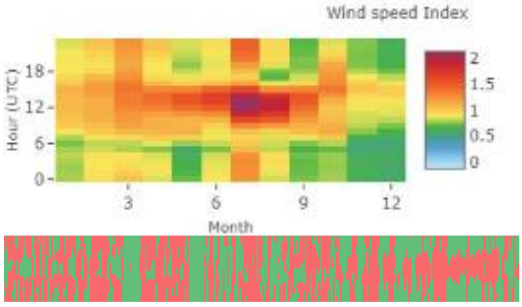
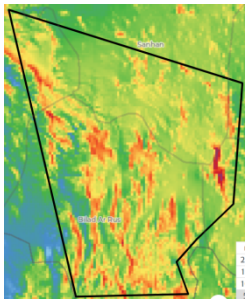
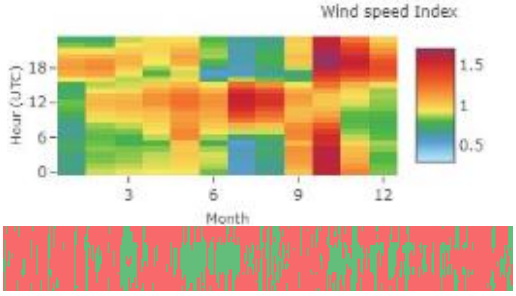
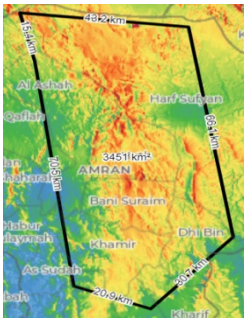
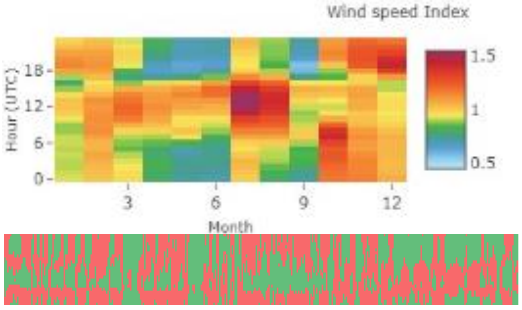
يبين منظور المكونات الفنية والتقديرات المالية أن توربيناً واحداً يكفي، في حين أن العائد على الاستثمار سيأتي بعد 12 عام للتوربين أو للتوربين مع تكوينات البطارية.

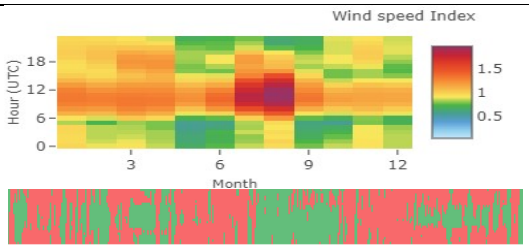
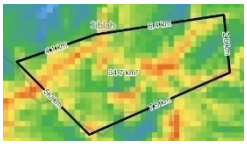
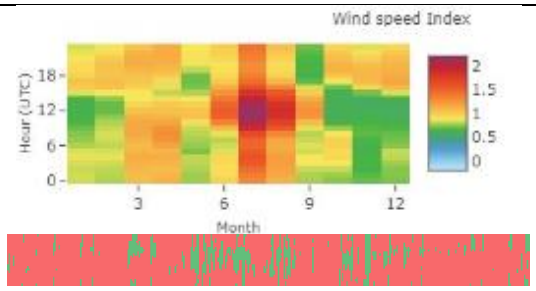
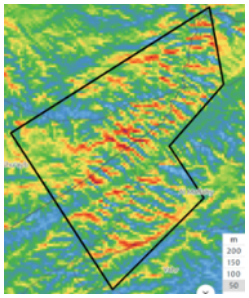
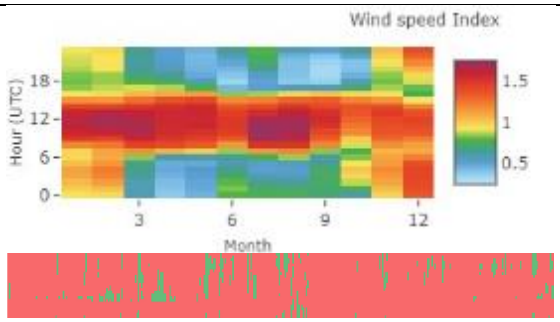
3-9 طاقة الرياح في المواقع الأخرى

يتم تقييم طاقة الرياح لجميع المواقع في اليمن كل على حدة. في حين أن الموقع المصنف الأول في تعز – المخا ينجح جيداً، قد يكون للمواقع الأخرى استنتاج مختلف. بالتالي، تتم محاكاة طاقة الرياح في مواقع أخرى في هذا الجدول، حيث يمكن رؤية الرسم البياني للتقطع ومؤشر الرياح في العمود الأخير. تستند هذه القوائم إلى الموقع المصنف في الفصل السابق، وتقتصر على لحج – المفلحي. تعرض المواقع الأخرى أسفل لحج – المفلحي النمط النموذجي للرسوم البيانية للتقطع بسبب سرعة الرياح المنخفضة جداً.

جدول رقم 9-4 تقطع طاقة الرياح في المواقع الأخرى

رقم	الموقع	خصائص الرياح	التقطع (التوربين فقط) عدد التوربينات = 1 إلى 3
1	تعز – المخا		

رقم	الموقع	خصائص الرياح	التقطع (التوربين فقط) عدد التوربينات = 1 إلى 3
2	مدينة تعز		
3	صعدة		
4	جنوب صنعاء		
5	عمران		

رقم	الموقع	خصائص الرياح	التقطع (التوربين فقط) عدد التوربينات = 1 إلى 3
6	عدن (بير أحمد)		
7	إب – جبلة		
8	لحج - المفلحي		

يبين الجدول أعلاه تقطع طاقة الرياح في 7 مواقع بخلاف تعز – المخا. هذه المواقع هي المناطق الواعدة جداً من بين جميع المواقع. بعد تعديل عدد التوربينات لتلبية الطلب على الطاقة، قام موقع واحد فقط من بين سبعة مواقع (مدينة تعز) بإعداد ملف للطاقة يمكن اعتباره مفيداً إلى حد ما (وإن كان ذلك مع فترات طويلة من ضعف الأداء).

لا تبين الرسوم البيانية للتقطع الخاصة بالمواقع الستة المتبقية تغطية جيدة لتغطية الطلب على الطاقة، وذلك بسبب خصائص الرياح فيها (سرعات الرياح المنخفضة) و / أو الطلب المرتفع للغاية على الطاقة. إضافة المزيد من معدات التوربينات لم تسفر عن أي إمدادات إضافية كبيرة بالطاقة حيث أن سرعات الرياح في تلك المناطق منخفضة والتوربينات لا تعمل بمستوى أدائها الأمثل. في الواقع، فإن إضافة المزيد من التوربينات من شأنها أن تؤدي إلى الإفراط في إنتاج الطاقة خلال الفترات التي تكون فيها الرياح كافية، في حين لم يتم تقصير فترات نقص الإنتاج. باختصار: نظام طاقة غير فعال مع خصائص طاقة متقلبة للغاية.

في المناطق ذات سرعات الرياح الأعلى (والأكثر ثباتاً)، كما هو الحال في تعز، تكون التوربينات أكثر كفاءة ويمكن ضبطها بشكل أفضل لتتواءم مع الطلب على الطاقة. بشكل عام، تنجح طاقة الرياح في اليمن فقط في ظروف الرياح القوية مثل محافظة تعز، وقد تركز المواقع الأخرى ذات سرعات الرياح المنخفضة بشكل أفضل على مصادر الطاقة الأخرى، على سبيل المثال الطاقة الشمسية.

10. الاستنتاجات والتوصيات

10-1 استنتاجات المشروع

توجد رياح كافية في بعض المواقع في اليمن، ولا سيما منطقة تعز التي تتمتع برياح كافية للنظر في مزارع الرياح. مع ذلك، في معظم المواقع الأخرى، قد تصل

التوربينـات عاليـة المـدى (< 100 متـر) فقـط إلى مسـتوى أدائهـا الأمثـل، فـي حـين لا تزال هذه المواقع عرضة لتغيرات يومية وموسمية قوية.

طاقة الرياح ليست الخيار الأول لإمدادات المياه في اليمن:

- فـي معظـم المواقـع، لا تعـد طاقـة الريـاح مصـدراً فعـالاً جـداً للطاقـة لإمـدادات الميـاه بسـبب ارتفـاع التقطـع الموسـمي واليـومي (كثـرة الريـاح أو قلـة الريـاح) بينما يظل الطلب ثابتاً؛
- التحـديات الفنيـة: تتطلـب التوربينـات الكبيـرة معـدات متخصصـة (شـاحنات، رافعـات كبيـرة) وخبـرة. العديـد مـن الطـرق الجبليـة ليسـت مناسـبة للأحمـال الثقيلـة والعريضـة والمقطـورات الطويلـة (يزيـد طـول شـفرات التوربينـات عـن 70 متر)؛
- النفقـات الرأسـمالية: الاسـتثمارات فـي طاقـة الريـاح أعـلى مـن الاسـتثمارات فـي الطاقـة الشمسـية بنحـو 5 – 10 مـرات. كمـا أن تكـاليف الطاقـة الشمسـية آخذة في الانخفاض، في حين أن تكاليف توربينات الرياح آخذة في الارتفاع.

الطاقـة الشمسـية هـي الخيـار الأكثـر ترجيحـاً للطاقـة المتجـددة لإمـدادات الميـاه فـي اليمن:

- أكثر قابلية للتنبؤ في إنتاج الطاقة؛
- انخفـاض النفقـات الرأسـمالية والنفقـات التشـغيلية مقارنـة بتوربينـات الريـاح، وانخفاض التكلفة المستوية للكهرباء؛
- سهولة التوسع والضبط الدقيق للطلب على الطاقة؛

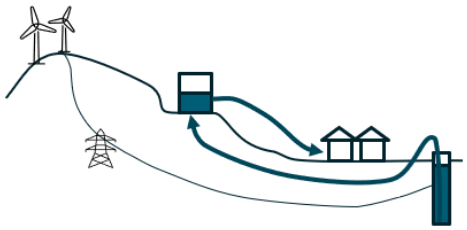
- سهولة نقل (الحاويات) وتركيبها وصيانتها.

الجانب السلبي لألواح الطاقة الشمسية يتمثل في المساحات الشاسعة عندما يكون الطلب على الطاقة مرتفعاً.

البطاريات باهظة الثمن و(بأسعار السوق الحالية) ليست حلاً قابلاً للتطبيق لفترات طويلة من ضعف أداء طاقة الرياح والطاقة الشمسية. قد تعمل البطاريات على تمديد ساعات التشغيل لبضع ساعات، ولكن (من منظور مالي) لا يمكنها سد أيام ضعف أداء الطاقة.

في ظروف محددة، قد يكون تخزين المياه بديلاً جيداً لتخزين الكهرباء (البطارية). خلال فترات زيادة إنتاج الطاقة، يتم ضخ المياه في الخزانات والصهاريج. بعد ذلك، يتم استخدام هذه المياه المخزنة خلال فترات نقص إنتاج الطاقة. يجب أن يكون خزان أو صهريج التخزين موضوعاً على أرض مرتفعة (أو فوق برج) للسماح بتدفق المياه تحت الجاذبية إلى نظام الإمداد. في الشبكات الأصغر حجماً، قد ينجح هذا النظام لأن أحجام المياه المخزنة محدودة. بالنسبة للشبكات الأكبر حجماً، فإن هناك حاجة إلى وجود خزانات أو صهاريج ضخمة. مع ذلك، فإن تخزين المياه (حالياً) أرخص من تخزين الطاقة الكهربائية.

شكل رقم 10-1: مخطط تخزين المياه في شبكة إمدادات المياه



2-10 التوصيات

1-2-10 طاقة الرياح في اليمن

في حين أن طاقة الرياح قد لا تكون الخيار الأول لإمدادات المياه، إلا أن هناك إمكانية لمزارع الرياح في منطقة تعز (على وجه الخصوص) لإنتاج الطاقة. سيكون لبناء مزارع رياح كبيرة في هذه المنطقة مزايا "اقتصاد الحجم". كما أن هذه المنطقة يسهل الوصول إليها ولديها مساحة كافية لمزارع الرياح.

يمكن أيضاً ربط محطات إمداد المياه بشبكة من هذا القبيل، ولكن ينبغي أن يركز إنتاج طاقة الرياح على الاستخدام العام وليس على إمدادات المياه فقط.

قد يكون تشغيل تحلية المياه (التناضح العكسي) بطاقة الرياح خياراً أيضاً لأن هذه العملية تتطلب طاقة ويمكن تكييف تحلية المياه اعتماداً على ظروف الرياح.

الاستخدام المباشر بواسطة توربينات الرياح الميكانيكية لضخ المياه

يمكن أن تكون توربينات الرياح الميكانيكية التي لا تحتاج إلى إمدادات بالكهرباء خياراً للضخ المباشر للمياه الجوفية في المناطق النائية التي تتوفر فيها إمكانات

الريـاح. يمكـن لتوربينـات الريـاح الميكانيكيـة ضـخ الميـاه فـي طبقـة الميـاه الجوفيـة الضحلة وتوزيع المياه مباشرة إلى الشبكة أو الخزان.

المواقـع مـن لحـج إلى أبـين يمكنهـا الاسـتفادة مـن هـذا الخيـار حيـث لا تكـون الريـاح فـي تلـك المنطقـة قويـة بمـا يكفـي لإنتـاج الكهربـاء أو أن الريـاح القويـة قـد تكـون موجـودة بعيـداً عـن خريطـة طبقـة الميـاه الجوفيـة. سيسـمح الاسـتخدام المباشـر بضـخ ميـاه الآبـار إلى خـزان، لكنـه لـن يسـمح بتشـغيل خـط إمـدادات الميـاه. بالتـالي، فإن الاستخدام المباشر مفيد للقرى الريفية النائية التي توجد فيها بئر عامة.

11. المراجع

1) البـراء م. مصـطفى، أ. أ.-م. (2018). تقيـيم المخـاطر الناجمـة عـن تركيـب وصـيانة توربينات الرياح البرية. التقدم في العلوم والتكنولوجيا الهندسية الدولية، 1 – 7.

2) كليفورد، ب. (sd).

3) كليفـورد، ب.، وتريبـرت، ج. (2016). البنيـة التحتيـة للميـاه فـي الـيمن التـي تعرضـت للقصـف: تحقيـق مـن اسـتخبارات المصـادر المفتوحـة. نُشـرت فـي عـام 2024، تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:

https://www.bellingcat.com/news/mena/2016/02/05/yemens-bombed-water-infrastructure/

4) دينـغ، ج. أ. (2017). الإدارة المسـتدامة للميـاه – اسـتراتيجية للحفـاظ عـلى المـوارد المائيـة المسـتقبلية، موسـوعة التقنيـات المسـتدامة، (https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10171-x.)، 91 – 103.

5) فور، هـ. (2018). شبكات مياه الشرب تتعرض لهجمات متكررة في اليمن.

6) Generac. (2024). Generac. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:

https://www.generac.com/Industrial/GeneracIndustrialPower/media/library/Downloads/SBE500-LFP-SpecSheet-2023-v2_1.pdf

7) Givebrite. (2024). Givebrite. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي: https://campaigns.givebrite.com/100-water-wells-4-yemen/jasmine-3151، [تمت زيارته في 24 أبريل 2024].

8) الوكالة الألمانية للتعاون الدولي. (2018). قطاع المياه في اليمن.

9) الوكالة الألمانية للتعاون الدولي. (2018). تقرير تقييم الأضرار التي لحقت بقطاع المياه في اليمن في اثني عشر مؤسسة محلية للمياه والصرف الصحي ومكاتبها الفرعية والمرافق التابعة لها. الوكالة الألمانية للتعاون الدولي.

10) أسعار الوقود العالمية. (2023). أسعار الوقود العالمية. تم استخراجها في عام 2024 من الرابط التالي:
https://www.globalpetrolprices.com/Yemen/electricity_prices/

11) أطلس الطاقة الشمسية العالمي. (2024). أطلس الطاقة الشمسية العالمي. تم استخراجه من الرابط التالي:
https://globalsolaratlas.info/map

12) أطلس الرياح العالمي. (2024). أطلس الرياح العالمي. تم استخراجه من الرابط التالي:
https://globalwindatlas.info/en

13) جوجل إيرث. (2024). تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي: https://earth.google.com/.

14) غن، ج. ف. (1995). الموارد المائية في اليمن. شركة فان دير غن للاستشارات المائية.

15) هيومن رايتس ووتش. (2023). هيومن رايتس ووتش. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:
https://www.hrw.org/news/2023/12/11/yemen-warring-parties-deepen-water-crisis#:~:text=Yemen%20is%20one%20of%20the

16) الاتحاد الدولي لهيئات التصنيف. (2018). إرشادات ومعلومات حول تحميل وتفريغ البضائع السائبة لتقليل احتمالية إجهاد هيكل السفينة بشكل مفرط. في ناقلات البضائع السائبة (ص 1). الاتحاد الدولي لهيئات التصنيف.

17) اللجنة الدولية للصليب الأحمر. (2022، يونيو). اللجنة الدولية للصليب الأحمر. تم استخراجه من رابط اللجنة الدولية للصليب الأحمر: https://www.icrc.org/en/document/water-situation-yemen.

18) مركز النمو الدولي. (2021). تحسين خدمات الكهرباء في اليمن. لندن.

19) وكالة اليابان للتعاون الدولي. (2010). استحداث الطاقة النظيفة عن طريق توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية في الجمهورية اليمنية. في التقرير النهائي.

20) Nations Online. (2024). خريطة اليمن. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:
https://www.nationsonline.org/oneworld/map/yemen-topographic-map.htm

21) نعمان أ، أ. ف. (2019). Fanack Water. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:
https://water.fanack.com/yemen/#_ftn1

22) ReliefWeb. (2021). ReliefWeb. تم استخراجه في أبريل، الجمعة، 2024، من الرابط التالي:
https://reliefweb.int/report/yemen/assessing-impact-war-yemen-pathways-recovery

23) Solar Feeds. (2024). Solar Feeds. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:
https://www.solarfeeds.com/product/skt580600m10/

24) The Water Diplomat. (2022). The Water Diplomat. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:
https://www.waterdiplomat.org/story/2022/01/saudi-attacks-water-facilities-yemen

25) البنك الدولي. (2014). البنك الدولي. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:
https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC?end=2019&locations=YE&start=1990&view=chart [تمت زيارته في 24 أبريل 2024].

26) البنك الدولي. (2021). تم استخراجه في أبريل، الجمعة، 2024، من الرابط التالي:
https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=YE

27) برنامج الأمم المتحدة الإنمائي. (2014). مذكرة سياسات – آفاق الطاقة الشمسية في اليمن (طبعة أولى). الأمم المتحدة.

28) اليونيسف. (2018). دراسة تقييمية وجدوى مشاريع الطاقة الشمسية الحالية وإمكانية توسيع نطاق استخدام أنظمة الطاقة الشمسية لإنتاج المياه في قطاع المياه. اليونيسف.

29) Vestas. (2024). إرشادات النقل. Vestas.

30) Vestas. (2024). منتج Vestas 3.45 - V136 ميجاوات. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:
https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-3-45-MW

31) دليل Vestas. (2006). لوائح السلامة للمشغلين والفنيين V90-3MW/V100-2.75 MW.

32) دليل Vestas. (2024). التصميم الكهربائي المسبق. Vestas.

33) Wind Watch. (2010). Wind Watch. تم استخراجه من الرابط التالي:
https://www.wind-watch.org/documents/wind-turbines-minimum-distances-from-residential-premises-bill/

34) WINDExchange. (2024). WINDExchange. تم استخراجه من الرابط التالي:

https://windexchange.energy.gov/projects/permitting

35) WorldData .(2023) .WorldData. تم استخراجه في عام 2024 من الرابط التالي:

https://www.worlddata.info/asia/yemen/climate.php

لـكل طفل،

من ما كانت هي.

أينما يعيش.

كل طفل يستحق الطفولة.

مستقبل.

فرصة عادلة.

ولهذا السبب تتواجد اليونيسف هناك.

لكل طفل.

نعمل ليل نهار.

في أكثر من 190 دولة وإقليم.

لنصل إلى الأصعب وصولاً.

الأبعد عن المساعدة.

الأكثر استبعاداً.

ولهذا السبب نبقى حتى النهاية.

ولا تستسلم أبدًا.

يونيسف
لكل طفل

© صندوق الأمم المتحدة الدولي لرعاية الطفولة (يونيسف اليمن) أكتوبر 2024