

جامعة قاصدي مرياح ورقلة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم فيزياء



مذكرة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص: فيزياء طاغوية و الطاقات المتجددة

مقدمة من طرف الطالبين: بن رزق الله أنفال - بوخلوف آمنة

بعنوان:

الدراسة آيروديناميكية لتصميم شفرة توربين رياح ذو محور أفقي  
صغير مناسب للظروف المحلية لمنطقة ورقلة

نوقشت يوم 2021/06/17 أمام لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	أستاذ التعليم العالي	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	بشكي جمال
مناقشا	أستاذ مساعد - أ-	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	تخة محمد
مشرفا	أستاذ مساعد - أ-	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	الزين عبد الله
مساعد	أستاذ محاضر - أ-	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	سوداني محمد البار

الموسم الجامعي: 2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{ { وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ يُرْسِلَ الرِّيَّاحَ مُبَشِّرَاتٍ وَلِيُذِيقَكُمْ  
مِنْ رَحْمَتِهِ وَلِتَجْرِيَ الْفُلُكُ بِأَمْرِهِ وَلِتَبْتَغُوا مِنْ فَضْلِهِ  
وَلَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ } }

صدق الله العظيم

سورة الروم الآية {46}

## الإهداء

الحمد لله حمدا لا حدود له، الحمد لله إسراراً وإعلاناً، الصلاة والسلام على الحبيب المصطفى

صلى الله عليه وسلم

أسافر بقلمى وأثر حبره في ملتقى طريق من مهدوا لي سبل الحياة، نسجوها بخيوط العمر هازمين جاهدت أمتى

جيوش عقود من المطبات لأهدي لهم عملي المتواضع هذا وفاء وعرفانا ...

كم إليه لجأت أطلب دفننا فاحتوايتي كغابة السنديان، ومهد لي طريق العلم أعطى فأجزل العطاء، إلى من أحمل اسمه وكلي فخر..... إلى بابا حبيبي.

إلى كلي اللتان أنا وعضهما، إلى زهرتا الفل بين شقائق النعمان، إلى نجمتا الدجى إلى صدر العنان إلى هبه الرحوان، إلى من حباني الله بهما فوادة على اليمين تشق السبيل والأخرى على الشمال ترقع النسيان، إلى من طردتْ خَفَوْهُمَا خارج الأجنان أبشركما إجنوا ما زرعتم هاهو يوم الحصاد..... إلى أماتي حبيبتاتي

إلى من وهبونيهم وأمدومهم لنا خير إعداد، إلى أجدادي رحمهم الله وأنعمهم في فسح جناته

إلى روجي وضيء ميونتي، إلى سندي وعضدي وظهري، إلى أولى بشائر أبي "جيلة"، إلى بسمة ثغري "رجاب"، إلى نبراس ميونتي "نورهان" وآخر العنقود "رجاء"

إلى أخي وحيدتي ونبيذ قلبي "يوسف" شفاه الله وعفاه وأحاطه بعنايته الربانية ورعاه، وسخر له جنود الأرض والسماء وأجزل عليه من فيض رحمته من أرضه إلى سابع سماه

إلى أجداد أخواتي فراهات بيتنا "زهر"، "جنى" و"حلا" والمشاكسين الصغار "أحمد"، "كريم" و"أويس"

إلى إخوتي الذين لم تلدهم أمي بوجراة سمية، بن عثمان كوثر، بوخوفه آمنة

إلى أصدقائي كل باسمه سباق فتية حبيبتتي، عزوزي وسام، فضل فاطمة، محبيدي سعد سمية، بن كران أمينة، رمضان فريال

بكل حرفه من حروفه هذا البحث لكم إهدائي

أنفال بن رزق الله

## الإهداء :

أهدي عملي المتواضع بعد شكر الله تعالى لتوفيقه لنا على إتمام هذا العمل  
إلى من حدا الأشواق و نذرا عمرهما ليهددا لي طريق العلم و المعرفة أمي و أبي  
إلى إخوتي أسامة و سلسبيل و أنفال و المشاكس الصغير عيسى و فقههم الله في مشوارهم  
الدراسي

و أختاي سارة و سلاف و إبنتها الصغيرة ندى أمانهما الله في تحقيق غايتيهما  
إلى أعم صديقتاي رفيقتا المشوار الدراسي فتيحة سباق و أنفال بن رزق الله  
إلى كل عائلتي عكاز و بوخلوفه

إلى كل من علمني حرفا أصبح سنا بركة يضيئ الطريق أمامي  
إلى كل هؤلاء و هؤلاء أهدي هذا العمل المتواضع و نسأل الله أن يجعله نبراسا لكل  
طالب علم

أمينة بوخلوفه

# الشكر والعرفان

الشكر أولاً و أخيراً ظاهراً وباطناً للذي خلق السماء بلا عمد، للذي علم الإنسان بالقلم، الذي وفقنا لإتمام هذا البحث وهياً لنا من الأسباب ما ساعدنا على إخراج هذه الكيفية التي هو عليها الآن له الحمد و الشكر

أسمى آيات الشكر و العرفان لأستاذينا القديرين

د. سوداني محمد البار و د. الزين عبد الله

اللذان تكرما على هذا البحث فكانت توجيهاتهما سديدة و كانا اكبر معينين ومشجعين لنا  
في إكمال هذا البحث نسأل الله ان يحفظهما ويوفقهما لمزيد من العطاء

أما خالص الشكر و أجرله للأستاذ

خليل دغوم - جامعة الوادي

الذي لا توجد كلمات توفيه حقه فقد دعمنا بكل أنواع الدعم المعنوي و العلمي فكان لنا  
خير معين بعد الله سائلين له المولى أن يحفظه ويوفقه لمزيد من العطاء ويسد خطاه  
وشكراً لكل من ساعدنا على إتمام هذا البحث حجاج عبد السميع و د. مبارك عبد اليمين و د.  
تليلى صالح و غيرهم سواء بالنصح أو التوجيه أو بتزويدنا بالمعلومات أو بالدعاء لنا بالتوفيق

جزاكم الله عنا خيراً



## قائمة الرموز و الاصطلاحات

الوحدة	الاصطلاحات (الرموز اللاتينية)	الرموز
$W$	الطاقة الاسمية للمولد	$P$
-	معامل قدرة التوربين	$C_p$
-	معامل الضغط	$C_p$
$kg/m^3$	الكتلة الحجمية للهواء	$\rho$
$m/s$	سرعة الرياح المقدره	$V_r$
$m$	نصف قطر الشفرة	$R$
$m$	سرعة الرياح النسبية	$U_{Rel}$
$m$	طول وتر الشفرة	$C$
$m^2/s$	اللزوجة الحركية للهواء	$\nu$
$m^2$	مساحة الإحتياج	$S$
$N$	القوة المحورية للرياح على الجزء المتحرك	$T$
$Pa$	الضغط عند الجزء المتحرك	$p$
$m/s$	سرعة تدفق الهواء عبر الجزء المتحرك	$V$
$w$	الإستطاعة المستخرجة من الريح	$P$
$Kg/s$	التدفق الكتلي للهواء عبر الجزء المتحرك	$\dot{m}$
-	معامل التداخل المحوري (الضياح المحوري)	$a$
-	معامل التداخل العرضي	$a'$
$rad/s$	السرعة الزاوية لدوران الهواء على مستوى الدوار	$\Omega$
$m$	القوة العرضية المؤثرة على الشفرة	$F_t$
$N$	عزم الدوران المتولد	$Q$
$rad/s$	السرعة الزاوية لدوران الدوار	$\Omega$
$m/s$	سرعة الهواء النسبية	$W$
$N$	قوة الرفع	$L$
$N$	قوة السحب	$D$
-	معامل الرفع	$C_l$
-	معامل السحب	$C_d$
$N$	القوة العرضية الأولية المؤثرة على شفرة واحدة	$dF_x$
$N$	القوة المحورية الأولية التي تمارس على شفرة واحدة	$dF_y$
-	عدد الشفرات	$N_p$

<i>Deg</i>	الزاوية النسبية المحلية للهجوم	$\emptyset$
<i>Deg</i>	زاوية الهجوم	$\alpha$
<i>Deg</i>	زاوية الالتواء	$\beta$
-	معامل الصلابة المحلي	$\sigma$
-	عامل تقليل حركة المرور	$F$
<i>rad/s</i>	الدوران الفعال للشفرة عند دائرة نصف قطرها	$r$
<i>rad/s</i>	دوران المروحة التي تحتوي على عدد لا نهائي من الشفرات	$\Gamma_{\infty}$
-	السرعة المحددة (نسبة السرعة)	$\lambda$
-	السرعة المحلية المحددة	$\lambda_r$
<i>m</i>	نصف القطر المحلي	$r$
<i>m</i>	طول الوتر المحلي للشفرة	$C_r$
-	القيمة المثلى لمعامل الرفع	$C_L$

المعنى	المصطلح	الإختصار
نظرية زخم عنصر الشفرة	Blade Element Momentum Theory	BEMT
توربين ذو محور أفقي	Horizontal-axis wind turbine	HAWT
توربين ذو محور عمودي	Vertical-axis wind turbine	VAWT
ديناميكيات الموائع الحاسوبية	Computational fluid dynamics	CFD
اللجنة الكهروتقنية الدولية الخاصة بتوربين الرياح الصغير	International Electrotechnical Commission for Wind Turbine	IEC 61400-2
مصلحة الأرصاد الجوية	Meteorological	METEO
متوسط سرعة الرياح السنوي	Average monthly wind speed	AMWS
برنامج تصميم بمساعدة الكمبيوتر	Comception assistes par ordinateur	C.A.O
المكتب الوطني للأرصاد الجوية	Office national de la Météorologie	ONM

## الفهرس

I.....	سورة الروم الآية {46}
II.....	الإهداء
V.....	الشكر و العرفان
VI.....	قائمة الرموز و الاصطلاحات
XI.....	قائمة الجداول
XII.....	قائمة الأشكال
VII.....	المقدمة العامة

### الفصل الأول: البحث في المراجع

2.....	مقدمة
2.....	1-I) التطور الرياضي لعلم ميكانيك الموائع
3.....	2-I) المعادلات الأساسية للموائع
3.....	1-2-I) المعادلات الأساسية للموائع القابلة للانضغاط
4.....	1-1-2-I) معادلة حفظ الكتلة
5.....	2-1-2-I) معادلة حفظ كمية الحركة
7.....	3-1-2-I) معادلة حفظ الطاقة
9.....	2-2-I) المعادلات الأساسية للموائع الغير قابلة للانضغاط
9.....	1-2-2-I) معادلة حفظ الكتلة
9.....	2-2-2-I) معادلة حفظ كمية الحركة (الزخم)
10.....	3-2-2-I) معادلة حفظ الطاقة
10.....	خاتمة

### الفصل الثاني: أنظمة طاقة الرياح

12.....	مقدمة
12.....	1-II) تاريخ طاقة الرياح
13.....	2-II) مستوى سرعة الرياح في الجزائر
15.....	3-II) طاقة الرياح
15.....	1-3-II) تشغيل بسرعة ثابتة
15.....	2-3-II) تشغيل بسرعة متغيرة
16.....	4-II) مصدر الرياح
17.....	5-II) مكونات توربينات الرياح
17.....	1-5-II) القاعدة



17.....	2-5-II) البرج
18.....	3-5-II) علبة السرعة (الحاوية)
18.....	4-5-II) الدوار و الشفرات
18.....	5-5-II) حجرة التشتت
18.....	6-II) مبدأ تشغيل توربينات الرياح
18.....	1-6-II)الرياح
18.....	2-6-II) توجيه التوربينات حسب اتجاه الرياح
19.....	3-6-II) تنظيم التوربينات من أجل السرعات القوية
20.....	4-6-II)الطاقة الناتجة عن توربين الرياح
20.....	7-II) تصنيف توربينات الرياح
20.....	1-7-II) توربينات الرياح ذات المحور الأفقي (HAWT)
21.....	1-1-7-II) توربينات مواجهة لإتجاه الرياح (المنبع)
21.....	2-1-7-II) توربينات معاكسة لإتجاه الرياح (المصب)
22.....	2-7-II) توربينات الرياح ذات المحور الرأسي (VAWT)
22.....	1-2-7-II) دوار Savonius
23.....	2-2-7-II) دوار Darrieus
24.....	8-II) تقييم إمكانات الطاقة
24.....	1-8-II) الطاقة التي توفرها الرياح
25.....	2-8-II) أقصى طاقة قابلة للاسترداد
26.....	3-8-II) الإستطاعة القابلة للإستخدام
26.....	4-8-II) الإستطاعة المفيدة
27.....	5-8-II) معامل قدرة التوربين $C_p$
27.....	6-8-II) السرعة المحددة $\lambda$
28.....	9-II) عيوب و مزايا طاقة الرياح
28.....	1-9-II) عيوب
28.....	2-9-II) مزايا
29.....	10-II) الأوصاف الديناميكية الهوائية لشفرة توربين الرياح
29.....	1-10-II) هندسة شفرة توربينات الرياح
30.....	2-10-II) تعريف الزوايا حول الشفرة
31.....	3-10-II) الخصائص الديناميكية الهوائية لشفرة توربين الرياح
31.....	1-3-10-II) القوى العاملة في ملف الشفرة
32.....	2-3-10-II) معامل الضغط
33.....	11-II)الخصائص الهندسية وتسمية الملف الشخصي

33.....	11-II-1) الخصائص الهندسية
34.....	11-II-2) ملامح الشفرة
35.....	11-II-3) الشفرات من نوع NACA
35.....	11-II-3-1) ملف شخصي مكونة من أربعة أرقام
35.....	11-II-3-2) الملف الشخصي من خمسة أرقام
35.....	الخاتمة

### الفصل الثالث: الدراسة الديناميكية الهوائية لشفرة توربين الرياح ذات المحور الأفقي بقدرة 5 kW

37.....	مقدمة
37.....	1-III) دراسات مماثلة
38.....	2-III) نظريات الديناميكا الهوائية
39.....	1-2-III) نظرية الزخم المحوري (بيتز)
42.....	2-2-III) نظرية زخم عنصر الشفرة
47.....	3-III) الحجم الأمثل للشفرات للحصول على أقصى طاقة
49.....	1-3-III) حساب الشكل الأمثل للشفرة
51.....	4-III) تصميم سرعة الرياح و سرعة الرياح المقدره
52.....	5-III) طول الشفرة
53.....	6-III) رقم رينولدز
54.....	7-III) النموذج التحليلي
56.....	الخاتمة

### الفصل الرابع: محاكاة الدراسة الديناميكية الهوائية و تصميم الشفرة

58.....	مقدمة:
58.....	1-IV) تحديد المعاملات الهندسية لشفرة توربين الرياح
59.....	1-1-IV) تلخيص الخطوات
59.....	2-1-IV) المخطط السهمي
60.....	2-IV) مناقشة نتائج Matlab
60.....	1-2-IV) توزيع زاوية الإلتواء $\beta(r)$
61.....	2-2-IV) توزيع الوتر $C(r)$
62.....	3-IV) برنامج SolidWorks
62.....	4-IV) تحديد إحداثيات ملف تعريف الشفرة NACA 4412
63.....	5-IV) خطوات تصميم الشفرة في برنامج SolidWorks
66.....	6-IV) المحاكاة في برنامج ANSYS
68.....	1-6-IV) توزيع السرعة و الضغط حول كل مقطع

71.....	IV-6-2) توزيع معامل الضغط لكل مقطع على طول الشفرة.....
72.....	IV-7) حساب الإستطاعة المنتجة من الشفرة.....
74.....	الخاتمة.....
76.....	الخاتمة العامة.....
78.....	المراجع.....
83.....	الملحقات.....

## قائمة الجداول

- الجدول (1-III): أرقام رينولدز المقدرّة في سرعة رياح عملية مختلفة.....53
- الجدول (1-IV): توزيع الوتر و زاوية الإلتواء على طول الشفرة.....63
- الجدول (2-IV): جدول معطيات شفرة توربين الرياح المدروسة.....73
- الجدول (3-IV): الإستطاعة المنتجة حسب مساحة الإجتياح.....73

## قائمة الأشكال

- الشكل (II-1): تقدير أطلس متوسط سرعة الرياح في الجزائر بحوالي 10 أمتار فوق سطح الأرض.....13
- الشكل (II-2): رسم الخرائط الشهرية لمتوسط سرعة الرياح للشهور الأكثر شدة على إرتفاع 10 m من الأرض بـ (m/s)..14
- الشكل (II-3): تحويل طاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية.....15
- الشكل (II-4): القوة النظرية المتاحة في توربينات الرياح.....16
- الشكل (II-5): مخطط لكيفية نشأة الرياح.....16
- الشكل (II-6): توربينات الرياح الكلاسيكية.....17
- الشكل (II-7): حساس سرعة و إتجاه الرياح.....19
- الشكل (II-8): توربينات الرياح ذات المحور الأفقي.....21
- الشكل (II-9): أنواع توربينات الرياح ذات المحور الأفقي.....21
- الشكل (II-10): أنواع توربينات الرياح ذات المحور الأفقي.....22
- الشكل (II-11): توربينات الرياح من نوع savonius.....23
- الشكل (II-12): أنواع توربينات الرياح من نوع Darrieus.....23
- الشكل (II-13): منطقة إحتياج HAWT.....24
- الشكل (II-14): رسم تخطيطي للطاقة المفيدة كدالة لسرعة الرياح.....25
- الشكل (II-15): معامل القدرة لأنواع مختلفة من توربينات الرياح.....27
- الشكل (II-16): المقطع الطولي لريش توربينات الرياح.....29
- الشكل (II-17): توزيع الضغط على الجنيح.....30
- الشكل (II-18): تحديد الزوايا على الشفرة.....30
- الشكل (II-19): القوى العاملة في الملف الشخصي.....31
- الشكل (II-20): توزيع الضغط حول الملف الشخصي Aerofoil بإستعمال cp.....32
- الشكل (II-21): الخصائص الهندسية للملف الشخصي.....33
- الشكل (II-22): مظاهر مختلفة للشفرة.....34

- الشكل (III-1): مخطط يوضح الدراسات السابقة المشابهة للموضوع..... 37
- الشكل (III-2): تدفق الهواء المحوري ..... 39
- الشكل (III-3): تدفق الهواء عبر عنصر حلقي ..... 42
- الشكل (III-4): مقطع من عنصر من الشفرة في دائرة نصف قطرها  $r$  ..... 44
- الشكل (III-5): سرعة الرياح المتوسطة لمنطقة ورقلة على بعد 10m حسب GLOBAL WIND ATLAS ..... 52
- الشكل (III-6): الجنيح NACA 4412 ..... 54
- الشكل (III-7): منحنى يمثل معامل الرفع بدلالة معامل السحب ..... 55
- الشكل (III-8): منحنى يمثل معامل السحب بدلالة  $\alpha$  ..... 55
- الشكل (III-9): منحنى نسبة معامل الرفع إلى معامل السحب بدلالة  $\alpha$  ..... 55
- الشكل (IV-1): نموذج عنصر الشفرة ..... 58
- الشكل (IV-2): مخطط إنسيابي لطريقة تحديد الشكل الأمثل للشفرة ..... 60
- الشكل (IV-3): توزيع زاوية الإلتواء المثالية على طول الشفرة للملف NACA 4412 ..... 61
- الشكل (IV-4): توزيع الوتر المثالي على طول الشفرة للملف NACA 4412 ..... 61
- الشكل (IV-5): واجهة برنامج SolidWorks ..... 62
- الشكل (IV-6): ملف تعريف جنيح NACA4412 للشفرة ..... 63
- الشكل (IV-7): توزيع ملامح ملف تعريف الأسطح على طول الشفرة في الفضاء ..... 64
- الشكل (IV-8): تغير زاوية الإلتواء و طول الوتر لشفرة توربين الرياح في الفضاء ..... 64
- الشكل (IV-9): نافذة وضع التجميع في برنامج SolidWorks ..... 65
- الشكل (IV-10): ربط المقاطع لتشكيل الشفرة ..... 65
- الشكل (IV-11): ربط الملامح بجذر الشفرة ..... 66
- الشكل (IV-12): الشكل النهائي لشفرة الرياح بطول 4.5 متر ..... 66
- الشكل (IV-13): الإطار المرجعي المتحرك لمنطقة المحاكاة حول شفرة توربين الرياح ..... 67

- 67.....الشكل(IV-14): المجال الشبكي المستخدم في المحاكاة.....
- 68.....الشكل(IV-15): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=0.7$ .....
- 68.....الشكل(IV-16): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=1.650$ .....
- 68.....الشكل(IV-17): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=2.6$ .....
- 69.....الشكل(IV-18): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=3.55$ .....
- 69.....الشكل(IV-19): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=4.5$ .....
- 69.....الشكل(IV-20): توزيع الضغط و السرعة على نطاق المحاكاة.....
- 71.....الشكل(IV-21): توزيع معامل الضغط على طول الشفرة بالنسبة لمحيط ملف NACA 4412.....
- 74.....الشكل(IV-22): منحني يبين الإستطاعة المنتجة حسب مساحة مقطع الإجتياح.....

# المقدمة العامة



## المقدمة العامة:

تعتبر الطاقة عصب الحياة ولا يمكن الاستغناء عنها، فهي أحد محركات تنمية الأمم والمجتمعات إقتصاديا. إنّ معرفة الإنسان بأهمية وفائدة الطاقة يتطور مع تراكم تجاربه اليومية فاعتمد الإنسان الأول على طاقته الجسدية وتطورت معرفته إلى استخدام طاقة المياه من خلال الآلة البخارية وبدأ باستخدام الآلة بإعتماده على الفحم و النفط كمصدرين للطاقة.

لقد تضاعفت حاجة الإنسان للطاقة منذ الثورة الصناعية، فقد تم بناء الحضارة الصناعية بإستغلال الفحم في نهاية القرن الثامن عشر، ثم النفط في منتصف القرن العشرين، ومنذ ذلك الحين يتزايد الاستهلاك العالمي للطاقة بقوة كبيرة في العالم. بسبب حاجتنا المتزايدة لها. و نظرا لما تسببه المصادر الأحفورية المعرضة للنفاد من ظواهر سلبية و كوارث ضارة بالبشر والطبيعة (كالإحتباس الحراري، التلوث الصناعي المتنوع و غيرها ) و مع حدوث أزمة النفط عام 1973 أدى إلى تسريع قرار الدول الصناعية للبحث عن مصادر أخرى للطاقة كالطاقات المتجددة مثل طاقة الشمس و الرياح وغيرها من المصادر النظيفة بدلا من التوجه لتقليل الإستهلاك أو تحسين إنتاجية توليد الطاقة من المصادر الغير متجددة. الطاقة المتجددة أغلبها مستمدة من الشمس ما يعني إستدامتها و توفرها في جميع أنحاء المعمورة لذلك هي الطاقة المستقبلية [1, 2].

أظهرت الإحصائيات في مجالات الطاقة المتجددة أن تقنية استخدام الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية هي أسرع مصادر توليد الكهرباء الجديدة نمواً على الصعيد العالمي [3]، و طبقا لتقرير الوضع العالمي للطاقة المتجددة الصادر في يوليو 2011 عن شبكة سياسات REN-21 تأتي طاقة الرياح الثانية في نجاحها طبقا لنضجها من الناحيتين الفنية و الاقتصادية بعد طاقة المساقط المائية و كون محطاتها اقل مستوى في انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون مقارنة بالطاقة النووية [4]. و قد أشارت إحدى الدراسات الهامة التي أجريت في ألمانيا عام 2003 أن الامكانيات الفنية و التكنولوجية الحالية لطاقة الرياح عالميا برا و بحرا تستطيع نظريا أنتاج نحو 278000 تيرا واط ساعي سنويا و ذلك بعد إستبعاد الأراضي الغير صالحة، و بإفتراض الإستفادة الفعلية من 10 الى 15% فقط من هذه الطاقة فسيمكن توليد 39000 تيرا واط ساعي سنويا و هو ما يزيد عن ضعف إحتياجات العالم حاليا من الكهرباء [4].

إن توليد الكهرباء في شمال إفريقيا باستخدام مصادر الطاقة المتجددة موجودة منذ القرن العشرين، لكن الفكرة اكتسبت زخماً مؤخرًا في السنوات الأخيرة من خلال العديد من الخطط الرئيسية، مثل مبادرة ديزيرتيك الصناعية، حيث يظل تسخير طاقة الرياح والطاقة الشمسية هو الخيار الأكثر ترجيحًا في شمال أفريقيا [1, 5]. مع العلم أن دول هذه المنطقة من القارة لديها مستويات عالية من الإشعاع الشمسي، والهدف من هذه الخطط الصناعية هو إنشاء قواعد جديدة لإنتاج الطاقة من مصادر متجددة باستخدام الشمس والرياح حول الحوض البحر الأبيض المتوسط [6].

إمكانات الطاقة المتجددة في الجزائر هي الأكبر في شمال إفريقيا [7]. وإدراكاً لهذه التحديات، فقد أدمجت الجزائر تطوير الطاقات المتجددة في سياسة الطاقة الخاصة بها، و عليه فإن سوق الطاقات المتجددة واعد و يشكل الترويج لها أحد محاور سياسة الطاقة والبيئة في الدولة. ومن بين الأهداف التي حددتها السلطات العمومية، رفع حصة الكهرباء التي تنتجها الطاقات المتجددة من 60 تيرا واط ساعي نسبته 15% في سنة 2020 إلى إنتاج 160 تيرا واط ساعي بنسبة 40% بحلول سنة 2030 من إجمالي الكهرباء المنتجة [8, 9]. أما الأهداف التي حددتها شركة NEAL (الطاقة الجديدة الجزائر) هي التركيز على زيادة إنتاج الطاقة من المصادر المتجددة إلى 1400 ميغا واط بحلول عام 2030 و 7500 ميغا واط بحلول عام 2050. حديثاً، و قد توصل بودغن سطمبولي Budghn Stambouli بعد الدراسة التي قام بها أن للجزائر إمكانات قوية لإستخدام الطاقات المتجددة بوجود إمكانات قوية في الجزائر لاستخدام مصادر الطاقة المتجددة [10]. على وجه الخصوص الطاقة الشمسية وطاقة الرياح التي تنتج انبعاثات أقل من غازات الاحتباس الحراري [11].

يمكن لطاقة الرياح أن تكون بديلاً عن الطاقة الشمسية عند غياب الشمس بسبب الغروب أو الغيوم خاصة في المناطق التي تتوفر فيها هذه الطاقة في أغلب أيام السنة ومن بينها منطقتنا ورقلة، حيث يبلغ معدل سرعة الرياح السنوي 5 m/s، و من المتوقع أن يصل إنتاج الطاقة الكهربائية من الرياح في الجزائر سنة 2030 إلى 1700 ميغا واط من خلال مختلف المحطات المشتغلة فعلياً و المبرجة [9].

يهدف عمل هذه المذكرة إلى دراسة توربين الرياح الصغير و إمكانية إنشاء توربين الرياح في منطقة ورقلة، حيث تتمثل دراستنا في وصف النظريات الديناميكية الهوائية لتوربينات الرياح ذات المحور الأفقي و تقديم نهج علمي لسلوك الهواء حول الشفرة لتحسين حجمها و الوصول إلى تصميم الشكل الأمثل لشفرة توربين الرياح ذو القدرة 5 كيلو واط في منطقة ورقلة. لبدأ هذه الدراسة قمنا بتقسيم هذا العمل إلى أربعة فصول ملخصة كالتالي :

سيخصص الفصل الأول للبحث في المراجع، بداية سيتم التعرف على تطور علم ميكانيك الموائع بعدها برهان المعادلات الأساسية للموائع الإنضغاطية و اللانضغاطية.

و في الفصل الثاني سيتم تقديم عموميات حول توربينات الرياح تحديداً حول توربينات الرياح ذات المحور الأفقي، بداية يتم التعرف على تاريخ تطور طاقة الرياح و إمكانات الرياح في الجزائر و وصف الأساسيات الرئيسية لتوربين الرياح و مبدأ عملها و الأوصاف الديناميكية الهوائية لشفرة التوربين.

أما الفصل الثالث المخصص لعرض و تطوير نظريات الديناميكا الهوائية، الأولى هي نظرية التدفق المحوري (بدون خسائر) و الثانية هي نظرية الزخم لعنصر الشفرة BEMT، هذه النظريات أساسية لتحديد المعاملات الأيروديناميكية لتوربين الرياح.

في الفصل الأخير و بإستعمال برنامج 'Matlab' يتم الحصول على المعاملات الأيروديناميكية، ثم يتم إستخدامها في تصميم الهيكل المثالي لشفرة التوربين بإستعمال برنامج 'Solidworks' عندها يسهل محاكاتها في برنامج ANSYS و دراسة تأثير الضغط و سرعة الرياح و معامل الضغط.

# الفصل الأول:

بحث في المراجع

## مقدمة:

للموائع أهمية كبيرة في الحياة فالهواء و الماء و الدم كلها عبارة عن موائع، وبدون فهم دقيق لسلوك الموائع لا يمكننا أن نفسر كثير من الأشياء المحيطة بنا و الظواهر الفيزيائية التي تحدث حولنا. لذلك وجب علينا الولوج لعلم الميكانيكا الكلاسيكية و هو العلم الذي يهتم بدراسة الحركة و مسبباتها أي دراسة القوى و ردود الافعال، يعتبر ميكانيكا الموائع فرع من فروعها و يهتم بدراسة المواد القابلة للتشوه عند تعرضها للإجهادات، حيث يمكن التفريق بين المائع و المادة الصلبة حسب قابلية المادة للتشوه أو مقاومة تأثير إجهادات القص.

و لأجل هذه الدراسة وجب التطرق لسرد تاريخي لتتابع الأبحاث العلمية و مساهمة العلماء في إنشاء البنية الرياضية لهذا الفرع الذي يعتبر أحد العلوم ذات الطبيعة التجريبية و النظرية. كما ساعدت هذه الأبحاث العلمية في صياغة المعادلات الأساسية لحركة الموائع.

## I-1) التطور الرياضي لعلم ميكانيك الموائع:

إن هذا التطور و الإهتمام بعلم ميكانيك الموائع تعود بداياته إلى الحضارات القديمة (المصرية، بلاد الرافدين...)، بداية من دفع الرماح و السهام في الهواء إلى تطوير أنظمة إمدادات المياه و تصميم القوارب و السفن و قد إعتد في ذلك على التجربة و الخطأ. شكل تراكم هذه المعرفة التجريبية الأساس لمزيد من التطور أثناء ظهور كل من الحضارتين اليونانية تليها الرومانية لاحقاً. و من هنا بدأ علم ميكانيكا الموائع، فقد قام أرخميدس (287-212 قبل الميلاد) بالتعبير لأول مرة عن مبادئ الهيدروستاتيكا و الطفو من خلال فهم حركات الموائع، و وصف المهندس sunitnorF suiluj sutxeS (40-103م) أساسيات بناء أنظمة إمدادات المياه الرومانية و قياس حجم التدفقات فيها، مع ذلك ظلت هذه الإكتشافات دون تأثير على تطور ميكانيك الموائع قرابة ألف عام (العصور الوسطى).

مع بدايات عصر النهضة بدأ تطوير ميكانيك الموائع ليصبح مجالاً من مجالات العلوم النظرية بعد أعمال ليوناردو دافنشي (1452-1519) و من بينها وصفه لحالات التدفق المختلفة بالعديد من الرسومات التخطيطية و الكتابات و غيرها من الأعمال، التي أعقبتها أعمال جاليليو جاليلي (1564-1642) التي مثلت بداية العمل التجريبي لهذا الفرع [12]. بعد فترة النهضة المبكرة و خلال القرنين السابع عشر و الثامن عشر، تواصل تطور ميكانيك الموائع حيث تم تقديم العديد من المساهمات المهمة. و تشمل هذه التطورات النظرية والرياضية المرتبطة بأسماء شهيرة كإسحاق نيوتن (1642-1727) الذي وضع الأساس للوصف النظري لدراسة التدفقات.

هنري دي بيتو (1665-1771) الذي ساهم في فهم ضغط السكون، يوهان برنولي (1667-1748) الذي إشتق معادلة حفظ الزخم من مبادئ الطاقة، دانيال برنولي (1700-1782) الذي وضع الأساس لميكانيكا التدفق، ليونارد أويلر (1707-1783) قام بصياغة أساسيات معادلات التدفق للموائع المثالية و معادلة حفظ الزخم كما أكد أهمية الضغط في ميكانيك الموائع و قام كذلك بإكتشاف المبدأ الأساسي للمحركات التوربينية. كما قام جان لو روند دالمبرت (1717-1783) بإستكمال صياغة المعادلات الأساسية و إشتق معادلة الإستمرارية في الشكل التفاضلي، و طرح إستخدام الأعداد المركبة في تحليل

حركة الموائع ، و واصل كل من جوزيف دي لاغرانج (1736-1813) و لويس ماري هنري نافيه (1785-1836) و باري دي سانت فينانت ( 1797-1886) تطوير نظرية المعادلات الأساسية لميكانيك الموائع و التي لم تكن ناجحة بالتوازي مع الأبحاث التجريبية [13].

في القرن الحادي والعشرين النتائج التي لم تكن ممكنة في السابق بسبب عدم وجود طرق التحقيق المناسبة أصبحت ممكنة، و ذلك بفضل التطورات الكبيرة في الرياضيات التطبيقية لحل المعادلات التفاضلية الجزئية عدديا. كما تم إجراء تحسينات كبيرة الأداء الحسائي لأجهزة الكمبيوتر الحديثة عالية السرعة و أصبحت برامج الكمبيوتر التي تتيح حل مشاكل التدفق العملية عددياً متاحة. لذلك أصبحت ميكانيكا الموائع العددية أيضاً مجال فرعي مهم لمجال ميكانيكا الموائع بأكمله [13].

## I-2) المعادلات الأساسية للموائع:

يمكن القول أن أي مادة تتكون من جزيئات تتحرك عشوائياً و تفصل عن بعضها البعض مسافات لا تقل أبعادها عن حجوم الجزيئات نفسها. و تختلف المواد عن بعضها حسب هذه المسافات، ففي بعض منها تكون هذه المسافات كبيرة، وهذه حالة ما يسمى الغازات gases، وفي بعضها الآخر تكون صغيرة وهذه حالة ما يسمى السوائل liquids. وهذا يوضح الاختلاف الكبير في الكتلة الحجمية في هذين النوعين من الموائع.

كما يهتم علم ميكانيكا الموائع بدراسة الموائع الساكنة و يعتبرها فرعاً من فروع (استاتيكا الموائع)، حيث يقوم بدراسة قوى الضغط التي تبديها الموائع الساكنة. يعتبر المائع ساكناً عندما تكون جميع جزيئاته لا تتحرك بالنسبة للإحداثيات، و من تطبيقاته دراسة السدود، الأحواض، الخزانات، أعماق البحار و المحيطات. كما يمكن إعتبارها ساكنة إذا كانت جسيمات المائع لا تتحرك حركة نسبية بالنسبة لبعضها البعض دون الإلتفات إلى حركتها الكلية، في هذه الحالة لا يكون هنالك إجهادات قص لإختفاء التدرج في السرعة مما يتسبب في إختفاء تأثيرات اللزوجة و بقاء الإجهاد العمودي فقط و هو العنصر الأكثر أهمية في دراسة سكون الموائع [14].

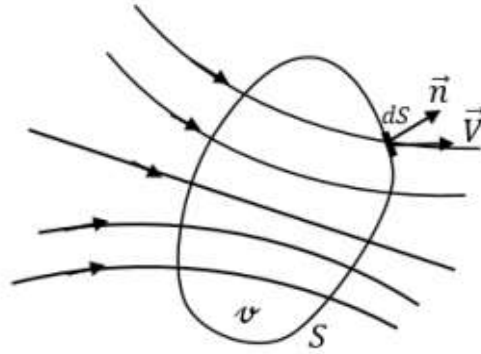
للمائع مقادير مميزة من أجل إيجادها في كل لحظة و كل نقطة يتم تشكيل المعادلات المحلية فيها التي تعتمد على عدد المجاهيل، كل مسألة في ميكانيك الموائع الحقيقية تحوي ستة مجاهيل و هي السرعة  $\vec{V}$  بما ثلاثة مركبات (تتمثل في  $u, v, w$ )، الكتلة الحجمية  $\rho$ ، الضغط  $p$  ودرجة الحرارة  $T$ . تتمثل هذه المتغيرات في معادلة حفظ الكتلة، معادلة حفظ الزخم (معادلة شعاعية تكافئ ثلاث معادلات سلمية)، معادلة حفظ الطاقة و أخيراً معادلة مميزة للمائع من الشكل  $f(p, \rho, T) = 0$ .

## I-2-1) المعادلات الأساسية للموائع القابلة للإنضغاط:

تتميز الموائع القابلة للإنضغاط بتغير كثافتها مع تغير الضغط كالغازات، ليكن  $v$  دوماً حجم ثابت في الفضاء و محدود بسطح مغلق  $S$ .  $\vec{n}$  شعاع الوحدة الناظم على السطح و هو موجه خارج السطح  $S$ .

I - 2-1-1) معادلة حفظ الكتلة (معادلة الإستمرارية):

لدينا الشكل التالي الذي يوضح الفرضيات المطبقة في إستخراج معادلة الإستمرارية و المذكورة مسبقا :



إن المائع يدخل إلى هذا الحجم و يخرج منه في كل لحظة بحيث يكون التغير في الكتلة الكلية التي يحتويها هذا الحجم بالنسبة للزمن مساويا و معاكسا للتدفق الكتلي للمائع الذي يدخل و يخرج عبر السطح S.  
أي أن:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = - \iint \rho \cdot V \cdot \vec{n} d\vec{S}$$

حيث:  $m = \iiint \rho dv$

عند التعويض نتحصل على [15]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dv = - \iint \rho \cdot V \cdot \vec{n} d\vec{S}$$

نستطيع كتابتها أيضا بالشكل

$$\iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} dv + \iint \rho \cdot V \cdot \vec{n} d\vec{S} = 0 \quad [16] \text{ (معادلة إنحفاظ الكتلة في شكلها التكاملي)}$$

بإستعمال نظرية أوستروغراداسكي تصبح المعادلة بالشكل :

$$\iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} dv + \iiint \text{div}(\rho \vec{V}) dv = 0$$

أي أن :

$$\iiint \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) \right] dv = 0$$

و منه نجد :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1 - I)$$

هذه المعادلة تمثل معادلة إنحفاظ الكتلة في شكلها المحلي [16].

و يمكن كتابتها بالشكل

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \overline{\text{grad}}(\rho) + \rho \text{div}(\vec{V}) = 0$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div}(\vec{V}) = 0 \quad (2-1)$$

و تكتب المعادلة (2-1) بدلالة المتجهات بالشكل  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho V_i) = 0$

تعني هذه المعادلة أن معدل تغير التدفق ثابت  $(\rho AV = \text{const})$  [17].

كحالة خاصة إذا كان المائع في حالة سريان مستقر أي  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  تصبح المعادلة  $\text{div}(\rho \vec{V}) = 0$

### I-2-1-2) معادلة حفظ كمية الحركة (الزخم):

تنص نظرية إنحفاظ كمية الحركة المستمدة من قانون نيوتن الثاني للحركة أنه إذا اعتبرنا  $V$  حجم من المائع على أن مقدار

التغير الكلي في كمية حركة هذا الحجم المادي بالنسبة للزمن يساوي مجموع القوى الخارجية (قوى الحجم و قوى السطح) المؤثرة

عليه و في هذه الحالة يمكن أن نكتب الآتي :

$$\iiint \frac{d(\rho \vec{V})}{dt} dv = \sum \vec{F}_{ext}$$

حيث  $(\rho \vec{V})$  يمثل كمية الحركة في وحدة حجم المائع، بما أن كمية المادة تتدفق عبر السطح  $S$  إلى الحجم  $V$  في كل لحظة

(نظام مفتوح)، إذن يمكن كتابة معادلة إنحفاظ كمية الحركة بالشكل التالي [18]:

$$\iiint \frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} dv + \iint \rho \vec{V}(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS = \sum \vec{F}_{ext} = \vec{F}_v + \vec{F}_s \quad (3-1)$$

$$\vec{F}_v = \iiint \rho \vec{F} dv \quad \text{القوى الحجمية}$$

$$\vec{F}_s = \iint \vec{T} dS \quad \text{القوى السطحية}$$

الإجهاد  $\vec{T}$  هو مجموع الإجهادين الناظمي و المماسي  $\vec{T} = \vec{T}_n + \vec{T}_f$

:  $\iint \rho \vec{V}(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS$  تمثل تدفق كمية الحركة عبر السطح المغلق  $S$ .

تصبح المعادلة بالشكل

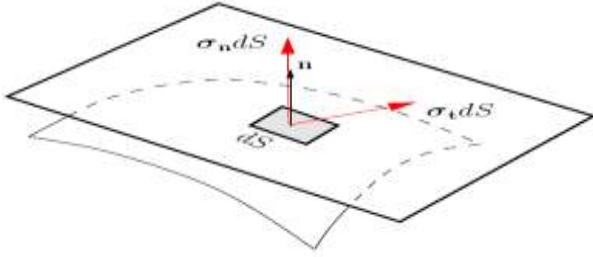


$$\iiint \frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} dv + \iint \rho\vec{V}(\vec{V}\vec{n}) dS = \iiint \rho\vec{F} dv + \iint \vec{T} dS$$

تمثل قوى الحجم القوى الناشئة من تأثير الحقول مثل القوى الكهربائية والمغناطيسية قوى الوزن أو قوى الثقالة و كذلك عزوم

القصور الذاتي، سنقتصر هنا على قوى الثقالة وهي وزن حجم المائع  $v$  و نكتب  $\vec{F}_v = \iiint \rho\vec{g} dv$

أما القوى السطحية أو قوى التلامس فتتمثل في تأثير حجم  $v$  من المائع حيث يخضع لقوى تلامس مع جزيئات المائع المحيطة به والمطبقة على حدوده  $S$ . يمكن تحليل القوى السطحية إلى مركبة ناظرية و تمثل الضغط و مركبة مماسية و تمثل قوى اللزوجة أو قوى القص ونكتب:



$$d\vec{F} = \sigma_n d\vec{S} + \sigma_t d\vec{S}$$

يمثل المقدار  $\sigma$  مجموع قوى الضغط إلى قوى اللزوجة

$$\sigma = -Pn + \bar{\sigma}_v n$$

$$F_s = \iint -Pn dS + \iint \bar{\sigma}_v n dS$$

نعوض في العبارة

$$\iiint \frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} dv + \iint \rho\vec{V}(\vec{V}\vec{n}) dS = \iiint \rho\vec{g} dv + \iint -Pn dS + \iint \bar{\sigma}_v n dS$$

نجد معادلة حفظ الزخم [18]:

• في النظام المثالي

$$\iiint \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} dv + \iiint \text{div}(\rho V \otimes V) dv = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \rho g + \text{div } \bar{\sigma}$$

• في النظام الغير مثالي

$$\iiint \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} dv + \iiint \rho(V \cdot \nabla)V dv = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \rho g + \text{div } \bar{\sigma}$$

$$\boxed{\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \rho(V \cdot \nabla)V = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \rho g + \text{div } \bar{\sigma}} \quad (4- I)$$

في حالة السريان المستقر  $\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = 0$ ، تصبح معادلة الزخم في هذه الحالة تكافئ:

$$\iiint \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} dv = \iint \rho\vec{V}(\vec{V}\vec{n}) dS = \sum \vec{F}_{ext}$$

و منه في حالة الجريان المستقر يكون كل من مجموع القوى الخارجية المؤثرة على المائع على السطح المغلق  $S$  و تدفق كمية الحركة عبر كامل هذا السطح مساويان لبعضهما، و يطلق عليها نظرية أولر لهذه النظرية العديد من التطبيقات في معالجة المسائل منها حساب القوى المطبقة إما على جدران الأنابيب في المناطق التي يكون فيها تغييرات مفاجئة في المقاطع أو على الصفائح المستوية و المنحنية و غيرها [16].

### I - 2-1-3) معادلة حفظ الطاقة:

المبدأ الأول للديناميكا الحرارية ينص على أنه في النظام المغلق

$$\Delta(E_{int} + K) = W + Q \quad (J)$$

حيث :  $E_{int}$  : الطاقة الداخلية وهي كل أشكال الطاقة (الكهربائية ، النووية،.....)

$K$  : الطاقة الحركية لجسيمات المائع

$W$  : عمل القوى الخارجية

$Q$  : كمية الحرارة المتبادلة

يكتب المبدأ الأول خلال فترة زمنية  $dt$  فنحصل على :

$$\frac{d}{dt}(E_{int} + K) = \dot{W} + \dot{Q} \quad (W) \quad (5-I)$$

يمثل كل من  $\dot{W}$  و  $\dot{Q}$  استطاعة عمل القوى الخارجية و قوة التبادل الحراري على الترتيب. أما في النظام المفتوح فلا يمكن تطبيق هذا القانون بشكل مباشر إلا بإضافة شروط التدفق الحراري. نعتبر الآن الإستطاعة الحرارية ناتجة من التوصيل فقط [18].

$$\dot{Q} = \sum \frac{dQ}{dt} = \iint \lambda \overrightarrow{grad}(T) \cdot \vec{n} dS = \iiint div(\lambda \overrightarrow{grad}(T)) dv$$

$$\dot{W} = \sum \mathcal{P}_{ext} = \mathcal{P}_v + \mathcal{P}_s$$

$$\frac{d}{dt}(E_{int} + K) = \frac{d}{dt} \iiint (\rho E + \rho \frac{V^2}{2}) dv = \mathcal{P}_v + \mathcal{P}_s + \iiint div(\lambda \overrightarrow{grad}(T)) dv$$

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho E dv + \frac{d}{dt} \iiint \rho \frac{V^2}{2} dv = \mathcal{P}_v + \mathcal{P}_s + \iiint div(\lambda \overrightarrow{grad}(T)) dv \quad (6-I)$$

في معادلة الطاقة الحركية لدينا :

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho \frac{V^2}{2} dv = \mathcal{P}_{ext} + \mathcal{P}_{int} = \mathcal{P}_v + \mathcal{P}_s + \mathcal{P}_{int} \quad (7-I)$$

حيث :  $\mathcal{P}_{ext}$  : استطاعة القوى الخارجية و  $\mathcal{P}_{int}$  : إستطاعة القوى الداخلية

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{int} &= \iiint \rho \operatorname{div} \vec{V} \, dv - \iiint \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \, dv \\ &= \underbrace{\iiint \rho \operatorname{div} \vec{V} \, dv}_{\text{إستطاعة الإنضغاط اللدن}} - \underbrace{\iiint \emptyset \, dv}_{\text{الإستطاعة المتبددة بفعل الإحتكاك اللزج}} \end{aligned}$$

الدالة  $\emptyset$  تسمى دالة التبدد و تكون قيمتها موجبة دوما، حيث قام العالم رايلي بدراسة معمقة عنها.

بتعويض العبارة (7-I) في (6-I) نجد:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \iiint \rho E \, dv &= \iiint \operatorname{div}(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)) \, dv - \mathcal{P}_{int} \\ &= \iiint \operatorname{div}(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)) \, dv - \iiint \rho \operatorname{div} \vec{V} \, dv + \iiint \emptyset \, dv \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho E \, dv = \iiint (\operatorname{div}(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)) - \rho \operatorname{div} \vec{V} + \emptyset) \, dv$$

$$\frac{d}{dt} (\rho E) = \operatorname{div}(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)) - \rho \operatorname{div} \vec{V} + \emptyset$$

$$\boxed{\frac{d}{dt} (\rho E) + \rho \operatorname{div} \vec{V} = \operatorname{div}(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)) + \emptyset} \quad (8- I)$$

أ. معادلة برنولي [19 , 20]:

من الحالات الخاصة لمعادلة حفظ الطاقة المشهورة لدينا معادلة برنولي و التي تصف سلوك المائع أثناء الحركة وتطبق في

الشروط التالية :

- المائع يتحرك في قناة مغلقة

- مائع لا إنضغاطي ( $\rho = \text{const}$ ) بحيث  $\operatorname{div}(\vec{V}) = 0$

- سريان مستقر بالنسبة للزمن  $\frac{\partial}{\partial t} [\dots] = 0$

- مائع مثالي حيث تنعدم كل من اللزوجتين الديناميكية  $\nu$  و المطلقة  $\mu$  ، دالة التبدد  $\emptyset$  و كذلك موتر الإجهاد  $\overline{\overline{T}}$

فنتحصل على معادلة برنولي:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g z + p = \text{const}$$

حيث :  $Z$  هي المستوى المرجعي

ينص مبدأ برنولي على أن الزيادة في سرعة المائع تعني بالضرورة إنخفاضاً في الضغط الذي يتعرض له أو إنخفاضاً في طاقته المحتملة أو كليهما في نفس الوقت و من تطبيقات نظرية برنولي العديدة و المتنوعة في المجالات المختلفة نذكر :

- تصميم المداخن، حيث تبني عالية من أجل تحقيق فرق ضغط أكبر بين القاعدة و مخرج المدخنة مما يعني سهولة تصريف غازات الاحتراق.

- مجال الطيران، فقد تم تصميم أجنحة الطائرة بهدف تحقيق تدفق هواء أكبر في الجزء العلوي من الجناح ما يعني سرعة هواء عالية و ضغط منخفض، ينتج عن فرق الضغط قوة موجهة رأسياً للأعلى تسمح للطائرات بالاحتفاظ بها في الهواء.

### I-2-2) المعادلات الأساسية للموائع الغير قابلة للانضغاط:

في الموائع غير القابلة للانضغاط لا تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل السوائل

#### I-2-2-1) معادلة حفظ الكتلة:

في الموائع غير القابلة للانضغاط تكون الكتلة الحجمية ثابتة ( $\rho = \text{const}$ ) أي مستقلة عن الموضع و الزمن فتصبح

المعادلة (I-1) بالشكل التالي :

$$\text{div}(\vec{V}) = 0 \implies \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

لأن:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  لأن الكتلة الحجمية لا تتغير مع الزمن

#### I-2-2-2) معادلة حفظ كمية الحركة (الزخم):

في هذه الحالة و بما أن  $\rho = \text{const}$  فإن معادلة حفظ كمية الحركة تصبح كالآتي :

$$\iiint \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} dv + \iint \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \rho g + \text{div } \vec{\sigma}$$

$$\rho \iiint \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} (\vec{V} \cdot \nabla) \right] dv = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \rho g + \text{div } \vec{\sigma}$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} (\vec{V} \cdot \nabla) \right] = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \rho g + \text{div } \vec{\sigma}$$

هذا فيما يخص الطرف الأول من المعادلة أما فيما يخص الطرف الثاني فيتسبب في إختفاء تأثير قوى اللزوجة و إنعدامها فتصبح المعادلة بالشكل [18]:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \rho g$$

I-2-2-3 معادلة حفظ الطاقة:

عندما يكون المائع لا إنضغاطي تكتب المعادلة (I-6) على النحو التالي:

$$\rho \left( \frac{dE}{dt} + \text{div } \vec{V} \right) = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)) + \phi$$

من معادلة الإستمرارية  $\text{div } \vec{V} = 0$  فتصبح المعادلة

$$\rho \frac{dE}{dt} = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)) + \phi$$

الخاتمة:

من خلال ما تم تناوله في هذا الفصل أصبح بالإمكان القول أنه تم وضع توطئة رياضية تمكن من معالجة العديد من المسائل و المشكلات و من بينها ما سيتم التطرق إليه في الفصل الثالث في دراسة توربين الرياح و معرفة الكفاءة القصوى للتوربين الهوائي في ظروف محددة. بالإستعانة بمعادلات الحفظ الأساسية لميكانيك الموائع.

# الفصل الثاني:

---

أنظمة طاقة الرياح

## مقدمة:

يُعتبر استخدام توربينات الرياح لتوليد الكهرباء أحد اكتشافات القرن العشرين، حيث بدأ هذا الاستخدام بتوليد قدرات منخفضة للتطبيقات البسيطة مثل شحن البطاريات وغيرها، ولأهمية هذا المصدر الطاقوية والإقتصادية ووجهت العديد من الدول اهتماماً كبيراً لبحث وتطوير تقنيات توربينات الرياح الحديثة. كما أن الاهتمام المتزايد بالبيئة والتنمية منح دفعة إضافية للبحث عن مصادر الطاقة النظيفة من بينها طاقة الرياح، و شجع هذان العاملان على الإهتمام بتوليد القدرة الكهربائية عن طريق محطات الرياح.

## II-1) تاريخ طاقة الرياح:

إن استخدام قوة الرياح من قبل البشر ليس بالأمر الجديد، فقد كان أول استخدام لطاقة الرياح و أسطها هو دفع القوارب الشراعية. فمنذ ما لا يقل عن 3000 عام أستُغلت في طحن الحبوب و ضخ المياه و الري إلى جانب بعض التطبيقات الميكانيكية الأخرى [21, 22].

إستُخدمت الطواحين الهوائية في بلاد فارس نحو 200 عام قبل الميلاد لكن أول طواحين للهواء المنتجة كانت في سبستان و هي منطقة بين أفغانستان و إيران و ذلك في القرن السابع الميلادي و كانت من النوع رأسي المحور، أول طاحونة هوائية تم تصميمها في أوروبا كانت مستوحاة من المشرق العربي و كانت لديها نفس المشاكل مع استخدامهم للمحاور العمودية [23]. و قد ظهرت طواحين الهواء في أوروبا قبل 1000 عام بقليل في بريطانيا العظمى ثم إنتشرت في القرن الثاني عشر في جميع أنحاء أوروبا [24].

لم تظهر أول توربينات الرياح الحديثة فعلياً حتى نهاية القرن التاسع عشر على شكل تجريبي. و كان تشارلز بوش هو أول من صمم هذا الجهاز لتزويد منزله بالكهرباء في عام 1888 حيث تعمل توربينات الرياح بشفرات محور عمودي و بعدة بطاريات لتخزين الطاقة المنتجة [24]. بعد ذلك إستُحوذ الدنماركي بول لا كور على نظام طاقة الرياح الخاص بتشارلز بوش، الذي صمم العديد من توربينات الرياح الصناعية [25]، تهدف هذه التوربينات إلى إنتاج الهيدروجين باستخدام قوة الرياح لتحويله إلى طاقة كيميائية من خلال عملية التحليل الكهربائي.

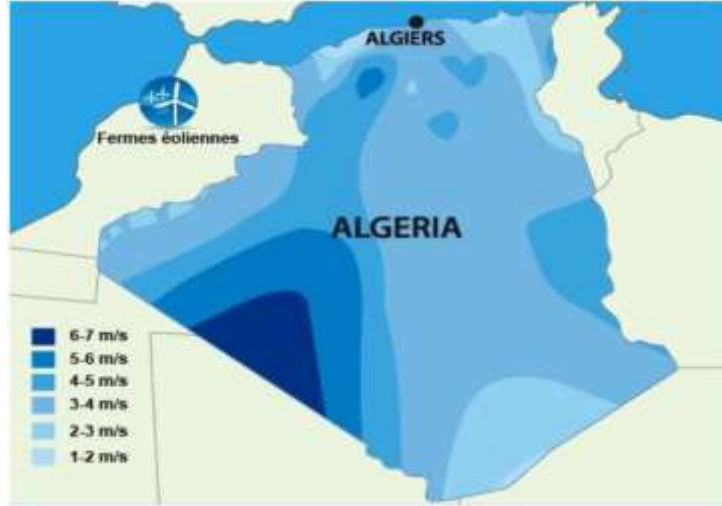
في عام 1957، أنشأ يوهانس جول تورييناً أطلق عليه اسم Gedser و الذي لا يزال يعمل كنموذج لتوربينات الرياح الحديثة حتى يومنا هذا في الولايات المتحدة و بريطانيا و فرنسا، و ينتظر تصميم و بناء توربينات رياح بقوة تصل إلى 1000 كيلو واط [24].

تراجع الاعتماد على طواحين الرياح بعد اختراع جيمس وات للآلة البخارية في نهاية القرن الثامن عشر، ثم عاد الاهتمام بها كأحد مصادر الطاقة النظيفة بعد ارتفاع أسعار النفط عام 1973 و ظهور مشاكل بيئية ناتجة عن حرق الوقود الأحفوري، مما

دفع بتكنولوجيا تصنيع توربينات الرياح في العشرين عاما الأخيرة إلى مستوى عال من النضج تجلى في إرتفاع جودة و كفاءة التوربينات إلى جانب انخفاض تكلفة الإنتاج، و بالتالي تزايد الاعتماد عليها [2].

## II-2) مستوى سرعة الرياح في الجزائر [26]:

أجريت دراسات لتقييم موارد طاقة الرياح في جميع أنحاء الجزائر. أظهرت النتائج تبايناً كبيراً في سرعة الرياح وفقاً للتغير في الموسم و الارتفاع و الاختلاف الكبير من مكان إلى آخر بسبب تأثير الطبوغرافيا (الشكل II - 1)).



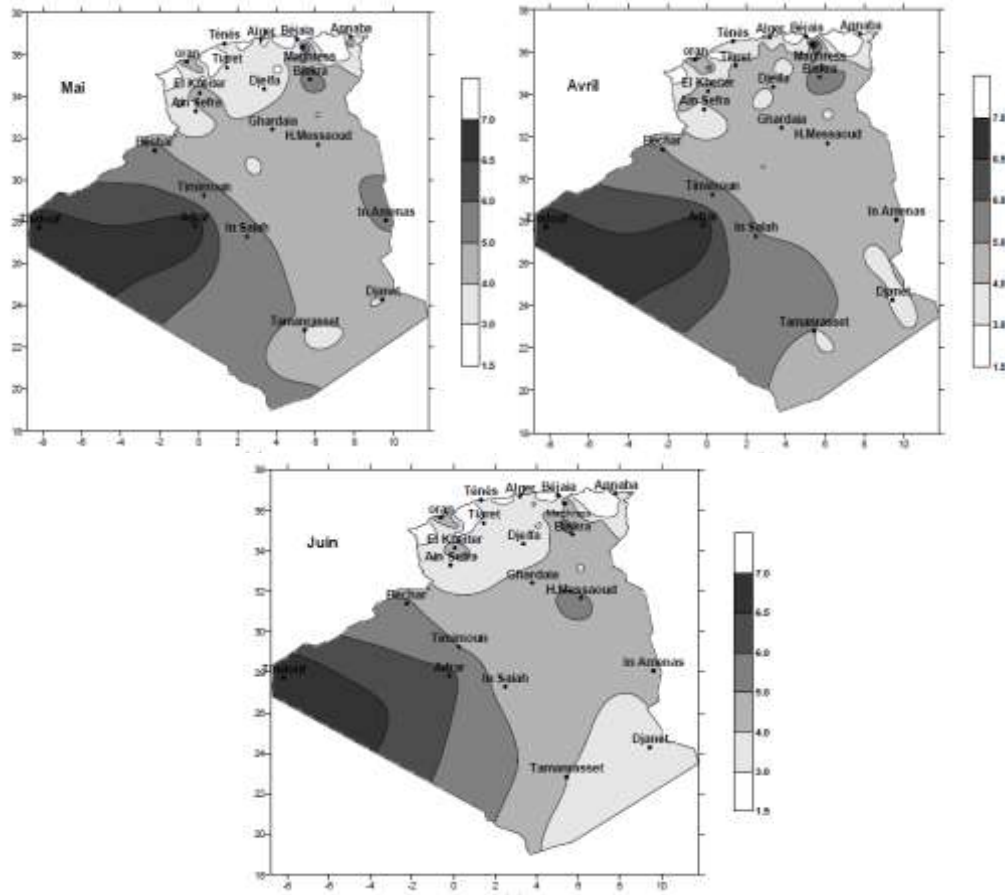
الشكل (II - 1): تقدير أطلس متوسط سرعة الرياح في الجزائر بحوالي 10 أمتار فوق سطح الأرض [26]

تأتي بيانات الرياح المستخدمة من المكتب الوطني للأرصاد الجوية (ONM)، حيث من الواضح أن هناك توزيعاً غير متكافئ للبيانات نظراً للمساحة التي لا تزال ضعيفة التغطية في أقصى جنوب الجزائر الكبير. و قد تم تطوير برنامج لمعالجة بيانات السرعة الشهرية حسب السنة المتاحة لـ 75 محطة التي تم النظر فيها. سمح هذا بحساب متوسط السرعة شهرياً لكل محطة لمدة إثني عشر شهراً.

من خلال مراقبة التوزيع الجغرافي لسرعة الرياح لمدة إثني عشر شهراً، يتضح بشكل عام أن الجزائر من الشمال إلى الجنوب و من الشرق إلى الغرب تخضع لتغير شهري طفيف إلى حد ما. يصبح من الممكن بعد ذلك تصنيف الأشهر من الأقل عاصفة إلى الأكثر عاصفة. في الواقع نلاحظ أن شهري نوفمبر و ديسمبر أقل عاصفة إذ تتميز بسرعات تقل عن (3m/s) تحتل جزءاً كبيراً من الإقليم خاصة في الشمال و الوسط و الجنوب الشرقي. يليهما شهري جانفي و أكتوبر حيث يكون نطاق السرعات أقل من (3m/s) منخفض على حساب السرعات العالية. تظل الحقيقة أن مناطق مثل تيارت و وهران في الشمال الغربي و بسكرة في الشمال الشرقي و كذلك المنطقة الجنوبية الغربية بأكملها تكون شديدة الرياح خلال هذه الأشهر. شهر فيفري عاصف قليلاً يليه شهر أوت، نلاحظ اختفاء السرعات التي من (3m/s) في الجنوب الشرقي. في شهري سبتمبر و جويلية تحتل المناطق العاصفة جزءاً كبيراً من الجنوب بسرعة أكبر من (4m/s). كما نلاحظ ظهور مناخات محلية حول وهران و الخيتر. نلاحظ تغيراً طفيفاً لشهر مارس باستثناء زيادة السرعة في منطقة غرداية.



أكثر شهور الرياح هي بلا شك شهر جوان ثم ماي و أخيراً أبريل. في الواقع تمتد السرعات فوق (4m/s) في معظم أنحاء الجزائر. تمتد السرعات فوق (5m/s) في جميع أنحاء الجنوب الغربي و تتجاوز (6m/s) في منطقة أدرار.

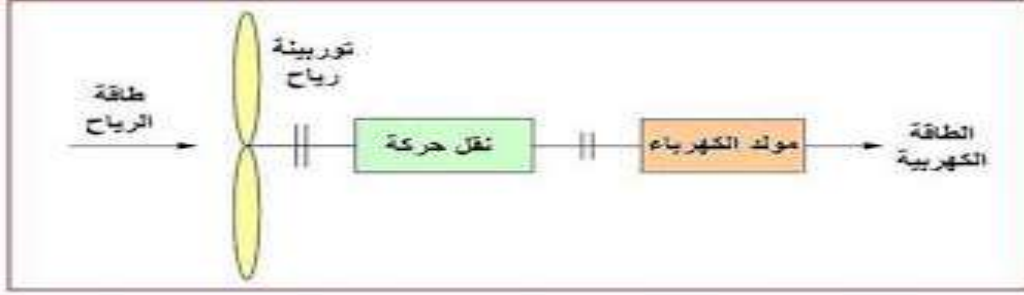


الشكل (II - 2): رسم الخرائط الشهرية لمتوسط سرعة الرياح للشهور الأكثر شدة على إرتفاع 10m من الأرض بـ [26](m/s)

يشكل مخطط الخرائط المختلفة لمتوسط السرعات الشهرية على إرتفاع 10m من الأرض مساهمة في تقييم موارد طاقة الرياح في الجزائر، و جعل من الممكن إجراء تحديد أولي لما يسمى بالمناطق العاصفة التي تتمتع بإمكانية رياح كبيرة. يمكننا بالفعل أن نستنتج أن مزرعة الرياح أكثر أهمية في الجنوب منها في الشمال و خاصة في الجنوب الغربي. و هي أكثر فعالية في الربيع تمثلها أشهر مارس و أبريل و ماي منه في الشتاء. بالإضافة إلى ذلك تتميز بعض المناطق بسرعات عالية على مدار العام بشكل خاص المنطقة الجنوبية الغربية بأكملها التي تحدها تيميمون و عين صالح و تمنراست و تندوف بسرعات تزيد عن 5 m/s في أدرار.

## II-3) طاقة الرياح:

و هي الطاقة التي يتم تحويلها من الطاقة الحركية المحمولة من الرياح بواسطة توربين لإنتاج الطاقة الكهربائية كما هو موضح في الشكل (II - 3)، كما تعتبر من انواع الطاقة الكهروميكانيكية. هذه الطاقة المتجددة هي أيضاً طاقة خضراء لأنها لا تنتج إنبعاثات في الغلاف الجوي و لا نفايات مشعة.



الشكل (II - 3): تحويل طاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية

طاقة الرياح عشوائية مع تغير الزمن و يظل التحكم فيها معقدا للغاية، و تتطلب أبراج و شفرات كبيرة (تصل إلى 60 متراً) في المناطق المضطربة. هناك نوعان من تشغيل توربينات الرياح :

### II-3-1) تشغيل بسرعة ثابتة:

و تتميز هذا النوع:

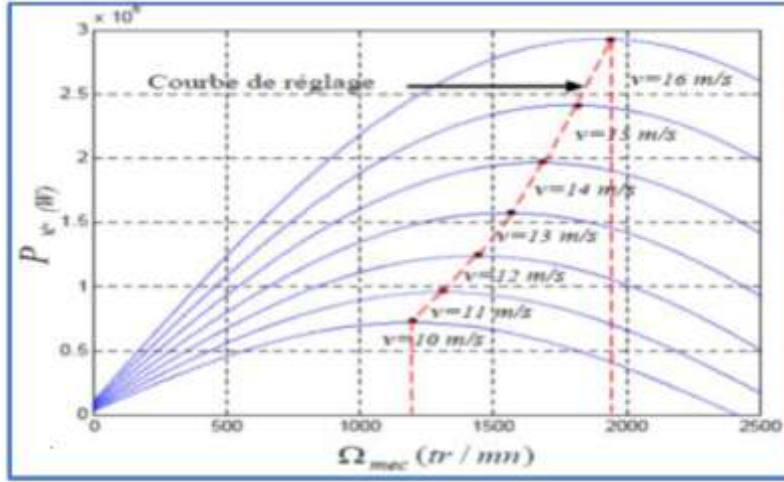
- نظام كهربائي أبسط.
- موثوقية أكبر.
- احتمال ضئيل لإثارة ترددات الرنين لعناصر توربينات الرياح.
- لا حاجة لنظام تحكم إلكتروني.
- تكلفة أقل.

### II-3-2) تشغيل بسرعة متغيرة:

من مميزات هذا النوع:

- تقليل إهتزازات عزم الدوران في مجموعة نقل الحركة.
- تخفيض القوى التي تواجه نقل الحركة.
- زيادة كفاءة الطاقة.

جميع هذه الخصائص تعطي القوة المتاحة حسب السرعة، يوضح (الشكل II - 4) دوران المولد لسرعات الرياح المختلفة. إنطلاقاً من هذه الخصائص من الواضح أنه إذا تم تشغيل المولد بسرعة ثابتة لا يمكن تحسين نقطة التشغيل من حيث الطاقة المستخرجة [27، 29].

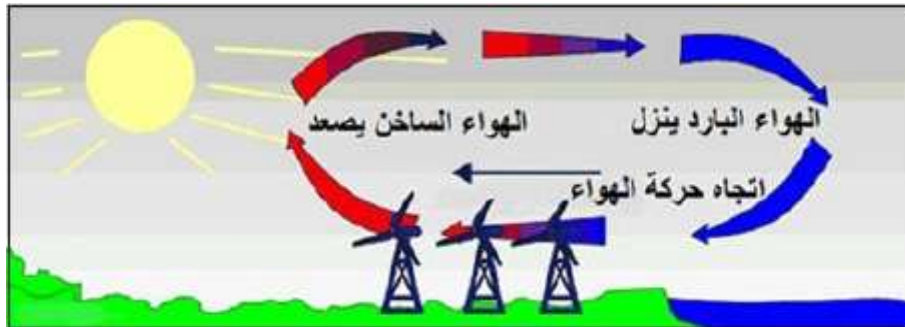


الشكل (II-4): القوة النظرية المتاحة في توربينات الرياح [29]

#### II-4) مصدر الرياح:

طاقة الرياح هي طاقة من أصل شمسي، يتم تحويل 2% من الطاقة الشمسية إلى طاقة حركية للرياح [30]. تقوم الأرض بامتصاص كمية هائلة من الطاقة الشمسية كما تمتص المحيطات واليابسة جزء كبير من هذه الطاقة، إلا أن كمية كبيرة منها يتم إمتصاصها من قبل فضاء الأرض.

الطاقة التي تصل من الشمس لا تسقط على الأرض بانتظام، فالهواء حول خط الاستواء يمتص طاقة أكبر من الطاقة التي يمتصها الهواء في القطبين وهذا الاختلاف يؤدي إلى تدرج في الضغط فينتج عنه تيارات هوائية، بما أن الهواء الدافئ يملك كثافة أقل من الهواء البارد فإنه يكون أخف لذا يرتفع الهواء الدافئ إلى الأعلى (ظاهرة الطفو) و الهواء البارد الأثقل يتدفق ليحل محله مسبباً تياراً من الهواء و بعبارة أخرى مسبباً الرياح (الشكل II - 5)). عادة ما تكون الرياح المتولد بهذه الطريقة كبيرة [31].



الشكل (II-5): مخطط لكيفية نشأة الرياح

كما يلعب دوران الأرض دوراً في إنتاج الرياح أيضاً، فهو يسمح للرياح بالتنقل عبر نصف الكرة الشمالية و نصفها الجنوبي [31].

## II-5) مكونات توربينات الرياح:

تختلف قوة توربينات الرياح مثل مكعب سرعة الرياح ( $P = \frac{1}{2} \rho S V^3$ ) فمن المهم وضعها في مناطق ذات سرع كبيرة و بالتالي الابتعاد عن سطح الأرض لأن الأرض تعمل على الإبطاء من خلال تأثيرات خشونة السطح واللزوجة (الطبقة الحدودية)، و من هنا جاءت الصورة الكلاسيكية لهذه التركيبات ذات الشفرات العالية التي يحملها البرج (الشكل II - 6)

[32].



الشكل (II - 6): توربينات الرياح الكلاسيكية

هناك نماذج من توربينات الرياح قريبة جداً من الأرض، بما في ذلك تلك ذات المحور الرأسي لكن إستخدامها هامشي. و ينطبق الشيء نفسه على النماذج الأخرى التي تستخدم المراوح بدلاً من الشفرات المفردة. سنقتصر في وصفنا على النوع الكلاسيكي للتوربينات.

## II-5-1) القاعدة:

بالنسبة للتوربينات أرضية الأساس، القاعدة تكون خرسانية يتم من خلالها تثبيت الهيكل بأكمله و يجب أن يكون قادراً على تحمل العواصف و الرياح الشديدة. أما بالنسبة لتوربينات الرياح البحرية فإن الأساس الهيكلي الشاهق البارز منه يقع في قاع البحر. و هذا الهيكل يمكن أن يكون خرسانيا بشكل أساسي أو مصنوعاً من خرسانة و أنابيب فولاذية ضخمة.

## II-5-2) البرج:

يرفع البرج المروحة إلى منطقة ذات رياح أقوى و أكثر إنتظاماً من الرياح الموجودة بالقرب من الأرض أو البحر، كما يسمح بالزيادة في طول الشفرة. هذا الهيكل المعدني أسطواني الشكل مثلاً لتوربينات الرياح تنتج 5 MW يتراوح قطرها من 5 إلى 6

أمتار، يمكن أن يتجاوز إرتفاع بعض الأبراج 100 m. قد يحتوي البرج على جزء من المكونات الكهربائية و الإلكترونية بالإشتراك مع علبة السرعة.

### II-5-3) علبة السرعة (الحاوية):

تحتوي علبة السرعة على جميع الآلات التي تحول الدوران البطيء للشفرات إلى كهرباء و التي تسمح بتوجيه الماكينة بشكل جيد قدر الإمكان بالنسبة للقوة العظمى.

### II-5-4) الدوار و الشفرات:

تشكل هذه العناصر أنف التوربينات الهوائية، و تكون مثبتة في علبة السرعة. يصل طولها إلى 60 m (قطرها 120 m) و عدد شفراتها عادةً يصل إلى ثلاثة و أحياناً يكون إثنين و يبلغ وزنها الإجمالي أكثر من 1200 طن. هذه الشفرات مصنوعة من مواد مركبة و تم تحسين تصميمها لتقليل الضوضاء عند أطرافها.

### II-5-5) حجرة التشتت:

يتم تثبيتها على الأرض. و هو المكان الذي يتم فيه تحويل التيار الناتج في علبة السرعة مع الشبكة الكهربائية.

### II-6-6) مبدأ تشغيل توربينات الرياح:

#### II-6-1) الرياح:

تعمل الرياح على تحريك التوربينات من خلال شفراتها التي تكون مائلة قليلاً للرياح. عندما تهب الرياح على سطح مائل تدفع الشفرة من ناحية نحو الخلف و هذا ما يسمى بقوة السحب و من ناحية أخرى ترفع سطح الشفرة و هذا ما يسمى بقوة الرفع.

من أجل تطبيقات معينة لتوربينات الرياح كسحب المياه الجوفية تفي توربينات الرياح متعددة الشفرات بهذا، ذلك نظرًا لإجمالي مساحة سطح الشفرات فالقوة المتولدة كبيرة (لذلك تبدأ حركة التوربين عند السرعة 2m/s). و بالنسبة للتطبيقات الحديثة الأخرى من المهم أن تصل الطاقة إلى الحد الأقصى أي يجب أن يدور توربين الرياح بسرعة كبيرة، هذه هي خاصية توربينات الرياح الخفيفة اليوم المجهزة فقط بشفرتين أو ثلاث شفرات (لكنها تبدأ حركة التوربين عند السرعة 5m/s).

### II-6-2) توجيه التوربينات حسب اتجاه الرياح:

يجب أن توجه التوربينات حسب إتجاه الرياح باستمرار لإنتاج أقصى قدر من الطاقة. يمكن القيام بهذا إما عن طريق الدفة الخلفية للتوربين بوجود حساس للسرعة و إتجاه الرياح، أو بواسطة محرك مؤازر من خلال تحديد الريشة لإتجاه الرياح و ترسل إشارة إلى المحرك لتغيير و ضبط الإتجاه.



الشكل (II-7): حساس سرعة و اتجاه الرياح

### II-6-3) تنظيم التوربينات من أجل السرعات القوية:

لا ينبغي حمل التوربينات بعيداً عندما تكون الرياح قوية جداً. تعتمد القوة التي تحرك الشفرات على السطح المقابل للرياح و أيضاً على زاوية الهجوم للرياح بالنسبة لسطح الشفرة. يتم تنظيم التوربينات أكثر قوة اليوم بثلاثة طرق بشكل عام.

#### - الطريقة الأولى:

تستفيد التوربينات المتصلة بمولد كهربائي غير متزامن بالكبح الكهربائي عند زيادة القوة الدافعة للرياح فإن هذا المولد يعارض القوة المقاومة المتزايدة، بإختصار يرفض الدوران بسرعة كبيرة، و مع ذلك فإن هذه القوة المقاومة التي لا تتجاوز عتبة معينة في حالة تجاوزها يفقد المولد مقاومته.

#### - الطريقة الثانية:

هذه الطريقة من نوع التنظيم الذاتي الديناميكي الهوائي جذابة للغاية من حيث المبدأ، فإن القوة التي تمارسها الرياح تعتمد على ميل الرياح بالنسبة لمدار الشفرة، إذا كانت الشفرة مائلة للغاية بالنسبة للرياح يكون الرفع أقل بكثير بسبب زيادة الإضطراب و على العكس من ذلك إذا كانت الشفرات موازية جداً للرياح فلا يوجد رفع و منه يمكننا تنظيم السرعة عن طريق تدوير الشفرات قليلاً.

#### - الطريقة الثالثة:

من أجل السلامة لا نطبق الكبح الكهربائي أو تنظيم بواسطة الشفرات القابلة للتوجيه أو التنظيم الديناميكي الهوائي فيتم إستكمال ذلك بالفرامل، من الناحية الأخرى المكابح الهوائية يمكن أن تدور طرف الشفرات بشكل عمودي فوق سرعة معينة أو أن يتم وضع مكابح قرصية بسيطة على محور المروحة.

**II-6-4) الطاقة الناتجة عن توربين الرياح:**

تمثل  $P$  الإستطاعة النظرية التي يمكن الحصول عليها من هبوب الرياح عندما تعبر الرياح السطح  $S$  بسرعة  $V$  و توصف

بالمعادلة:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1 - II)$$

يمكننا أن نلاحظ أن القوة تتناسب مع المساحة التي تشكلها الشفرات و المقطع العرضي للهواء (و بالتالي مع مربع قطر الشفرة) و مكعب السرعة و من هنا تأتي أهمية هذين العاملين، في الواقع يتم إستخدام نسبة فقط من هذه الإستطاعة النظرية من طرف التوربين [33].

**II-7) تصنيف توربينات الرياح:**

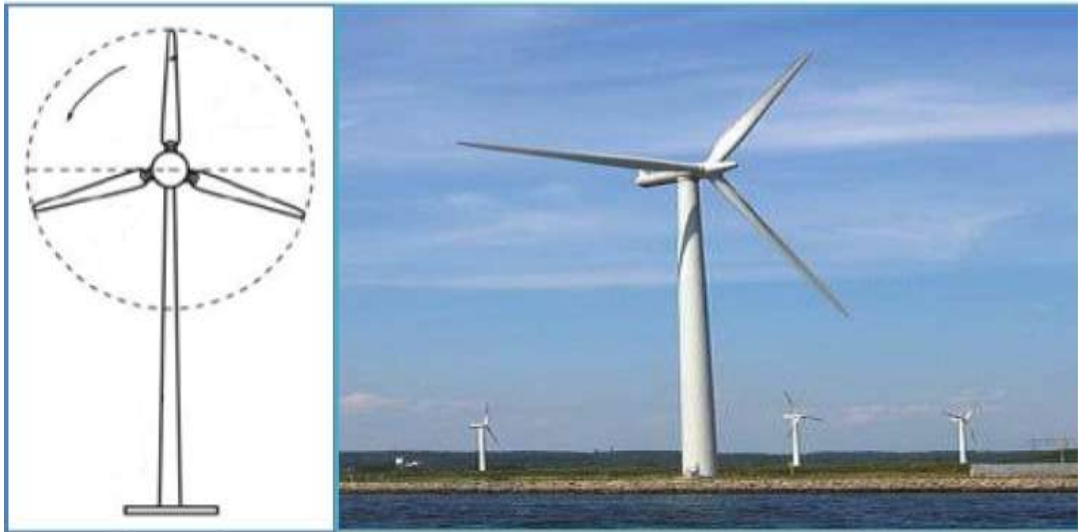
في الوقت الحاضر ظهرت العديد من التصاميم المبتكرة للتوربينات للحصول على أكبر طاقة ممكنة و استغلال أقل سرعة للرياح في توليد الكهرباء. بالرغم من وجود العديد من التصميمات و الأشكال المختلفة إلا أن التوربينات تنحصر في قسمين وفقاً لمحور الدوران :

1- توربينات الرياح ذات المحور الأفقي.

2- توربينات الرياح ذات المحور الرأسي (عمودي على الرياح).

**II-7-1) توربينات الرياح ذات المحور الأفقي (HAWT):**

التوربينات أفقية المحور هي التي يكون محور دورانها موازياً لسطح الأرض تعتمد على مبدأ طواحين الهواء [34]. حيث تتكون من واحد إلى ثلاث شفرات أو أكثر محددة ديناميكياً (الشكل II - 8).



الشكل (II - 8): توربينات الرياح ذات المحور الأفقي

في أغلب الأحيان تكون التوربينات ثلاثية الشفرات لأن الشفرات الثلاث تشكل حلاً وسطاً جيداً بين معامل الطاقة و التكلفة وسرعة الدوران [25]، من بين هذه الفئات نميز :

### 1- توربينات الرياح البطيئة:

يحتوي هذا النوع من التوربينات على عدد كبير من الشفرات، من الواضح أن هذا يسهل البدء بفضل عزم الدوران العالي، و لكن من العيوب أن تزداد السرعة بسبب الإهتزازات. لا يمكن أن تصل هذه التوربينات إلى سرعات عالية، و تُستخدم كمحركات جوية للضخ على وجه الخصوص [35].

### 2- توربينات الرياح السريعة:

على عكس التوربينات البطيئة، فإن توربينات الرياح السريعة تكون أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الشفرات في بعض الأحيان يجب أن تبدأ بمحرك كهربائي ثم تعيد الطاقة المستهلكة عند بدء التشغيل. تعد هذه التوربينات أكثر ملاءمة لتوليد الطاقة [35].



(ت) ثنائية الشفرة

(ب) ثلاثية الشفرة

(أ) متعددة الشفرات

### الشكل (II - 9): أنواع توربينات الرياح ذات المحور الأفقي

- هناك نوعان من التوربينات ذات المحور الأفقي:

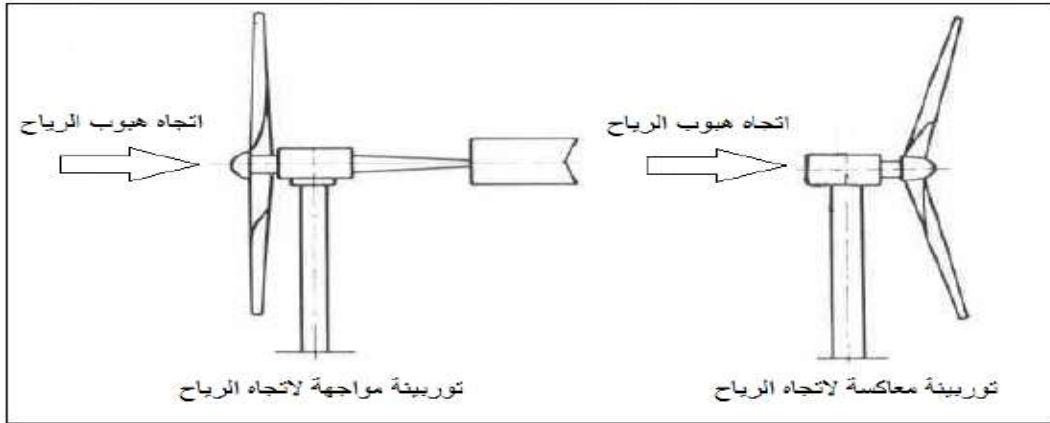
#### II-7-1-1) توربينات مواجهة لإتجاه الرياح (المنبع):

تهب الرياح على مقدمة الشفرات في إتجاه علبة السرعة. بحيث الشفرات الصلبة و الدوار موجهة في إتجاه الرياح بواسطة جهاز.

#### II-7-1-2) توربينات معاكسة لإتجاه الرياح (المصب):

تهب الرياح على الجزء الخلفي من الشفرات بدءاً من علبة السرعة ثم الدوار المرن التلقائي قابل للتوجيه.





الشكل (II-10): أنواع توربينات الرياح ذات المحور الأفقي

تعد توربينات المنبع هي الأكثر إستخدامًا لأنها أبسط و تعطي أفضل النتائج للقوى العالية بحيث قوى المناورة أقل أهمية و هناك إستقرار أفضل. يجب دائمًا توجيه شفرات توربينات الرياح ذات المحور الأفقي في إتجاه الرياح لهذا هناك أجهزة توجيه علبة السرعة وفقا لهذا الإتجاه [25].

التوربينات ذات المحور الأفقي هي الأكثر استخدامًا بسبب كفاءتها الديناميكية الهوائية المتفوقة على توربينات الرياح ذات المحور الرأسى [25].

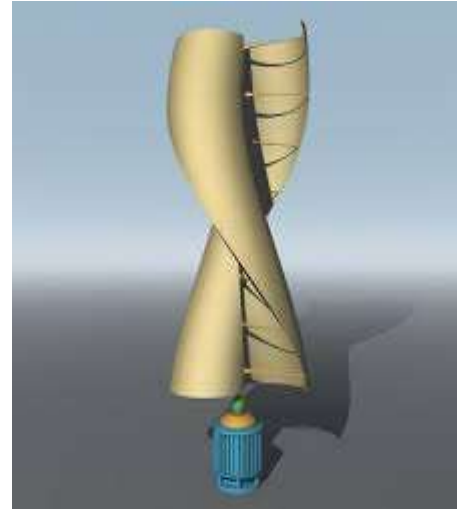
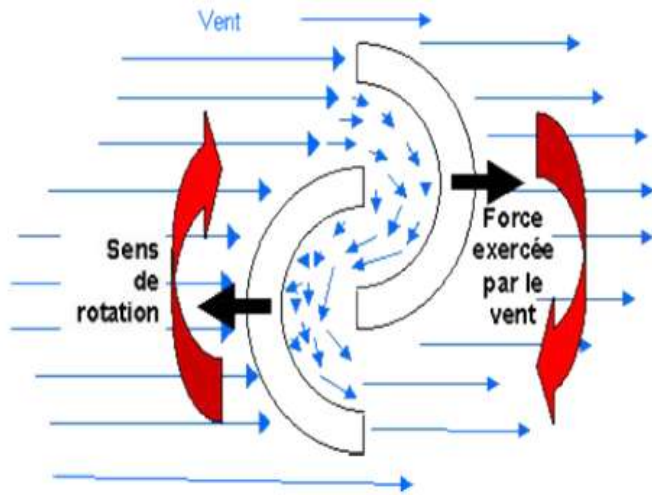
## II-7-2) توربينات الرياح ذات المحور الرأسى (VAWT):

هي التوربينات التي يكون محور دورانها عمودي على سطح الأرض [34]. يستخدم مبدأ التشغيل متعدد الإتجاهات و الذي يتميز بالتقاط الرياح أينما كانت و بالتالي تعمل دون الحاجة إلى آلية توجيه. أبراج توربينات الرياح ذات المحور الرأسى قصيرة بين 0.1 و 0.5 من إرتفاع الدوار. هذا يجعل من الممكن وضع جهاز تحويل الطاقة بالكامل (مولد، مضاعف و غيرها) أسفل التوربينات الهوائية، و بالتالي تسهل عمليات الصيانة. و من هذه الوضعية فإن الرياح تكون ضعيفة بالقرب من الأرض مما يؤدي إلى انخفاض كفاءتها بسبب تعرضها لإضطراب الرياح. عند بدء تشغيل التوربين يتعرض البرج لضغوط ميكانيكية قوية، لهذه الأسباب في الوقت الحاضر يفضل مصنعو التوربينات توربينات الرياح ذات المحور الأفقي [25].

يعتمد النوعان الأكثر شيوعًا من هياكل التوربينات ذات المحور الرأسى على مبادئ السحب التفاضلي أو الاختلاف الدوري للوقوع :

## II-7-2-1) دوار Savonius:

يعتمد تشغيله على مبدأ السحب التفاضلي، فالقوى التي تمارسها الرياح على جانبي الجوف ذات شدة مختلفة (الشكل II-11)) فينتج عنها عزم دوران يتسبب في دوران الكل [25].



الشكل (II-11): توربينات الرياح من نوع savonius [25]

## II-2-7-2: دوار Darrieus

يعتمد على مبدأ الاختلاف الدوري في الحدوث (الوقوع). يوضع في تدفق الهواء بزوايا مختلفة و يخضع لقوى الشدة من اتجاهات متفاوتة (الشكل (II-12)). نتيجة هذه القوى تولد عزم دوران للمحرك يقود دوران الجهاز [25].



(ث) حلزوني

(ب) H- darrieus

(أ) darrieus

الشكل (II-12): أنواع توربينات الرياح من نوع Darrieus

II-8) تقييم إمكانات الطاقة:

II-8-1) الطاقة التي توفرها الرياح [36, 37]:

الطاقة التي توفرها الرياح هي طاقة حركية تعتمد على كتلة و سرعة الهواء، إذا اعتبرنا أن كثافة الهواء ثابتة يمكننا القول أن الطاقة التي توفرها الرياح هي دالة لسرعتها، يتم وصف قوة الرياح من خلال:

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2$$

حيث:

m: كتلة الهواء (kg).

V: سرعة الرياح (m/s).

$E_c$ : الطاقة الحركية (joules).

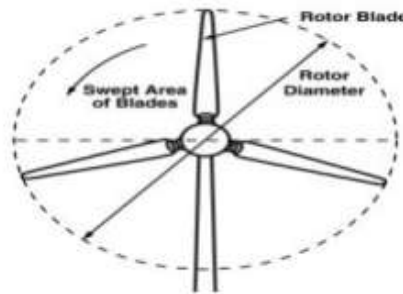
إستطاعة الرياح النظرية الموجودة في أسطوانة ذات مساحة S

$$P_{théorique} = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

S: مساحة الإجتياح ( $m^2$ ).

- تحسب منطقة اجتياح توربينات الرياح بطريقة مختلفة وفقاً لهندسة الجزء المتحرك. بالنسبة لتوربينات الرياح ذات المحور الأفقي HAWT، يتم وصف المنطقة التي تم اجتياحها بواسطة العلاقة التالية:

$$S = \pi \cdot r^2$$



الشكل (II-13): منطقة إجتياح HAWT

$\rho$ : الكتلة الحجمية للهواء ( $kg/m^3$ ).

تختلف كثافة الهواء باختلاف الارتفاع فوق مستوى سطح البحر و درجة الحرارة، تعتمد كثافة الهواء على كل من الضغط P

و الثابت النوعي للغاز المثالي  $R_a$  و درجة حرارة الهواء T. من أجل الهواء الجاف  $\rho = \frac{P}{R_a T}$

حيث:

$$P = 101.325 \text{ kPa}$$

$$R_a = 287.058 \text{ J/kg.K}$$

بالنسبة لموقع معين لتوربينات الرياح تكون درجة الحرارة هي العامل المتغير الرئيسي مما يؤدي إلى اختلافات في الكثافة.

تحت ظروف الضغط و درجة الحرارة العادية تكون قيمة كثافة الهواء هي  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  [38].

نلاحظ أن إستطاعة الرياح تتناسب مع مكعب سرعتها و المساحة المجتاحة و الشروط الحديثة.

## II-8-2) أقصى طاقة قابلة للاسترداد [39]:

تبلغ الكفاءة القصوى لتوربينات الرياح المثالية حوالي 59.3% من الحد الأقصى بيتز

$$P_{r\acute{e}cup\acute{e}rable} = \frac{16}{27} P_{th\acute{e}orique}$$

من أجل تحديد السرعة الموافقة لبدء إنتاج الطاقة تتطلب التوربينات سرعة رياح دنيا تعرف بإسم سرعة البدء و بالنسبة

لمعظم التوربينات الحديثة تبلغ السرعة الدنيا 3 m/s و مع زيادة الرياح يزداد الإنتاج مع مكعب السرعة، بالنسبة لسرعة رياح

معينة تسمى السرعة الأسمية تكون الطاقة التي تصل إلى المولد هي الطاقة القصوى.

$$P_n = \frac{1}{2} \rho S V_n^3$$

يتم الحصول على القدرة الأسمية  $P_n$  من سرعة الرياح  $V_n$  و تسمى بالسرعة الأسمية، عندما تكون سرعة الرياح أكبر من

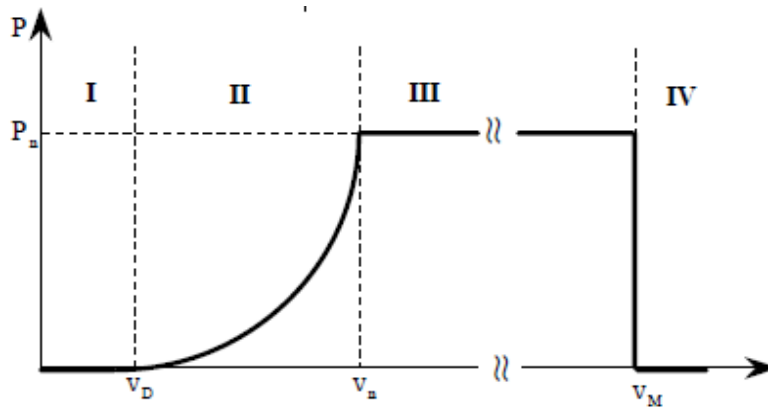
$V_n$  يجب على توربينات الرياح تعديل معاييرها من أجل تجنب التدمير الميكانيكي بحيث تظل سرعة دورانها ثابتة عملياً. بجانب

السرعة الاسمية  $V_n$  نحدد أيضاً :

-  $V_D$  : سرعة البدء التي يبدأ عندها التوربينات الرياح في إنتاج الطاقة.

-  $V_M$  : أقصى سرعة للرياح و التي لم يعد بعدها التوربين يحول طاقة الرياح، لأسباب تتعلق بالسلامة التشغيلية.

تحدد السرعات  $V_D$  و  $V_n$  و  $V_M$  أربع مناطق على الرسم البياني للطاقة المفيدة حسب سرعة الرياح:



الشكل (II-14): رسم تخطيطي للطاقة المفيدة كدالة لسرعة الرياح [39]

- المنطقة (I) : حيث  $P = 0$  (التوربين لا يعمل).
- المنطقة (II) : حيث تعتمد الطاقة المنتجة للعمود على سرعة الرياح  $v$ .
- المنطقة (III) : حيث تظل سرعة الدوران ثابتة و الطاقة  $P$  الموفرة مساوية ل  $P_n$ .
- المنطقة (IV) : حيث يتوقف نظام الاعتمادية عن نقل الطاقة و يتم ذلك عن طريق ضبط زاوية الإلتواء لجعل معامل الأداء  $C_p$  قريبة من الصفر، ثم يتم استخدام الفرامل ميكانيكية لإيقاف دوران الشفرات.

### II-8-3 الإستطاعة القابلة للإستخدام:

تُحدد السرعة المقدرة لكل جهاز و المخرجات التي توفرها محطة التوربينات. و الغرض من هذا هو تحديد أفضل مكان من أجل إنشاء حقل توربينات مناسب و تطويرها لتحقيق أقصى إنتاج. كفاءة توربينات الرياح :

$$\eta = \frac{P_n}{P_{théorique}}$$

القوة الأسمية  $P_n$  ستكون :

$$P_n = \frac{1}{2} \rho S V_n^3$$

من المعادلة الخاصة بكفاءة التوربينات تصبح السرعة الأسمية :

$$V_n = \sqrt[3]{\eta \cdot V}$$

$P_u$  : الطاقة التي يمكن إستخدامها بواسطة توربينات الرياح.

$$P_u = \begin{cases} 0 & V < V_D \\ \frac{1}{2} \rho S V^3 & V_D \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho S V_n^3 & V_D \leq V < V_M \\ 0 & V \geq V_M \end{cases}$$

عندما تكون الكفاءة مساوية ل 0.5 تصبح السرعة الأسمية  $V_n = 0.79V$ . في هذه الحالة تكون الإستطاعة القابلة للإستخدام .

$$P_{Utilisable} = \frac{1}{2} \rho S V_n^3$$

### II-8-4 الإستطاعة المفيدة:

الإستطاعة المفيدة للتوربين تساوي ناتج كفاءة توربينات الرياح  $\eta$  في الطاقة التي يمكن إستعادتها بواسطة نفس توربين الرياح العاملة بين سرعة التشغيل و سرعة القطع.

$$P_{Utile} = \eta \cdot P_{récupérable}$$

(5-8-II) معامل قدرة التوربين  $C_p$  [40]:

يمثل معامل الأداء  $C_p$  مقدار الطاقة التي يمكن أن يحولها التوربين من الرياح، يتوافق مع الكفاءة الديناميكية الهوائية للتوربين. تعطى العلاقة بين الطاقة المتوفرة في الرياح و الطاقة التي يولدها الدوار.

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{wind}} = \frac{P_{turbine}}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad \text{حيث} \quad C_p < 1$$

عدديًا حد Betz لتوربينات الرياح ذات المحور الأفقي HAWT هو  $27/16$  يساوي 59.3%.

(6-8-II) السرعة المحددة  $\lambda$  [41]:

السرعة المحددة للتوربين تمثل سرعة التوربين المثالي، التي تعرف بالنسبة بين سرعة الشفرة وسرعة الرياح الاسمية.

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V}$$

حيث:

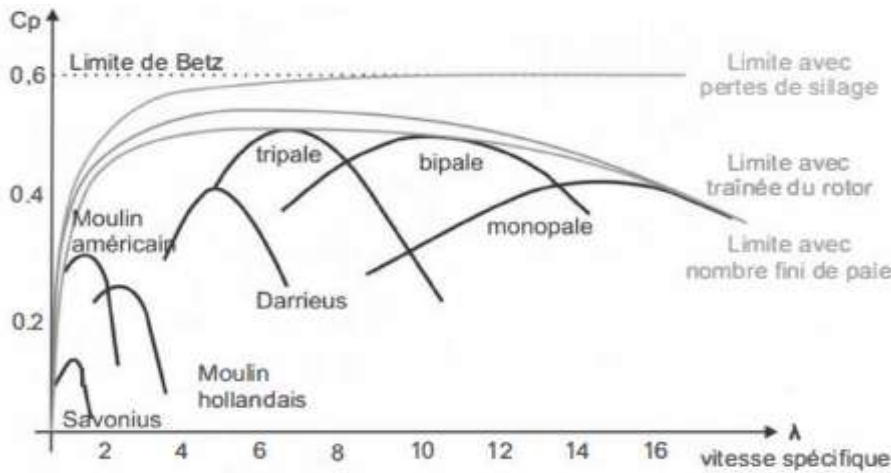
$\Omega$  هي سرعة دوران الجزء المتحرك (rad/s).

$R$  هو نصف قطر الدوار (m).

$V$  هي سرعة الرياح الاسمية (m/s).

$\Omega R$  هي السرعة الخطية المحيطية للشفرة (m/s).

- يمكننا بالتالي وضع أنواع مختلفة من هندسة الماكينة



الشكل (II-15): معامل القدرة لأنواع مختلفة من توربينات الرياح [41].

عملياً لا تتجاوز الطاقة القابلة للاسترداد 60% من القيمة القصوى (0.59) بسبب العوائد المتتالية المختلفة لسلسلة التحويل (خسائر الاحتكاك في الأجزاء الدوارة وغيرها) [42]. نلاحظ في الشكل (II - 15)، أن الكفاءة الديناميكية الهوائية الأفضل هي لتوربينات الرياح ذات المحور الأفقي والتي يقال أنها سريعة من المحتمل أن يكون لها عائد أعلى من الصيغ الأخرى، وهو ما يفسر هيمنتها على سوق الماكينات الحالية [41].

كما يمكننا ملاحظة تأثير عدد الشفرات على الكفاءة الديناميكية الهوائية.

## II-9) عيوب و مزايا طاقة الرياح:

### II-9-1) عيوب [12, 24]:

- 1 - توربينات الرياح صاحبة، و المهندسون يعملون على طرق إسكات الضوضاء.
- 2 - تتطلب توربينات الرياح حقول بكميات لا بأس بها من الأرض، حوالي (60) فدان لكل ميغاواط و من الصعوبة إيجادها بالقرب من المدن الكبيرة.
- 3 - العيب الرئيسي لهذه الطاقة هو أن الرياح متقطعة و ليست بنفس الشدة، مما يعني أن طاقة الرياح يجب أن تكمل بأشكال أخرى من الطاقة، فالقوة التي ذكرت سابقاً (II-1) تعتمد بشدة على سرعة الرياح لأنها تتناسب مع مربع هذه السرعة.
- 4 - توربينات الرياح مرئية فتساهم بالتلوث البصري.
- 5 - التوربينات يمكن أن تكون خطراً على حياة الطيور.
- 6 - يمكن أن تؤدي توربينات الرياح الى تآكل التربة وخصوصاً في مناطق الصحراء.
- 7 - ليست كل المناطق مناسبة لتوليد الطاقة الكهربائية من الرياح.
- 8 - الأبراج الهوائية و الأجزاء الدوارة يمكن أن تتداخل مع الرادار، و تشكل خطراً على المسافرين في الجو، و يمكن أيضاً أن تتداخل مع الأمواج الكهرومغناطيسية و أمواج الراديو، خصوصاً إذا كانوا في خط البصر بين مصدر الإشارة و المستلم.

### II-9-2) مزايا [31, 43]:

- 1 - تعتبر طاقة الرياح طاقة تنافسية إقتصادياً مع الأشكال الأخرى للطاقة.
- 2 - طاقة توربينات الرياح الكهربائية يمكن أن تكون دخلياً بديلاً للمزارعين و أصحاب مزارع الماشية و المواقع المعزولة.
- 3 - توربينات الرياح لا تستهلك الماء مما يجعلها مثالية للعمل في المناطق الجافة على نقيض محطات الطاقة التقليدية و النووية التي تستهلك كميات كبيرة من الماء للتبريد و الأغراض الأخرى.

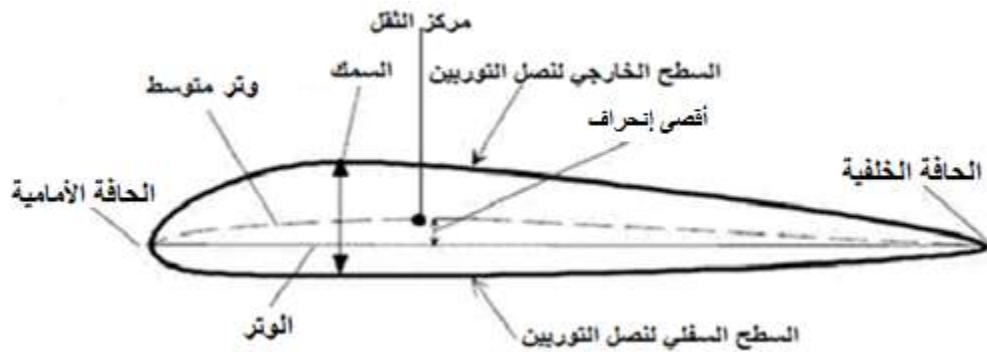
- 4 - طاقة الرياح هي طاقة متجددة و لا تنضب بالمقارنة مع الوقود الأحفوري، وهي نظيفة و لا تساهم في المطر الحامضي أو الدخان المضرب أو ظاهرة الإحتباس الحراري أو إنبعاث جزئيات خطيرة إلى الجو.
- 5 - يتم دمج هذا النوع من الطاقة بسهولة في نظام كهربائي.
- 6 - تأثيرها على البيئة يكاد يكون معدومًا، على عكس الطاقات التقليدية مثل الغاز و النفط و الفحم (GHG) أو الطاقة النووية (النفايات المشعة).
- 7 - طاقة الرياح ليست خطيرة على صحة الإنسان مقارنة بالطاقة النووية و الطاقات الغير متجددة الأخرى.
- 8 - تميل تكلفتها إلى الإنخفاض (تم تقسيمها على 2 في التسعينيات) و هي الآن أقل من الوقود الأحفوري الآخذ في الازدياد.

## II-10) الأوصاف الديناميكية الهوائية لشفرة توربين الرياح:

تعتبر الشفرات جزءًا مهمًا جدًا من محرك الهواء، يتم تصميمها حسب معايير تضمن كلا من عمر تشغيلها و خدمتها و كذا كفاءتها. الشفرة هي الجنح الدوار حول محور و هي جهاز ديناميكي هوائي أو هيدروديناميكي يهدف إلى تحويل الطاقة الدافعة في تسارع المائع أو تحويل طاقة الإزاحة إلى طاقة دافعة للدوار.

### II-10-1) هندسة شفرة توربينات الرياح [44]:

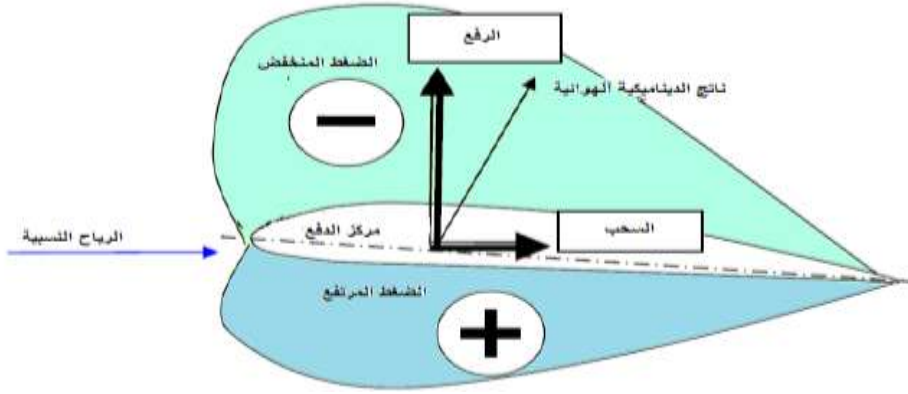
يُطلق على شكل المقطع الرأسي للشفرة بملف التعريف الشخصي، و يحدد هذا الشكل الصفات الديناميكية الهوائية للشفرة. يحتوي الملف الجانبي للشفرة على جزء مستدير في المقدمة يسمى الحافة الأمامية، و الطرف الخلفي يسمى الحافة الخلفية، و الوتر هو الخط الذي يربط بين الحافة الأمامية و الحافة الخلفية. تمثل المسافة القصوى بين السطح العلوي و السطح السفلي سمك المظهر الجانبي كما هو موضح في الشكل (II - 16).



الشكل (II - 16): المقطع الطولي لريش توربينات الرياح

في السطح العلوي للشفرة يكون تدفق الهواء أسرع منه على السطح السفلي، كما نجد انخفاض في الضغط على السطح العلوي مع زيادة على السطح السفلي. تكون الضغوط غير موزعة بالتساوي و أكبر قيمة له في مقدمة المظهر الجانبي.





الشكل (II-17): توزيع الضغط على الجنيح

## II-10-2) تعريف الزوايا حول الشفرة [24]:

$$\vec{U} = \omega R \text{ سرعة دوران الشفرات}$$

$$\vec{V} = \text{سرعة الرياح}$$

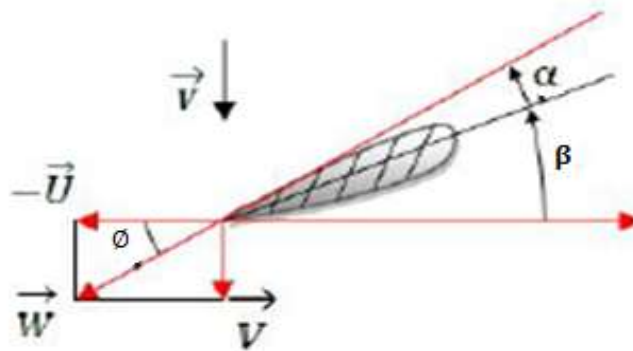
$$\vec{W} = \text{السرعة النسبية}$$

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \text{ مع العلم أن}$$

زاوية الهجوم ( $\alpha$ ): الزاوية التي يشكلها الوتر مع السرعة النسبية  $W$ .

زاوية الإلتواء (المماثلة) ( $\beta$ ): الزاوية التي يشكلها الوتر مع مستوى دوران الشفرات.

الزاوية النسبية المحلية للهجوم ( $\phi$ ): الزاوية التي تشكلها السرعة النسبية  $W$  ومستوى دوران الشفرات.

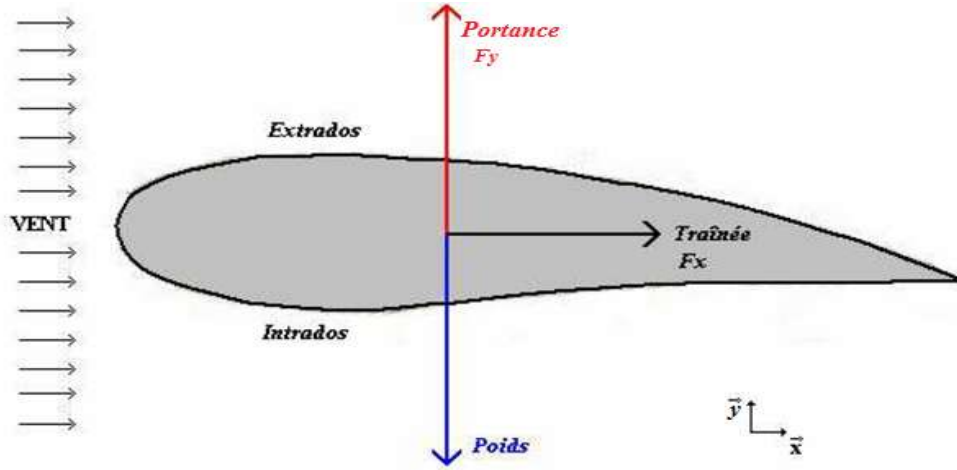


الشكل (II-18): تحديد الزوايا على الشفرة

II-10-3) الخصائص الديناميكية الهوائية لشفرة توربين الرياح:

II-10-3-1) القوى العاملة في ملف الشفرة [45]:

يمكننا التمييز بين ثلاث قوى تعمل على ملف تعريف الشفرة المثلثة في الشكل (II - 19)



الشكل (II - 19): القوى العاملة في الملف الشخصي [45]

أ - قوة الثقالة (الوزن):

هذه القوة هي التي تدفع الجناح إلى الأسفل تعطى بالعلاقة التالية:

$$P = mg$$

ب - قوة الرفع:

تكون هذه القوة عمودية على الجناح بالنسبة للتيار ناتجة من الديناميكية الهوائية و هي التي تحافظ على الطائرة في الهواء، تعطى بالعلاقة التالية:

$$F_y = \frac{1}{2} C_y \rho S V_\infty^2$$

$C_y$ : معامل الرفع الذي يعتمد على كل من رقم رينولدز و عدد ماخ و شكل الملف الشخصي للشفرة و زاوية الإلتواء.

ت - قوة السحب:

هذه القوة تمثل مقاومة جناح للحركة في الهواء، لها إتجاه معاكس يتحرك و يزداد مع سرعة الجسم المتحرك. يحدد بالصيغة التالية:

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho S V_\infty^2$$

$C_x$ : معامل السحب الذي يعتمد على كل من رقم رينولدز و عدد ماخ و شكل الملف الشخصي للشفرة و زاوية السقوط.

II-10-3-2) معامل الضغط [46, 47]:

لتحديد القوى المطبقة على ملف تعريف الشفرة من الضروري معرفة توزيع الضغط حول الملف الشخصي، ما يعادل تدفق مضغوط لتحديد معامل الضغط. الضغط في حد ذاته هو كمية الأبعاد لكن في الأدبيات الديناميكية من الشائع جدا إستعمال  $C_p$  بدلا من الضغط نفسه. يتم كتابة معامل الضغط بشكل عام على النحو التالي:

$$C_p = \frac{P_{local} - P_{\infty}}{P_{dy}}$$

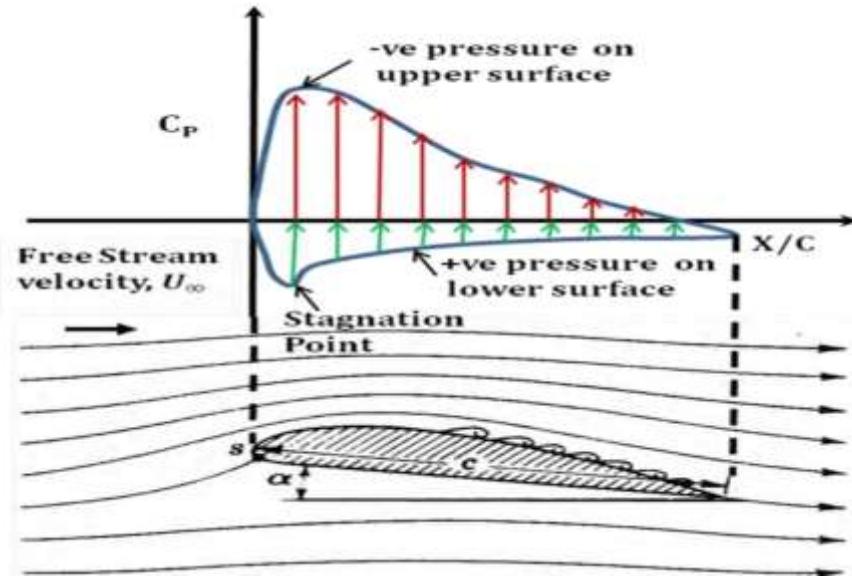
$$P_{dy} = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 \quad \text{حيث } P_{dy}: \text{الضغط الديناميكي الحر}$$

تصبح المعادلة:

$$C_p = \frac{P_{local} - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2}$$

إذا كان النظام حراري مثالي و يتطور بشكل متساوي فإنه يخضع للعلاقة المعروفة

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[ \frac{\rho_1}{\rho_2} \right]^{\gamma} = \left[ \frac{T_1}{T_2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$



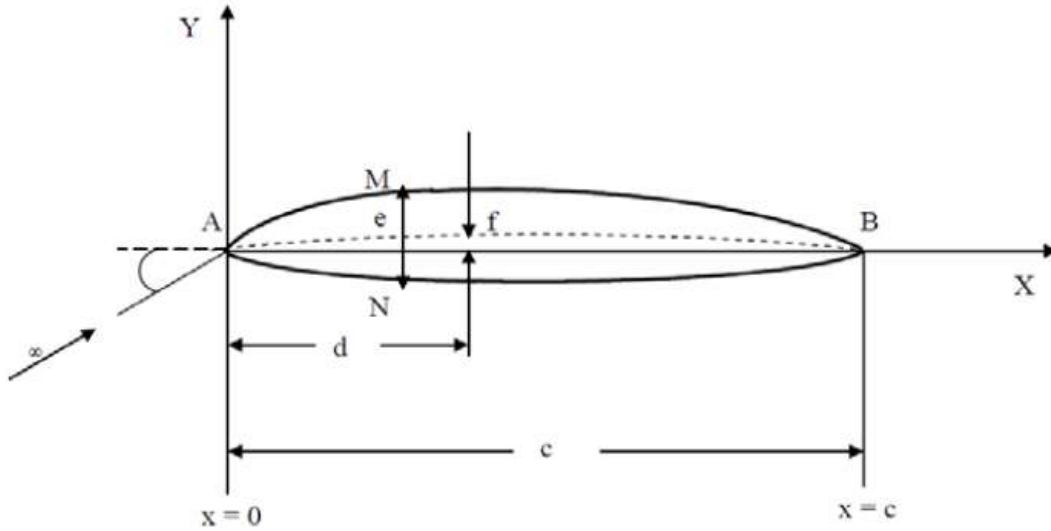
الشكل (II - 20): توزيع الضغط حول الملف الشخصي Aerofoil بإستعمال  $C_p$

(11-II) الخصائص الهندسية وتسمية الملف الشخصي:

(1-11-II) الخصائص الهندسية [44, 48]:

تعتمد المعلومات الديناميكية الهوائية للملفات الجانبية بشدة على الخصائص الهندسية للملف التعريف المعروض في الشكل

(21 - II):



الشكل (II-21): الخصائص الهندسية للملف الشخصي

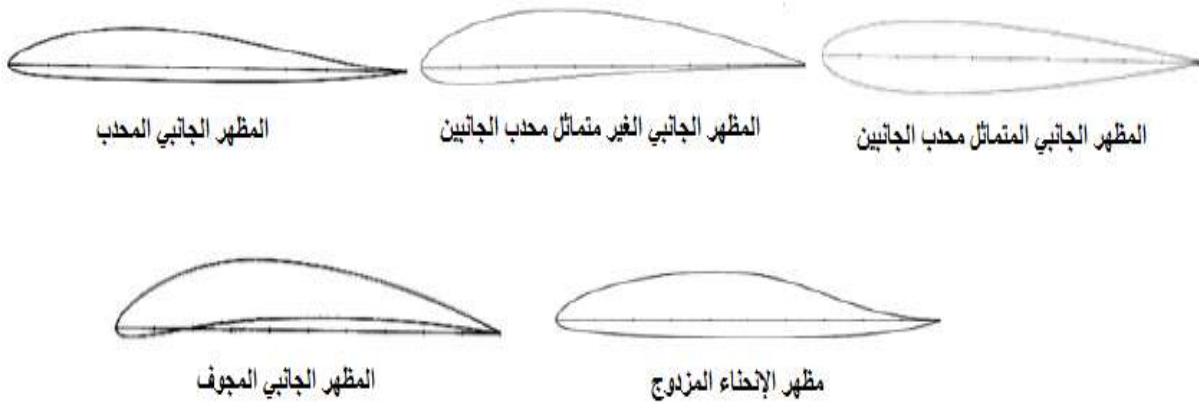
- A : حافة الأمامية.
- B : الحافة الخلفية.
- AMB : الظهر الخارجي (السطح العلوي).
- ANB : الظهر الداخلي (السطح السفلي).
- d : المسافة من الحافة الأمامية إلى أقصى انحراف.
- الوتر: هو الخط المستقيم الذي يربط الحافة الأمامية بالحافة الخلفية (جزء AB).
- زاوية الهجوم : هي الزاوية بين وتر المظهر الجانبي واتجاه التدفق عند ما لانهاية (يُشار إليها بالحرف  $\theta$ ).
- الخط المتوسط هو مجموعة نقاط المنتصف للمقاطع المتعامدة على وتر (مثال نقطة منتصف MN). ويسمى أيضاً الهيكل العظمي للملف الشخصي أو متوسط الانحناء. شكل هذا الخط المتوسط هو الأساس في تحديد الخصائص الديناميكية الهوائية لملامح الجناح.
- أقصى انحراف (f): أكبر إحداثي للخط المتوسط بالنسبة إلى الوتر AB.

- أقصى سمك للملف الجانبي (e) : هذه هي المسافة القصوى بين السطح العلوي و السطح السفلي.
- السماكة النسبية (e/c): هي نسبة السماكة القصوى إلى وتر المظهر الجانبي .
- الإنحناء النسبي (f/c): هذه هي نسبة الحد الأقصى للانحراف إلى وتر المظهر الجانبي.

## II-11-2) ملامح الشفرة [24, 49]:

يتم تصنيف ملامح الشفرة وفقاً للشكل الخاص بالسطح السفلي و السطح العلوي:

- المظهر الجانبي المحذب المسطح يعمل جيداً حتى عند حدوث انخفاض و لكنه غير مستقر قليلاً يستخدم بشكل رئيسي في الطيران العام.
- المظهر الجانبي غير المتماثل محذب الجانبيين يعمل بشكل جيد أيضاً و هو مستقر للغاية، يستخدم على نطاق واسع في الطيران الترفيهي.
- المظهر الجانبي المتماثل محذب الجانبيين لا يرتبط بتحويلات منخفضة و منخفضة جداً، يستخدم لدراسة أسطح التحكم.
- المظهر الجانبي المستدير أو المحوف مزدحم للغاية و لكنه أيضاً غير مستقر تماماً، عندما تزداد زاوية الهجوم فإنه يحاول رفع مستوى الصوت.
- يتميز شكل الانحناء المزدوج (الاستقرار الذاتي) بميزة الإستقرار العالي و لكن الرفع متوسط و السحب قوي إلى حد ما.



الشكل (II - 22): مظاهر مختلفة للشفرة

**II-11-3) الشفرات من نوع NACA [48]:**

أكثر ملامح الجناح شهرة في العالم و الأكثر إستخداما في الوقت الحاضر هي ملفات تعريف نوع NACA (اللجنة الاستشارية الوطنية للملاحة الجوية) الأمريكية الشهيرة. لقد درست هذه المنظمة الأنواع المختلفة من الملفات الشخصية التي تم استخدامها على نطاق واسع في تطبيقات توربينات الرياح.

هناك عدة تصنيفات لملفات تعريف NACA الأكثر إستخداما هي التسميات المكونة من أربعة وخمسة أرقام. تشير هذه الأرقام إلى الخصائص الهندسية للملف الشخصي.

**II-11-3-1) ملف شخصي مكونة من أربعة أرقام:****NACA 4412**

- يشير الرقم الأول (4) إلى قيمة الحد الأقصى للانحراف ( $f$ ) كنسبة مئوية من الوتر.
- الرقم الثاني (4) يشير إلى المسافة من الحافة الأمامية إلى أقصى انحراف ( $d$ ) كنسبة مئوية من الوتر.
- يشير آخر رقمين (12) إلى أقصى سمك بالنسبة المئوية مقارنة بالوتر (MN).

**II-11-3-2) الملف الشخصي من خمسة أرقام:****NACA 230-12**

- يشير الرقم الأول (2) إلى قيمة الحد الأقصى للانحراف بالنسبة المئوية مقارنة بالوتر (المعامل المميز للرفع).
- يشير الرقمان الثاني والثالث (30) إلى ضعف المسافة من الحافة الأمامية في موضع الانحراف الأقصى بالنسبة المئوية فيما يتعلق بالوتر.
- يشير آخر رقمين (12) إلى أقصى سمك كنسبة مئوية من الوتر.

**الخاتمة :**

من خلال هذا الفصل تم تقديم حالة من فن تحويل طاقة الرياح للهياكل المختلفة لتوربينات الرياح ذات المحور الرأسي و الأفقي، و وجد أن التوربينات ذات المحور الأفقي هي الأكثر هيمنة في الوقت الحالي لأن لها عائد أعلى من الأنواع الأخرى مما دفعنا لتحليل الشفرات المكونة لها في الدراسة.

من خلال هذا وقع الإختيار في هذا العمل على حساب القوى و المعاملات الديناميكية الهوائية المؤثرة على الشفرات باستخدام BEMT و تحديد الشكل الأمثل للشفرة. للقيام بذلك سيتم محاولة في الفصل التالي للدراسة الديناميكا الهوائية و تصميم توربين الرياح بقدرة 5kW في منطقة ورقلة.

## الفصل الثالث:

---

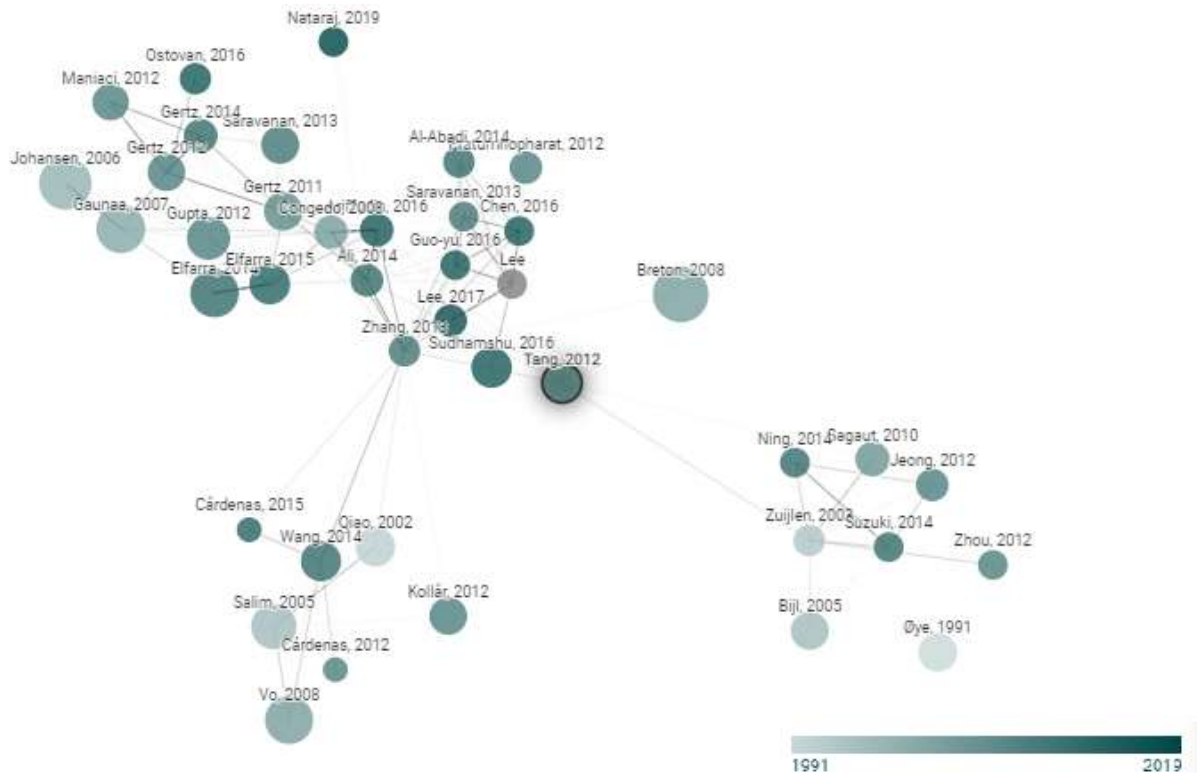
الدراسة الديناميكية الهوائية لشفرة توربين الرياح  
ذات المحور الأفقي بقدرة 5 kW

## مقدمة:

يعتمد إنتاج الطاقة الميكانيكية من الرياح بواسطة التوربينات على التفاعل بين شفرة توربين الرياح و الرياح. لقد أظهرت التجارب أن الجوانب الرئيسية التي تحدد أداء توربين الرياح (متوسط إنتاج الطاقة و متوسط الأحمال) هي دالة للقوة الديناميكية الهوائية المتولدة، هذه الأخيرة يمكن أن تخضع لتغيرات كبيرة من خلال تأثير الإضطرابات مما يؤثر على أداء توربين الرياح لذلك وجب القيام بالدراسة الديناميكية الهوائية لتوربين الرياح لما لها من أهمية في تصميم عنصر الشفرة لتحديد الحجم المثالي و الحصول على القدرة المرغوبة من خلال نظرية الزخم المحوري و نظرية زخم عنصر الشفرة التي تعطي العلاقة بين تدفق الهواء عبر التوربين من جهة و القوى المتولدة من جهة أخرى. هذه الإعتبارات تجعل من الممكن تحديد المعاملات التي تؤثر على شكل الشفرة و تعطي مستوى أداء توربين الرياح.

## III-1) دراسات مماثلة:

بناء على المراجع و الدراسات السابقة التي إطلعنا عليها يظهر أن لهذا الموضوع أهمية كبيرة تكمن في تحسين المردود المنتج من توربين الرياح من خلال تحسين الشكل الهندسي للشفرة و المعاملات الأيروديناميكية و هذا ما تظهره لنا هذه الدراسات الموضحة في:



الشكل (III-1): مخطط يوضح الدراسات السابقة المشابهة للموضوع [50]



من بين هذه الدراسات الموضحة في الشكل السابق نذكر :

### 1. التصميم الديناميكي الهوائي و تحليل شفرة توربينات الرياح ذات المحور الأفقي (X.Tang 2012):

يبحث هذا العمل في التصميم الديناميكي الهوائي و تحليل شفرة توربينات الرياح ذات المحور الأفقي الصغير عبر النهج القائم على زخم عنصر الشفرة ( BEM ) و ديناميكيات الموائع الحاسوبية ( CFD ) لفحص الخصائص الديناميكية الهوائية لشفرة التوربينات الناتجة. من خلال هذا البحث من الممكن تصميم و تحليل شفرة توربينات الرياح الصغيرة

### 2 النمذجة الديناميكية الهوائية و الهيكلية و المرونة الهوائية لشفرة توربينات الرياح الكبيرة المركبة(2013

: (C.Zhang

يهدف هذا العمل البحثي في إلى تطوير النمذجة الديناميكية الهوائية و الهيكلية و المرونة الهوائية الحاسوبية لتصميم الشفرة المركبة و تحسينها لتكون أخف وزنا و أقوى فعالية و دائمة لشفرة توربين الرياح الكبيرة المصنوعة من مواد مركبة مغلفة بالألياف بتطوير نموذج BEM.

### 3 فعالية طرف الشفرة في أداء التوربينات الهوائية للمحور الأفقي منخفضة السرعة ( M. Ariffudin, F.

: (Zawawi, N. Kamsah, H. M. Kamar 2016

يهدف هذا البحث إلى إستكشاف إمكانية زيادة أداء توربينات الرياح ذات المحور الأفقي الصغيرة منخفضة السرعة مع أجهزة الطرف المختلفة بإستخدام ديناميكيات الموائع الحاسوبية (CFD).

### 4. التصميم الديناميكي الهوائي و تحليل توربينات الرياح ذات المحور الأفقي بقدرة 10 KW في تاينان، تايوان

: (Hesheng yu 2017)

الغرض من هذه الدراسة هو تطوير HAWT بتحديد إمكانات طاقة الرياح أولا من خلال توزيع Weibull ثم تكييفها مع تصميم شفرة التوربينات. يتم إستخدام BEMT لتحديد شكل شفرة توربينات (جنحيات S822 و S823) ثم التعديل الهندسي لشفرة توربين الرياح.

### III-2) نظريات الديناميكا الهوائية:

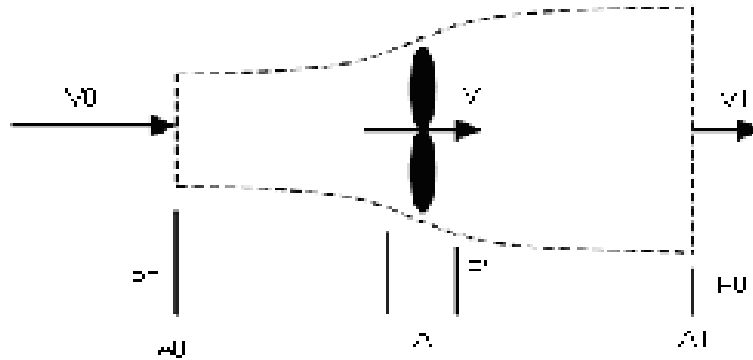
في هذا العمل يتم استخدام نظريتين في الديناميكا الهوائية فالنظرية الأولى هي نظرية التدفق المحوري (الزخم المحوري، نظرية بيتز) التي تستخدم نموذجًا أحادي البعد. و الثانية هي نظرية زخم عنصر الشفرة التي تدرس نموذجا ثنائي البعد و تأخذ في الاعتبار دوران الهواء. يجب الجمع بين هاتين النظريتين من أجل تحديد جميع البيانات الضرورية لحجم شفرات توربين الرياح ذو المحور الأفقي [51].

### III-2-1) نظرية الزخم المحوري (بيتز):

أسس العالم بيتز النظرية العالمية لآلات الرياح ذو المحور الأفقي في معهد غوتنغن في ألمانيا سنة 1920 [41]، حيث درس الكفاءة المحدودة لتوربينات الرياح الناتجة عن فرملتها من سرعة المنبع للرياح  $V_0$  إلى سرعة المصب  $V_1$  و السماح باستمرار تدفق النظام [52]. نتيجة للضياع في الكفاءة الذي تسببه اللزوجة و سحب الضغط على شفرات الدوار تم أخذ إفتراضات مثالية بإعتبار الرياح غير قابلة للضغط، و بإستخدام المعادلات الأساسية ( حفظ الكتلة، كمية الحركة و الطاقة) لتعيين كفاءة العضو الدوار (التوربين) [41].

- 1 -السرطان لا إنضغاطي أي أن كثافة الهواء ثابتة ولا توجد أي حرارة منتقلة.
  - 2 -العضو الدوار مثالي حيث يقوم بتحويل الطاقة من الرياح إلى طاقة حركية دورانية دون وجود أي فواقد في الطاقة (سواء أن كانت هذه الفواقد بسبب الإحتكاك أو بسبب الشكل الهندسي للريش).
  - 3 -يكون التدفق محوريا تماما (لا يخضع الهواء لأي حركة دورانية).
  - 4 -سرعة الرياح ثابتة بعيداً عن مستوى الجزء المتحرك.
- تم وضع محرك الرياح عند منبع مع السرعة النهائية.
- حيث تمثل:

$S$  مساحة المقطع العرضي التي تغطيها شفرات التوربين مع المقطع العرضي للهواء.  
 $S_1$  مساحة المقطع العرضي لمنبع الهواء.  
 $S_2$  مساحة المقطع العرضي لمصب الهواء.



الشكل (III-2): تدفق الهواء المحوري

بما أن تيار الهواء غير إنضغاطي فإن الكتلة تبقى محفوظة، نستطيع تطبيق معادلة الاستمرارية.

$$m' = \rho V_0 S_0 = \rho V_1 S_1 = \rho V S = \text{Constant} \quad (1 - III)$$

أيضاً من خلال تطبيق نظرية اختلاف الزخم تعطى القوة المحورية للرياح على الجزء المتحرك (الدوار) كالتالي:

$$T = m(V_0 - V_1) = \rho SV(V_0 - V_1) \quad (2 - III)$$

بتطبيق معادلة برنولي في إتجاه منبع الجزء المتحرك :

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = p + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (3 - III)$$

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p' + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (4 - III)$$

من خلال الطرح بين (3-III) و (4-III) نحصل على:

$$p - p' = \frac{1}{2}\rho(V_0^2 - V_1^2)$$

علماً:

$$T = S(p - p')$$

$$T = \frac{1}{2}S\rho(V_0^2 - V_1^2) \quad (5 - III)$$

تسمح المعادلتان (2-III) و (5-III) بكتابة:

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (6 - III)$$

سرعة تدفق الهواء عبر الجزء المتحرك هي متوسط السرعتين عند المنبع والمصب.

الإستطاعة المستخرجة من الريح هي:

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{2}\rho SV(V_0^2 - V_1^2) \quad (7 - III)$$

يعرف معامل القدرة  $C_p$  على أنه النسبة بين الإستطاعة المستخرجة من الرياح و إستطاعة الرياح المتاحة:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho SV_0^3} \quad (8 - III)$$

إدخال معامل التداخل المحوري ( الضياع المحوري)  $a$  المعرف على أنه جزء الإنخفاض في سرعة الرياح بين سرعة التدفق الحر و

منبع الجزء المتحرك :

$$V = (1 - a)V_0 \quad (9 - III)$$

باستخدام المعادلة (6-III):

$$V_1 = (1 - 2a)V_0 \quad (10 - III)$$

بتعويض  $V_1$  في (5-III) نحصل على:

$$T = \frac{1}{2} \rho S V_0^2 [4a(1-a)] \quad (11 - III)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho S V_0^3 [4a(1-a)^2] \quad (12 - III)$$

يصبح تعبير  $C_p$ :

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (13 - III)$$

القيمة القصوى النظرية لمعامل القدرة و المعروفة بإسم حد Betz، يمكن الحصول عليها بأخذ مشتق  $C_p$  بالنسبة ل  $a$  و مساواته بالصفر:

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(1-a)(1-3a) = 0$$

هذا يعطي:

$$a = \frac{1}{3}$$

$$C_p = \frac{16}{27} \approx 0.59259$$

يمثل  $0.593 \approx \frac{16}{27}$  أقصى جزء من الطاقة التي تمر عبر أنبوب التيار القابل للإسترداد نظرياً و وفقاً لقانون بيتز لا يمكن لأي توربين رياح في العالم إستخدام أكثر من 0.593 من الطاقة الحركية للرياح وهذا المقدار يعرف بمعامل بيتز [41].

لا يتم الوصول إلى هذه الكفاءة بسبب التأثيرات التالية [53]:

- دوران الجزء المتحرك يسبب إضطراب تدفق الهواء.
- قوة السحب لا تساوي الصفر بسبب الاحتكاك.
- تحتوي المروحة على عدد محدود من الشفرات.

لا يصف هذا النموذج البسيط أحادي البعد التدفق الدوراني للهواء لكنه يسمح بتعريف بعض المفاهيم الأساسية في تشغيل توربينات الرياح.

لكي تستخرج الطاقة من الرياح يجب أن تنخفض سرعة الرياح عندما تصطدم بالجزء المتحرك.

من معادلة الاستمرارية ( III - 1)، يزداد المقطع العرضي للهواء الذي تجتاحه الرياح في اتجاه المصب، بحيث

$$S_1 = 3S_0$$

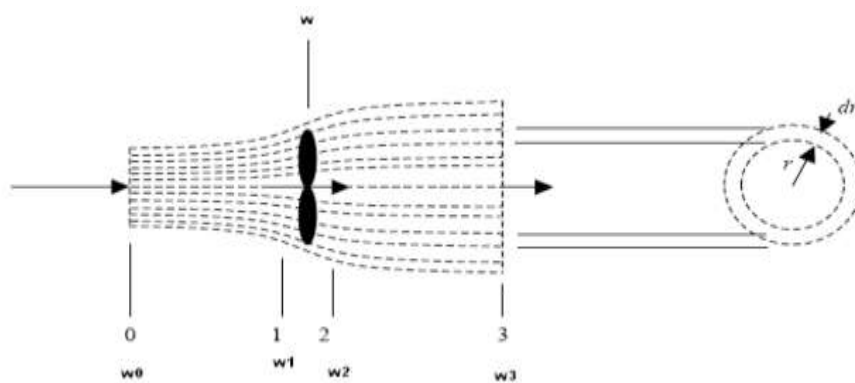
أخيراً من المستحيل عملياً استخراج كل الطاقة المتاحة من الرياح، فكفاءة توربينات الرياح لا تتجاوز 45٪.

### III-2-2) نظرية زخم عنصر الشفرة:

في النموذج السابق كان من المفترض أن التدفق لا يخضع لأي حركة دوران، ولكن في الواقع يفرض قانون الحفاظ على الزخم الزاوي أن الهواء يجب أن يكون له حركة دورانية بحيث يتمكن الدوار من استخراج عزم دوران مفيد. في هذه الحالة يكون اتجاه دوران تدفق الهواء معاكسا لاتجاه الدوار.

يسمح إدخال الحركة الدورانية للهواء لهذا النموذج بمقاربة الواقع بشكل أفضل و الحصول على نتائج أكثر موثوقية. في تطوير هذا النموذج يتم استخدام الافتراضات التالية [54]:

- 1 - يكون تدفق المنبع بعيداً عن مستوى الدوار محورياً تماماً.
- 2 - عند المستوى الدوار تكون السرعة الزاوية لدوران الهواء  $\omega$ ، هذه السرعة تنخفض بشكل كبير بعيداً عن الدوار في اتجاه المصب، بحيث يمكن اعتبار الضغط الساكن عند هذه النقطة مساوياً للضغط الجوي.
- 3 - لا يوجد تداخل بين العناصر المجاورة للشفرة.
- 4 - يعتبر تدفق الهواء حول عنصر من الشفرة ثنائي الأبعاد.
- 5 - يمكن الحصول على تعبيرات الطاقة المستخرجة و عزم الدوران المطبق على الشفرات من خلال النظر في تدفق الهواء عبر عنصر حلقي نصف قطره  $r$  و سمكه  $dr$  و مساحة مقطعه  $dS = 2\pi r dr$  (الشكل III-3).



الشكل (III-3): تدفق الهواء عبر عنصر حلقي

يتم استنتاج القوة المحورية الأولية من المعادلة (III-11)، عن طريق استبدال السطح  $S$  للعضو الدوار بالجزء قسم العنصري الحلقي  $dS$ ، فنحصل على:

$$dT = 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr \quad (III-14)$$

يعطي الاختلاف في مقدار حركة الهواء في الاتجاه العرضي القوة العرضية المؤثرة على الشفرة:

$$dF_t = \dot{m} dV_t = \rho V dS \omega r \quad (15 - III)$$

$$dF_t = 2\pi\rho V \omega r^2 dr \quad (16 - III)$$

العزم المتولد في المقطع الحلقي هو:

$$dQ = 2\pi\rho V \omega r^3 dr \quad (17 - III)$$

حيث أن الإستطاعة هي:

$$P = Q\Omega$$

الإستطاعة الأولية المستخرجة من خلال المقطع الحلقي هي:

$$dP = 2\pi\rho\Omega V \omega r^3 dr \quad (18 - III)$$

$\omega$  هي السرعة الزاوية لدوران تدفق الهواء في مستوى الدوار.

يصبح العزم الكلي والإستطاعة الكلية:

$$Q = 2\pi\rho \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (19 - III)$$

$$P = 2\pi\rho\Omega \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (20 - III)$$

من أجل حساب القدرة وعزم الدوران (P و Q) من الضروري تحديد  $\omega$ ، لذلك يقدم عامل التداخل العرضي  $a'$  ويحدد على النحو التالي:

$$\omega = a' \Omega \quad (21 - III)$$

بما أن تدفق الهواء المنبع بعيد عن الدوار محوري تمامًا، لدينا:

$$\omega_0 = 0$$

بتطبيق قانون حفظ الزخم الزاوي بين المقطعين 0 و 1 الموجودين قبل مستوى الدوار مباشرة، نحصل على:

$$\omega_0 r_0^2 = \omega_1 r_1^2 \quad (22 - III)$$

هذا يعني أن:

$$\omega_1 = 0$$

يمكن استنتاج أن السرعة الزاوية لتدفق الهواء تخضع لانقطاع في مستوى الجزء المتحرك، هذا بسبب عزم الدوران المبدول

على الدوار.

قيمة السرعة الزاوية للهواء على مستوى الجزء المتحرك هي متوسط السرعتين الزاويتين قبل وبعد الدوار [55]:

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (23 - III)$$

لذلك :

$$\omega_2 = 2\Omega a' \quad (24 - III)$$

بتطبيق قانون الحفظ على الزخم الزاوي بين المقطعين 2 و 3 ، نحصل على :

$$\omega_2 r_2^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (25 - III)$$

بما أن :

$$r_1 \approx r_2 \approx r$$

تصبح المعادلة (25 - III) :

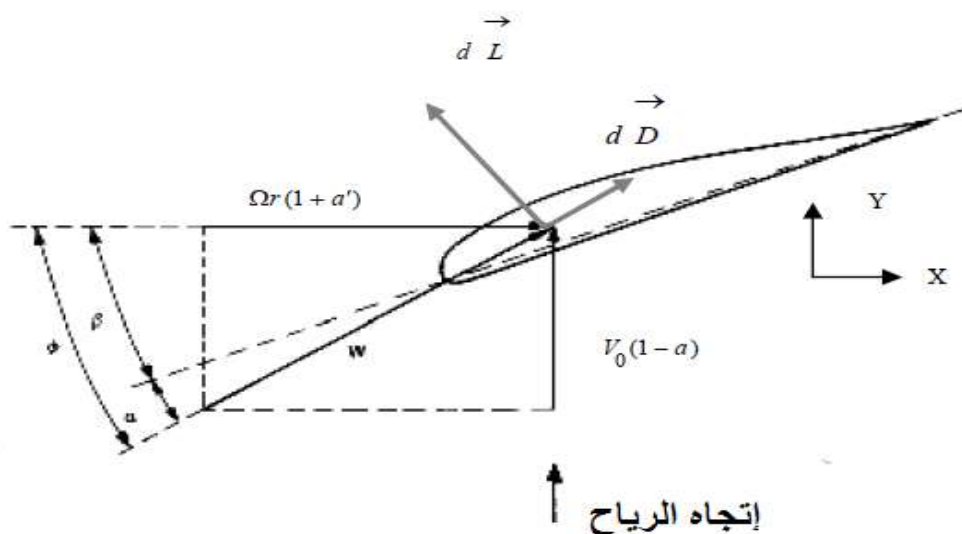
$$\omega_2 r^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (26 - III)$$

و منه :

$$\omega_3 = \omega_2 \left( \frac{r}{r_3} \right)^2 \quad (27 - III)$$

$$\omega_3 = 2\Omega a' \left( \frac{r}{r_3} \right)^2 \quad (28 - III)$$

نظرًا لأن نصف القطر يزداد أثناء تحركه بعيدًا عن الجزء المتحرك في اتجاه المصب، فإن المعادلة (28 - III) توضح أن سرعة دوران الهواء تتناقص بسرعة أكبر أثناء تحركه بعيدًا في نفس الاتجاه، وهذا يؤكد الفرضية الثانية لنظرية عنصر الشفرة.



الشكل (III-4): مقطع من عنصر من الشفرة في دائرة نصف قطرها r

W : سرعة الهواء النسبية

$$dS = cdr \quad \Rightarrow \quad dq = \frac{1}{2} \rho W^2 cdr \quad (29 - III)$$

لدينا:

$$C_l = \frac{dL}{dq} \quad (30 - III)$$

$$C_d = \frac{dD}{dq} \quad (31 - III)$$

L : قوة الرفع.

D : قوة السحب.

$C_l$  : معامل الرفع.

$C_d$  : معامل السحب.

$$C_x = \frac{dF_x}{dq} \quad (32 - III)$$

$$C_y = \frac{dF_y}{dq} \quad (33 - III)$$

$dF_x$  : هي القوة العرضية الأولية المؤثرة على شفرة واحدة.

$dF_y$  : هي القوة المحورية الأولية التي تمارس على شفرة واحدة.

من الشكل (4 - III) يمكننا أن نكتب:

$$C_y = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (34 - III)$$

$$C_x = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (35 - III)$$

لدينا:

$$dF_t = N_p dF_x$$

$$dT = N_p dF_y$$

$N_p$  : عدد الشفرات.

من الشكل (1 - III) لدينا:



$$\alpha = \phi - \beta \quad (36 - III)$$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\Omega r} \quad (37 - III)$$

$\alpha$ : هي زاوية الهجوم.

$\beta$ : هي زاوية الالتواء.

القوة المحورية وعزم الدوران لعنصر من عناصر النصل هما:

$$dT = N_p C_y dq = N_p C_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (38 - III)$$

$$dQ = N_p C_x dq r = N_p C_x \frac{1}{2} \rho W^2 C r dr \quad (39 - III)$$

يسمح الشكل (III - 4) أيضًا بكتابة:

$$W = \frac{V}{\sin \phi} = \frac{V_0(1-a)}{\sin \phi} \quad (40 - III)$$

$$W = \frac{\Omega r (1-a')}{\cos \phi} \quad (41 - III)$$

وتعطي تساوي المعادلة (III - 14) مع (III - 38) وتساوي المعادلة (III - 17) مع (III - 39):

$$\frac{a}{1-a} = \frac{c N_p C_y}{8 \pi r \sin^2 \phi} \quad (42 - III)$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{c N_p C_x}{8 \pi r \sin \phi \cos \phi} \quad (43 - III)$$

يُعرّف مُعامل الصلابة المحلي على النحو التالي [56]:

$$\sigma = \frac{c N_p}{2 \pi r} \quad (44 - III)$$

حل المعادلتين (III - 42) و (III - 43) يعطي تعبيرات  $a$  و  $a'$  على التوالي:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (45 - III)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_x} - 1} \quad (46 - III)$$

ملاحظة:

يذكر بعض المؤلفين ([57] و [58] و [59]) أنه يجب حذف معامل السحب من المعادلتان (III - 34) و (III - 35)، وهذا ما يبرره حقيقة أن بعض المعلمات مثل القوة المحورية، وكذلك تم حساب الاستطاعة في النظرية الأولى بدون مراعاة للاحتكاكات. المساواة في هذه التعبيرات التي حصلنا عليها من خلال النظريتين تلزمنا بأخذ  $C_d = 0$ . من ناحية أخرى يواصل مؤلفون آخرون [60] إستعمال مصطلح السحب ( $C_d$ )، مع العلم أنه في وجود عدد محدود من الشفرات فإن افتراض أن التدفق متماثل دورانيا لم يتم التحقق منه.

يتم تحديد هذه الظاهرة من خلال عامل تقليل حركة المرور الذي اقترحه Prandtl و محدد بالصيغة التالية:

$$F = \frac{N_p \Gamma}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{\pi a r \cos(e^{-f})} \quad (47 - III)$$

$$f = \frac{\frac{N_p}{2}(R-r)}{r \sin \phi} \quad (48 - III)$$

$\Gamma$  هو الدوران الفعال للشفرة عند دائرة نصف قطرها  $r$ .

$\Gamma_\infty$  هو دوران المروحة التي تحتوي على عدد لا نهائي من الشفرات.

تصبح عوامل التداخل المحوري والعرضي:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (49 - III)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_x} - 1} \quad (50 - III)$$

عمليا، فإن هذا التصحيح له تأثير ضئيل جداً على التنبؤ بأداء توربينات الرياح وغالباً ما يتم تجاهلها [54].

### III-3) الحجم الأمثل للشفرات للحصول على أقصى طاقة:

بالنسبة لعنصر حلقي من الهواء بنصف قطر  $r$  وسمك  $dr$ ، يمكننا تطبيق معادلة برنولي لاستنتاج فرق الضغط الأولي عبر المقطع الحلقي للشفرات، مع العلم أنه عند عبور المروحة تزداد السرعة الزاوية النسبية للهواء  $\Omega$  إلى  $\Omega + \omega_2$  بينما تظل السرعة المحورية دون تغيير:

$$p + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 = p' + \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega_2)^2 r^2$$

$$p - p' = \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 \quad (51 - III)$$

القوة المحورية المؤثرة على العنصر الحلقي للجزء المتحرك هي:

$$dT = \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 2\pi r dr \quad (52 - III)$$

يعرف معامل التداخل العرضي  $a$  الذي يتم التعبير عنه بواسطة المعادلة (III - 24):

$$a' = \frac{\omega_2}{2\Omega}$$

يمكن كتابة تعبير القوة المحورية على العنصر الحلقي على النحو التالي:

$$dT = 4a' (1 + a') \rho \Omega^2 r^2 \pi r dr \quad (53 - III)$$

يعطي قسمة المعادلتين (III - 14) و (III - 53):

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_0^2} \quad (54 - III)$$

أخذ السرعة المحددة (نسبة السرعة) على النحو التالي:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

والسرعة المحلية المحددة [56]:

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0}$$

المعادلة (III - 54) تصبح:

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \lambda_r^2 \quad (55 - III)$$

يمكن كتابة التعبير عن الإستطاعة المستخرجة في المعادلة (III - 20):

$$P = 2\pi\rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1 - a) a' r^3 dr$$

أو :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_0^3 \cdot \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1 - a) a' r^3 dr \quad (56 - III)$$

تمت صياغة معامل القدرة  $C_p$  على النحو التالي:

$$C_p = \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1 - a) a' r^3 dr \quad (57 - III)$$

تسمح المعادلتان (III - 55) و (III - 59) بالتعبير عن  $K$  كدالة لـ  $a$ .

$$K(a, a') = a'(1 - a) \quad (58 - III)$$

يعتمد معامل القدرة على العامل K بحيث يصل إلى قيمته القصوى  $C_p max$  إذا كان التعبير K هو الحد الأقصى (أي مشتق بالنسبة لـ  $a$  و مساواته بالصفر) [61].

$$k = \max \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (59 - III)$$

$$\frac{\partial K}{\partial a} = a' \frac{\partial(1-a)}{\partial a} + (1 - a) \frac{\partial a'}{\partial a}$$

$$\frac{\partial K}{\partial a} = (1 - a) \frac{\partial a'}{\partial a} - a' = 0$$

$$a' = (1 - a) \frac{\partial a'}{\partial a} \quad (60 - III)$$

من المعادلة (55 - III)

$$\lambda_r^2 a' (1 - a') = a(1 - a)$$

$$\lambda_r^2 (1 + 2a') \frac{da'}{da} = (1 - 2a) \quad (61 - III)$$

باستعمال المعادلتين (61 - III) و (62 - III) نجد:

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (62 - III)$$

من المعادلتين (55 - III) و (63 - III):

$$\frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} = \lambda_r^2 \quad (63 - III)$$

تعطي المعادلة (63- III) العلاقة بين  $a$  و  $a'$  بحيث يكون معامل القدرة هو الحد الأقصى  $C_p max$ ، وهذا يعني أن القدرة المستخرجة بواسطة الدوار في هذه الحالة هي الحد الأقصى.

### III-3-1 حساب الشكل الأمثل للشفرة:

تصميم الشكل الأمثل للشفرة يعني أن العلاقة الأخيرة (63 - III) التي تقبل الحد الأقصى من الطاقة محققة.

إذا تم إهمال الاحتكاك في الاتجاه المحوري بأخذ  $C_d = 0$  يصبح التعبير عن المعادلتين (45 - III) و (46 - III) :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_L \cos \phi} + 1} \quad (64 - III)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L} - 1} \quad (65 - III)$$

$C_L$ : القيمة المثلى لمعامل الرفع [62].

إذا استبدلنا التعبير (III - 63) في المعادلة الأخيرة، نحصل على:

$$a = \frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L + 12 \cos \phi} \quad (66 - III)$$

تعطي المساواة بين تعبيري a في المعادلتين (III-66) و (III-68) المعادلة التربيعية ذات المجهول  $\sigma C_L$ :

$$(\sigma C_L)^2 + 8 \cos \phi \sigma C_L - 16 \sin^2 \phi = 0 \quad (67 - III)$$

تقبل هذه المعادلة حلين:

$$\sigma C_L = -4(\cos \phi + 1) \quad (68 - III)$$

$$\sigma C_L = 4(1 - \cos \phi) \quad (69 - III)$$

الجذر الأول غير مقبول لأن  $\sigma C_L < 0$

يعطي الجذر الثاني المعطى بواسطة (III - 71) التعبير الأمثل للوتر على طول الشفرة:

$$C_r = \frac{8\pi r}{N_p C_l} (1 - \cos \phi) \quad (70 - III)$$

لتحديد الزاوية المثلى  $\phi$  وبالتالي الزاوية المثلى لالتواء  $\beta$  ينبغي النظر في تحويلات مماثلة.

يمكن كتابة الصيغة (III - 37) على النحو التالي:

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{(1+a')} \frac{1}{\lambda_r} \quad (71 - III)$$

إذا عوضنا المعادلة (III - 63) في المعادلة الأخيرة، نحصل على:

$$\lambda_r = \frac{(4a-1)(1-a)}{a} \frac{1}{\tan \phi} \quad (72 - III)$$

بتعويض المعادلة (III - 66) في المعادلة (III - 74) تعطي:

$$\lambda_r = \frac{(2 \cos \phi - 1)(1 + \cos \phi)}{(1 + 2 \cos \phi) \sin \phi} \quad (73 - III)$$

يمكن تبسيط هذه المعادلة على النحو التالي:

$$\lambda_r = \frac{\cos \phi + \cos 2\phi}{\sin \phi + \sin 2\phi} \quad (74 - III)$$

حيث:

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2}\phi} \quad (75 - III)$$

أخيراً ننتهي بـ:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (76 - III)$$

نستنتج زاوية التواء  $\beta$  المثلى من المعادلة (III - 36):

$$\beta = \phi - \alpha_{opt} \quad (77 - III)$$

$\alpha_{opt}$ : هي الزاوية المثلى للهجوم عند  $\left(\frac{c_l}{c_d}\right)_{max}$  [63].

$$\alpha_{opt} = \frac{c_l(\alpha)}{c_d(\alpha)} = max \quad (78 - III)$$

باستخدام المعادلتين (III - 72) و (III - 79)، يتم الحصول على الوتر و زاوية إلتواء الشفرة.

### III-4) تصميم سرعة الرياح و سرعة الرياح المقدره:

سرعة الرياح المقدره هي السرعة التي تصل عندها توربينات الرياح إلى قوتها المقدره. و يتم تعريف سرعة الرياح المصممة على أنها سرعة الرياح التي تعمل عندها التوربينات الرياح بمعامل القدرة القصوى  $C_p$ .

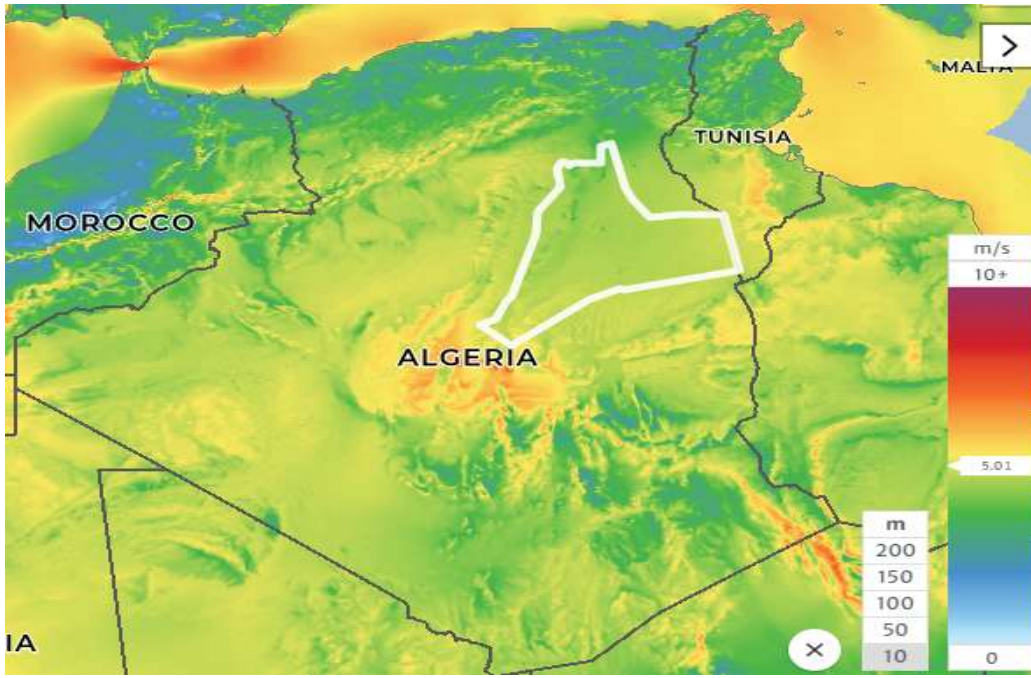
بالنسبة لتوربينات الرياح متغيرة السرعة، فيتم تصميمها لتعمل بأقصى نسبة من سرعة الرياح المقطوعة إلى سرعة الرياح

المقدره، لذلك يتم تحديد سرعة الرياح المصممة بنفس سرعة الرياح المقدره لتوربينات الرياح. بالنظر إلى متوسط سرعة الرياح السنوي (AMWS) فمنطقة ورقلة تمتلك سرعة ريحية معتبرة ما يسمح بإستغلالها في إنتاج الطاقة الكهربائية. تم الإطلاع على قيمتها في عدة مراجع فحسب مصلحة الأرصاد الجوية المكتب الجهوي - ورقلة METEO تقدر بـ 5.45 m/s في سنة 2019 (الملحق أ) [9]، أما بالنسبة لموقع GLOBAL WIND ATLAS فإن سرعة الرياح تكون حوالي 5.01 m/s (الشكل III - 5) و بهذا يمكن الإعتماد على نتائج الموقع الخاص بالملاحه الجوية العالمية و إعتبار السرعة المتوسطة 5 m/s.

حسب المنظمة العالمية لتوحيد القياس IEC 61400-2 فإن سرعة التصميم  $V_{design} = 7 m/s$  حسب

العلاقة التالية [64]:

$$V_{design} = 1.4 V$$



الشكل (III-5): سرعة الرياح المتوسطة لمنطقة ورقلة على بعد 10 m حسب GLOBAL WIND ATLAS [65]

### III-5 طول الشفرة:

وفقا للتحليل الإحصائي لبيانات الرياح بمنطقة ورقلة يكون نصف قطر الشفرة محسوب على النحو التالي:

$$P = C_p \cdot \eta_g \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{design}^3 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{P}{C_p \cdot \eta_g \cdot \frac{1}{2} \rho V_{design}^3 \pi}} \quad (79 - III)$$

حيث:

$P$  هي الطاقة الاسمية للمولد، ب  $W$ .

$\eta_g$  كفاءة المولد يقدر بقيمة  $(\eta_g = 0.85)$ .

$C_p$  معامل القدرة يقدر بقيمة  $(C_p = 0.48)$ .

بحساب مجموع هاته الكفاءتين نجد أن  $C_p = 0.4$ .  $\eta_g$  هي قيمة نظرية خاصة بالتصميم [64].

$\rho$  الكتلة الحجمية للهواء  $(\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3)$ .

$V_{design}$  سرعة الرياح المقدرة ب  $m/s$ ، و هي أيضا السرعة المصممة لتوربينات الرياح 5 kW.

$R$  هو نصف قطر الشفرة ب  $m$ .

- و منه نصف قطر الشفرة توربين الرياح المناسب للظروف المحلية لمنطقة ورقلة لإنتاج 5 kW هو  $R = 4.5 \text{ m}$ .

### III-6) رقم رينولدز:

من بين الخصائص التي تدخل في تصميم و تحليل شفرة توربينات الرياح من الضروري الحصول على البيانات الديناميكية الهوائية للجناح المختار في ظروف التدفق. يتم تعريف رقم رينولدز [47]:

$$Re = \frac{U_{Rel} c}{\nu}$$

حيث:

$U_{Rel}$ : سرعة الرياح النسبية بـ m/s.

$c$ : طول الوتر بـ m.

$\nu$ : اللزوجة الحركية للهواء ( $\nu = 14.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

يمكن الحصول على رقم رينولدز من سرعة الرياح النسبية كما هو موضح في الجدول (III - 1):

الجدول (III - 1): أرقام رينولدز المقدره في سرعة رياح عملية مختلفة

V (m/s)	$U_{rel}$ (m/s)	Re
3	21.2	802944
6	21.8	826681
9	22.8	864797
12	24.2	915497
15	25.8	975823
18	27.7	1046910

نجد أن رينولدز لا يختلف بشكل كبير عندما تكون سرعة الدوار ثابتة و يكون في حدود 800000 - 1000000

عند سرعة رياح تختلف من 3 m/s إلى 18 m/s.

لتبسيط عملية التصميم نختار في الدراسة  $Re = 1000000$  [62, 66].



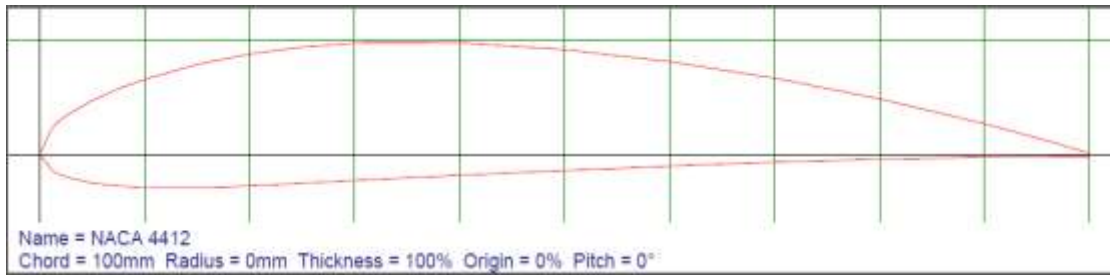
## III-7) النموذج التحليلي [67]:

تتمثل الخطوة الأولى لتصميم شفرة الرياح في تحديد ملف تعريف الجنيح و الحصول على معلومات التصميم الخاصة به [68]. يوضح الشكل (III-6) الجنيح NACA 4412 الذي تم اختياره كملف جانبي لتوربينات الرياح الصغيرة و الأكثر إستعمالا في الصناعة.

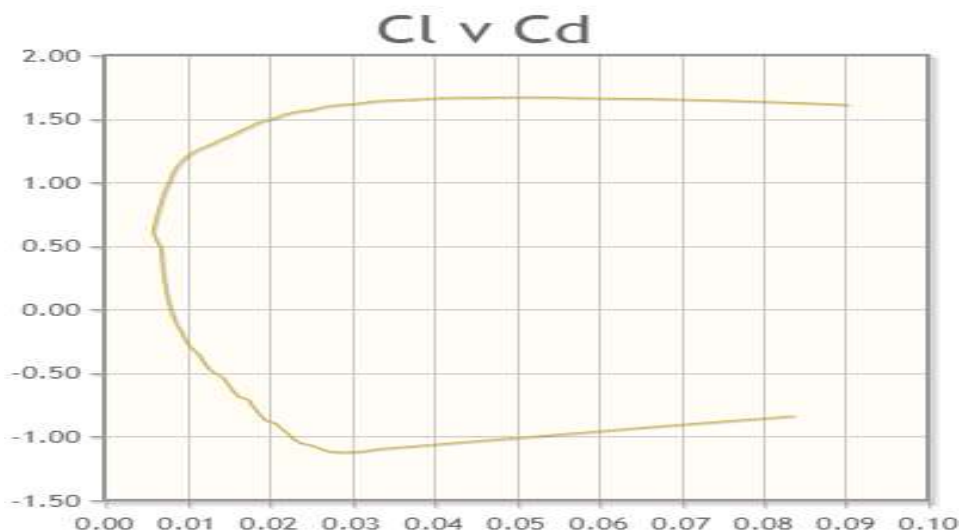
معاملات الرفع و السحب لجنيح NACA 4412 موضحة في الشكل (III-7) و الشكل (III-8)، و نسبة معامل الرفع إلى معامل السحب  $\frac{C_L}{C_D}$  موضحة في الشكل (III-9). تم الحصول على هذه الرسوم البيانية من موقع Aerofoil tools الخاص بشفرات التوربين و يمكن الحصول عليها أيضا من برنامج Q-blade، نلاحظ من خلال هذا بالنسبة للقيم المنخفضة لزاوية الهجوم ينتج الجناح الجوي قدرا كبيرا من الرفع مع القليل من السحب.

عند زاوية الهجوم  $\alpha = 5.25^\circ$  تحدث ظاهرة تعرف باسم المماثلة حيث توجد زيادة هائلة في السحب وانخفاض حاد في الرفع عندها تكون  $\alpha_{opt}$ . و بالتالي تحديد نقطة التصميم للجنيح NACA 4412 [67, 69].

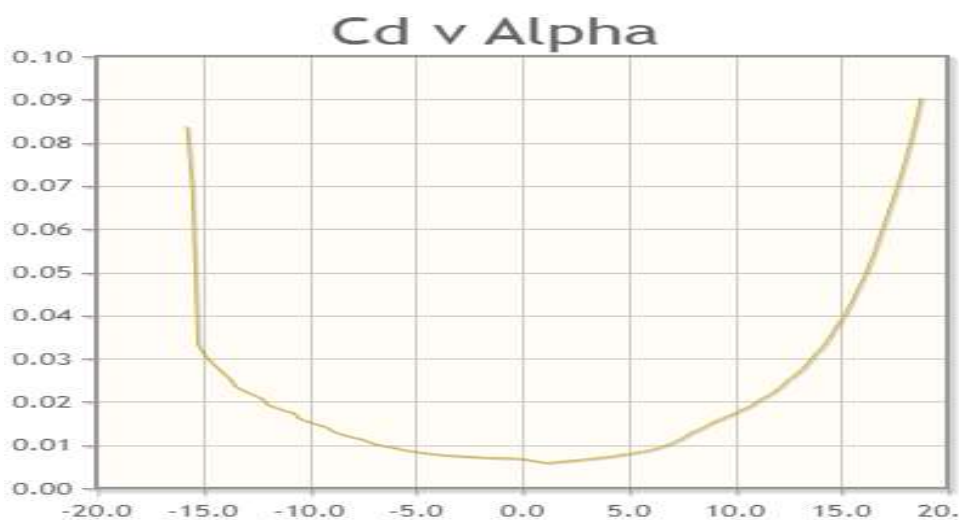
في الدراسة التالية سيتم شرح تصميم شفرة HAWT بواسطة المعادلات المشتقة من نظرية BEM لشفرة جنيح NACA 4412. تم تطوير طريقة تحديد شكل الشفرة لتحقيق الأداء الأمثل للتوربين.



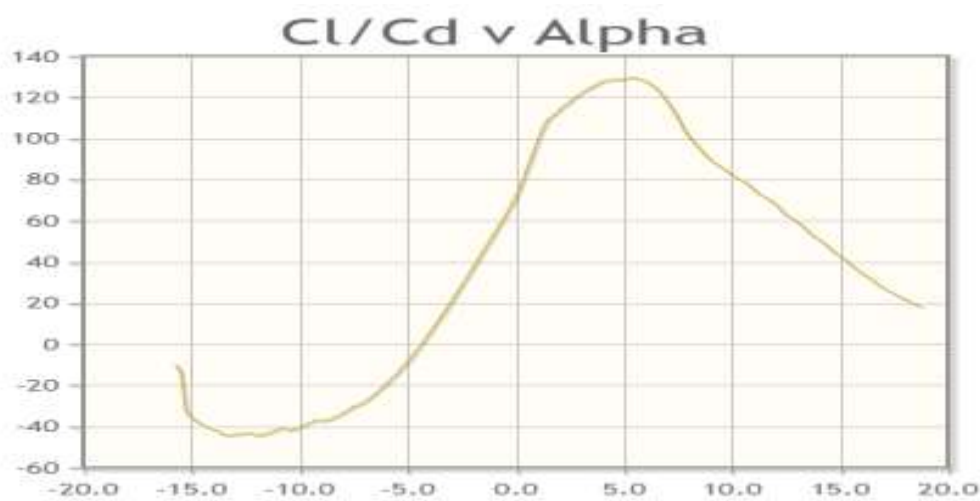
الشكل (III-6): الجنيح NACA 4412



الشكل (III-7): منحنى يمثل معامل الرفع بدلالة معامل السحب



الشكل (III-8): منحنى يمثل معامل السحب بدلالة  $\alpha$



الشكل (III-9): منحنى نسبة معامل الرفع إلى معامل السحب بدلالة  $\alpha$

## الخاتمة:

خلال هذا الفصل تم تقديم عرض للنظريات الديناميكية الهوائية الأساسية اللازمة لتحليل تدفق الرياح عبر العنصر الدوار. لقد تم البدء بعرض النظرية العامة للديناميكا (نظرية بيتز) التي يكون فيها التأثير الديناميكي الهوائي مثالي (بدون الخسائر) مما يعطي أول نصح في تحديد المعلمات الديناميكية الهوائية لتوربين الرياح، هذه النظرية تتميز ببساطتها و قوتها في نمذجة تشغيل توربينات الرياح. يصبح المشكل أكثر إثارة للإهتمام و لكنه أكثر تعقيدا بإدخال الخسائر في دوار توربينات الرياح، هذه المهمة تتطلب إدخال نظريات الدوامية التي تسمح بمقاربة الواقع بشكل أفضل و الحصول على نتائج أكثر موثوقية. تم تفصيل هذه الخطوات و تطوير المعادلات في نظرية زخم عنصر الشفرة ثم تم إعادة حساب معاملات الخسارة و معلمات الشفرة و القوى الديناميكية الهوائية لتقدير أداء توربين الرياح و تحليل هيكل المروحة.

# الفصل الرابع:

---

محاكاة الدراسة الديناميكية الهوائية و تصميم  
الشفرة

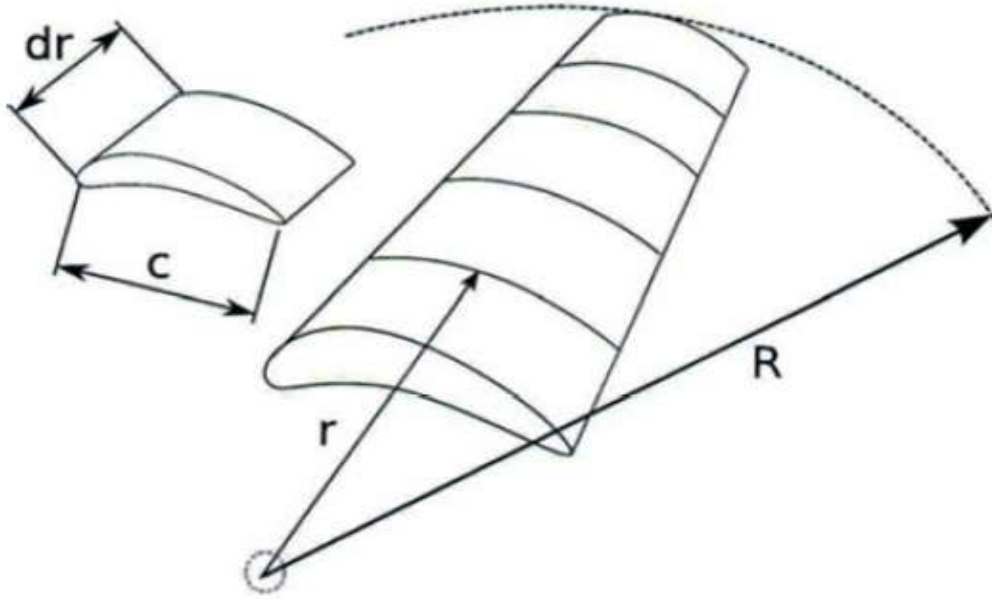
## مقدمة:

إن مسألة تحديد المعاملات الديناميكية الهوائية الضرورية لضمان التغير الأمثل للشفرة للحصول على أفضل أداء ، تم إقتراح إجراء تصميم لشفرة توربين الرياح من خلال النتائج العددية المتحصل عليها من برنامج 'Matlab' و المحاكاة للظاهرة الفيزيائية الحقيقية و كذا التنبؤ بتطورها، يتم إستخدام المعاملات التي تم الحصول عليها من البرنامج مباشرة في تصميم النموذج ثلاثي الأبعاد للشفرة بأستعمال برنامج «SolidWorks» CAO و محاكاة توزيع الضغوط و السرعات بإستعمال برنامج .ANSYS.

## 1-IV) تحديد المعادلات الهندسية لشفرة توربين الرياح:

من خلال المعادلات التي تم الحصول عليها في الفصل السابق التي توضح توزيع الزوايا و طول الوتر يكون حلها بشكل تكراري بإعتبار الشفرة لديها N مقطع كما هو موضح في الشكل (1 - IV).

كل مقطع من هذه الشفرة يختبر تدفق مختلف قليلا لأن لديه دوران مختلف السرعة و طول وتر C و زاوية إلتواء  $\beta$  مختلفان.



الشكل (1-IV): نموذج عنصر الشفرة [47]

من خلال معاملات الشفرة الوتر و زاوية الإلتواء لكل مقطع، من الضروري تحديد المقاطع المختلفة للشفرة أي إحدائيات الملف الشخصي الموافق لكل مقطع. للقيام بذلك تم إنشاء برنامج في 'Matlab' يجعل من الممكن حساب كل تفاصيل ملف تعريف NACA 4412، فيعطي هذا البرنامج إحدائيات كل مقطع (الوتر C و زاوية الإلتواء  $\beta$  و المسافة من المركز r).

**IV-1-1) تلخيص الخطوات:**

تم تلخيص الخطوات التالية لحساب التوزيع الأمثل لطول الوتر و زاوية الإلتواء على طول الشفرة :

$$1- \text{ و } a' \text{ ثابتان في هذه الحالة حيث } a = \frac{1}{3} \text{ و } a' = 0.$$

2- في كل مرة نعطى قيمة لـ  $\Gamma$  مسافة عنصر الشفرة مقارنة بمركز المروحة.

$$3- \text{ حساب } \phi(r) \text{ من المعادلة (III - 77).}$$

4- تحديد زاوية السقوط  $\alpha_{\text{optim}}$  التي تحددها المعادلة (III - 79) من الجدول الخاص للمظهر الجانبي NACA 4412 (الملحق ب).

$$5- \text{ حساب زاوية الإلتواء } \beta(r) \text{ المثالية من المعادلة (III - 80).}$$

6- حساب التوزيع الأمثل للوتر  $C_{\text{optim}}(\Gamma)$  على طول الشفرة من المعادلة (III - 71) مع معامل تصميم الرفع الأمثل  $C_l \text{ design}$  الذي يتوافق مع  $\alpha_{\text{optim}}$  (الملحق ب).

نأخذ البيانات التالية :

- طول قطر  $R=4.5 \text{ m}$  الشفرة.

- سرعة الرياح التصميمية  $V_{\text{design}} = 7 \text{ m/s}$ .

- السرعة المحددة  $\lambda=6$ .

- عدد الشفرات  $N_p = 3$ .

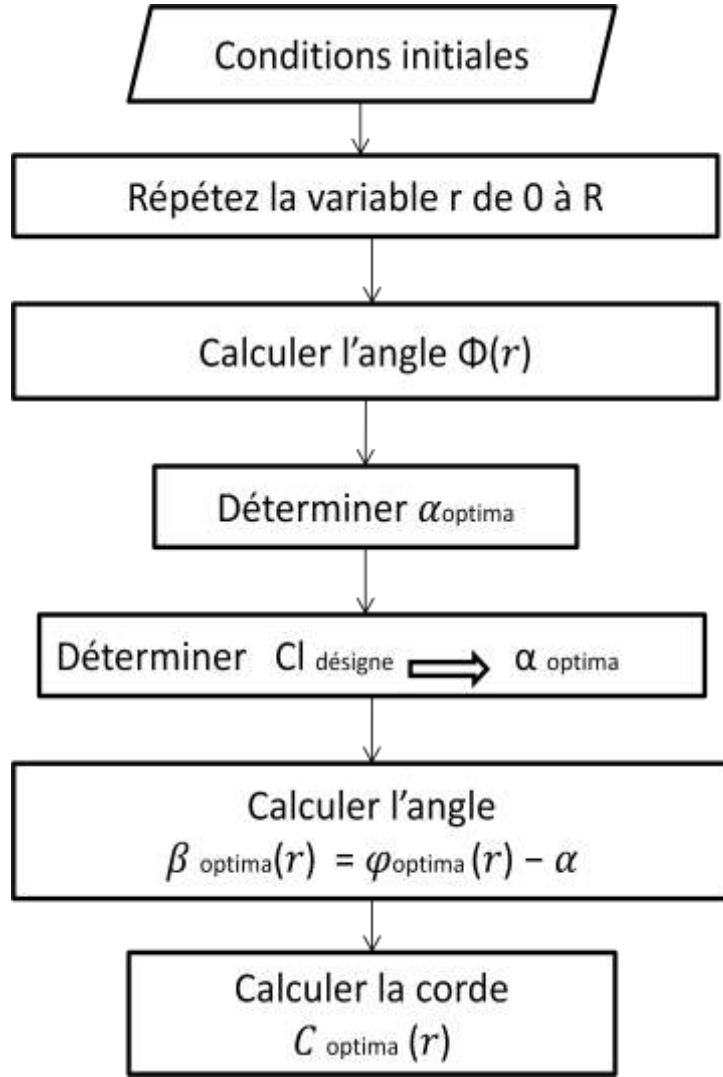
- السرعة الزاوية  $\Omega = 9.33 \text{ rad/s}$ .

- الكتلة الحجمية  $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$ .

- نوع ملف التعريف المستخدم NACA 4412.

**IV-1-2) المخطط السهمي:**

تم رسم المخطط الإنسيابي لحساب التوزيع الأمثل لطول الوتر و زاوية الإلتواء على طول الشفرة بناء على الخطوات السابقة في الشكل (IV - 2):



الشكل (IV-2): مخطط إنسيابي لطريقة تحديد الشكل الأمثل للشفرة

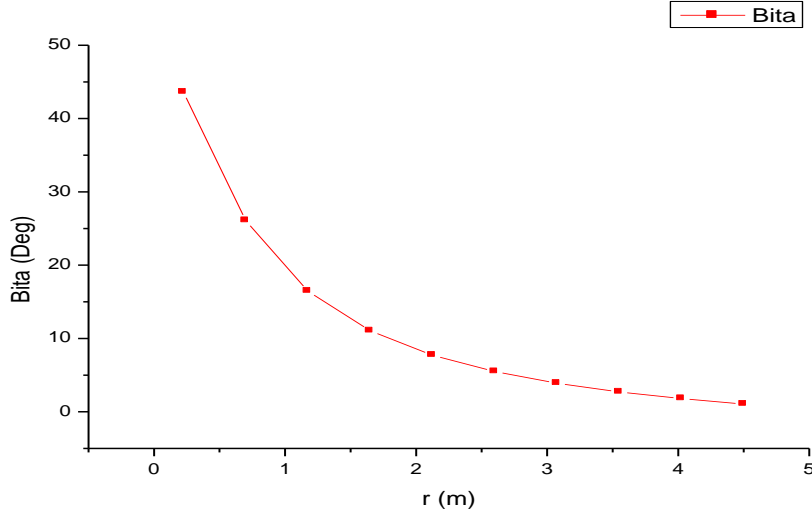
#### 2-IV مناقشة نتائج Matlab:

بعد إنشاء برنامج بلغة ' Matlab ' وفقا للمخطط السهمي السابق تم رسم النتائج المتحصل عليها في الرسوم البيانية

التالية الموافقة لحالة الخسائر المحورية :

#### 1-2-IV توزيع زاوية الإلتواء $\beta(r)$ :

يوضح الشكل (IV - 3) التالي توزيع زاوية الإلتواء على طول الشفرة لنموذج NACA 4412.

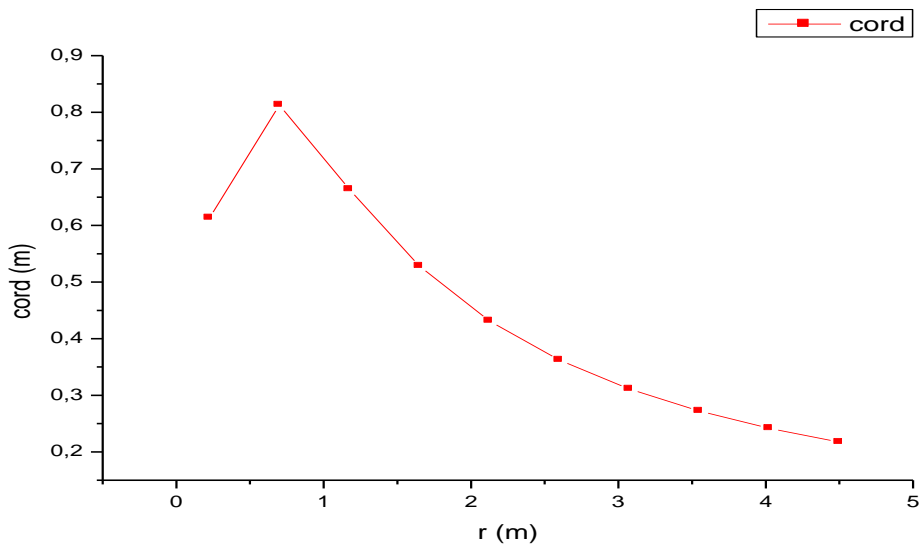


الشكل (IV-3): توزيع زاوية الإلتواء المثالية على طول الشفرة للملف NACA 4412

- نلاحظ أن زاوية الإلتواء  $\beta$  للشفرة الصغيرة تكون قصوى عند الجدار  $43.61^\circ$  و تنخفض بإتجاه الطرف حتى تصل إلى القيمة  $1.05^\circ$ .
- التوزيع المحسوب لزاوية الإلتواء غير خطي.

#### IV-2-2) توزيع الوتر (r) :C

يوضح الشكل (IV - 4) التالي توزيع الوتر على طول الشفرة لملف NACA 4412.



الشكل (IV-4): توزيع الوتر المثالي على طول الشفرة للملف NACA 4412



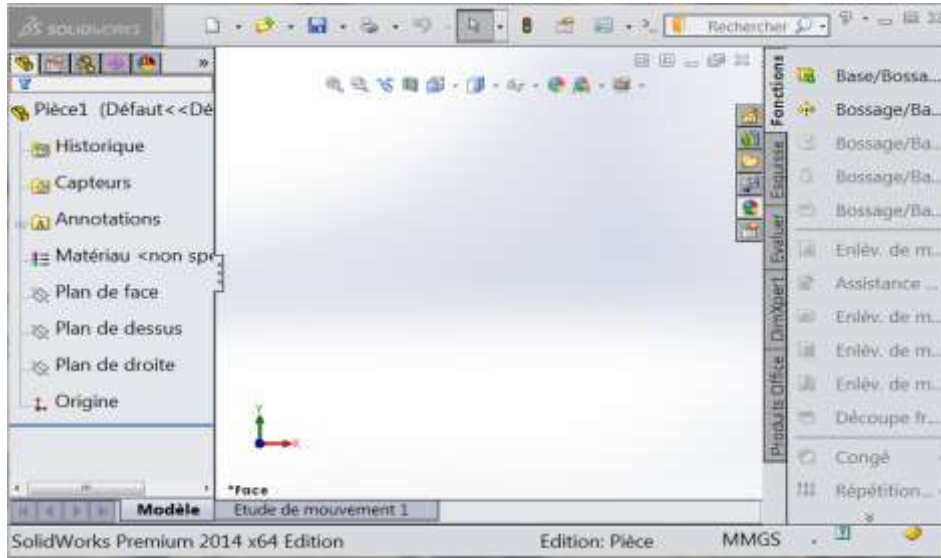
- في هذه الحالة نلاحظ أن طول الوتر في الجذر يكون عند القيمة  $0.6133 \text{ m}$  و تبدأ بالتزايد حتى تصل إلى القيمة القصوى  $0.8123 \text{ m}$  بعدها تنخفض تدريجياً حتى تصل للقيمة الدنيا  $0.217 \text{ m}$ .
- التوزيع المحسوب لطول الوتر غير خطي.

تظهر توزيعات الوتر و زاوية الالتواء اختلافات متقطعة و غير منتظمين في منطقة الانتقالية على طول امتداد الشفرة، قد يتسبب هذا الاختلاف المتقطع في حدوث آثار سلبية على أداء الديناميكا الهوائية و ديناميكيات الهيكل.

### 3-IV) برنامج SolidWorks:

SolidWorks هو برنامج نمذجة قوي يجعل من الممكن نمذجة قطع ثلاثية الأبعاد و تصورها في شكل واقعي و هو برنامج تصميم بمساعدة الكمبيوتر (C.A.O) يستخدمه المختصون في القطاع الصناعي.

يستخدم SolidWorks يمكننا نمذجة الشفرة الصغيرة الملتوية نصف قطرها  $4.5 \text{ m}$  و المصنوعة من سبائك الألمنيوم.



الشكل (IV-5): واجهة برنامج SolidWorks

### 4-IV) تحديد إحداثيات ملف تعريف الشفرة NACA 4412:

إن شفرة توربين الرياح تبدو و تتصرف مثل جناح الطائرة، فلبناء هذه الشفرة تم إنشاء تسع طائرات متوازية على مسافات متساوية من بعضها البعض  $298 \text{ mm}$ ، التي تحصلنا من خلالها على الإحداثيات  $(x, y)$  للنقاط التي تميز محيط المقطع العرضي من نوع تعريف NACA 4412 (الملحق ج). من خلال الحصول على معاملات الشفرة  $(\beta, C)$  لكل مقطع الموضحة الجدول (IV - 2) تمكنا من تصميم الشفرة التي تظهر في برنامج SolidWorks.

الجدول (IV-1): توزيع الوتر و زاوية الإلتواء على طول الشفرة

Radius r [m]	Twist $\beta$ [°]	Chord C [m]
0.225	43.6172	0.6133
0.7	26.0666	0.8123
1.175	16.45	0.6632
1.65	11.046	0.528
2.125	7.71	0.4311
2.6	5.4772	0.3619
3.075	3.888	0.3108
3.55	2.7029	0.272
4.025	1.7868	0.2415
4.5	1.0582	0.217

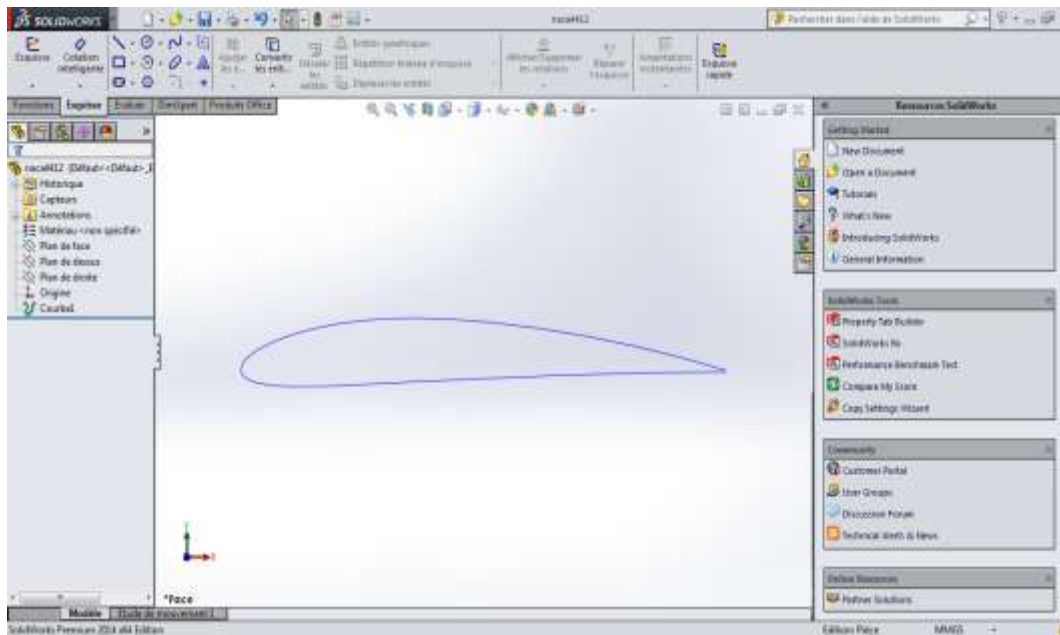
#### IV-5) خطوات تصميم الشفرة في برنامج SolidWorks:

بعد تحديد الوتر و زاوية الإلتواء لكل مقطع جانبي تم تصميم نموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج SolidWorks. مرت عملية التصميم بالخطوات التالية :

1 - رسم ملف تعريف NACA 4412 باستخدام إحداثيات (X,y) (الملحق ج) باستعمال

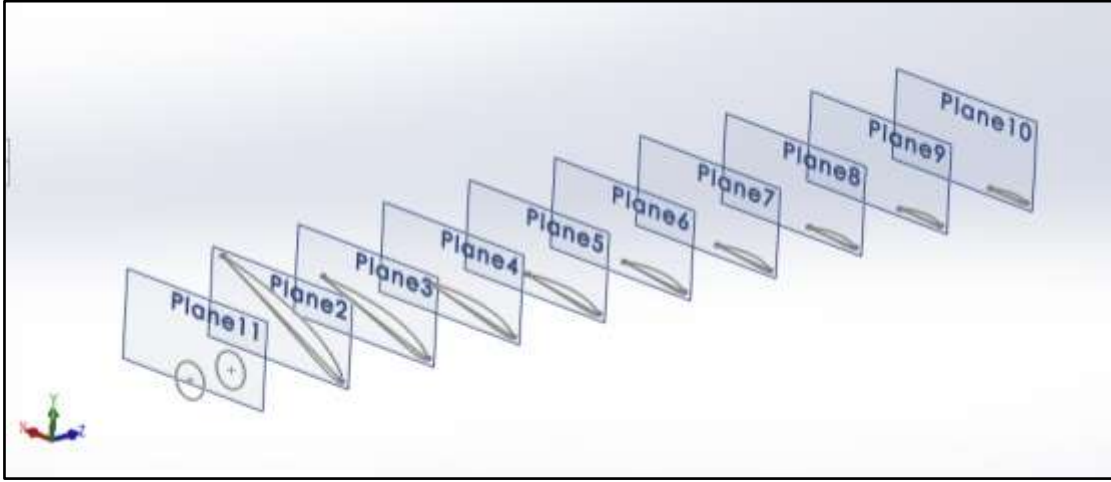


وظيفة الإحناء



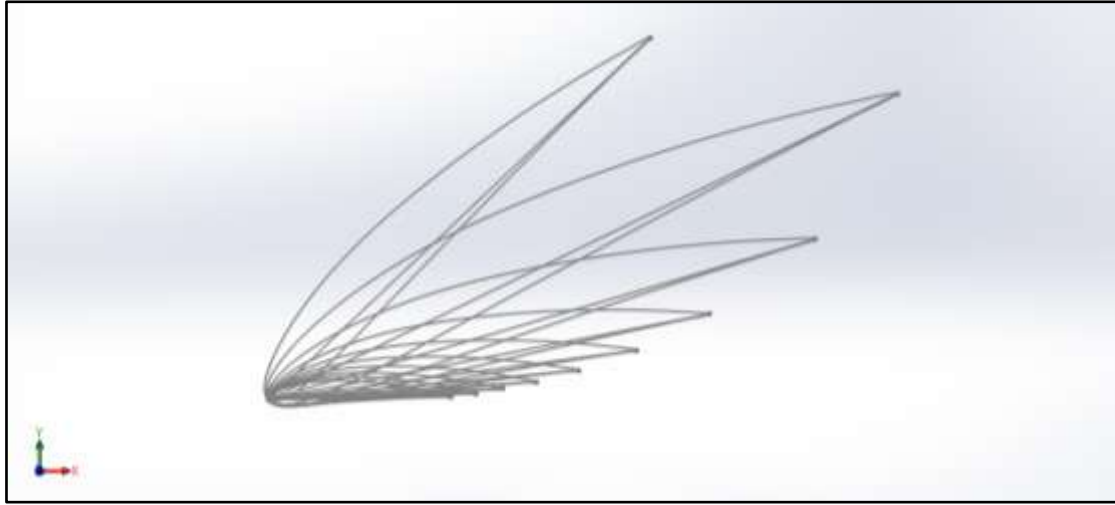
الشكل (IV-6): ملف تعريف جناح NACA4412 للشفرة

2- تقوم بتكرار ملف تعريف الشفرة 10 مرات مع ضبط الوتر و زاوية الإلتواء لكل مقطع على طول الشفرة  $R=4.5\text{ m}$



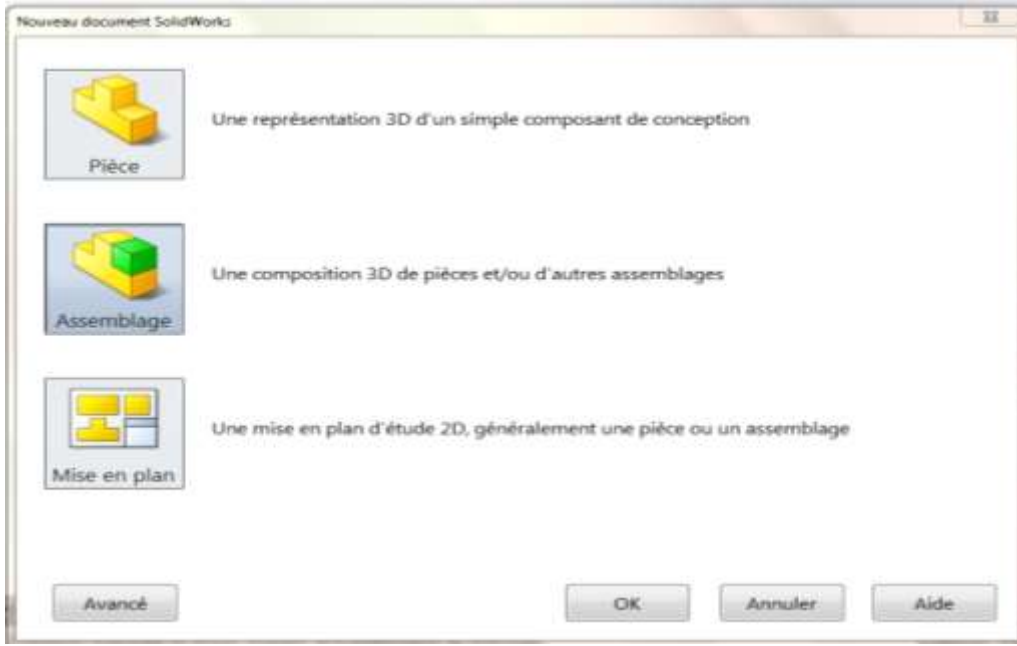
الشكل (IV-7): توزيع ملامح ملف تعريف الأسطح على طول الشفرة في الفضاء

3- يؤدي إجراء إستيراد الإحداثيات لجميع ملفات التعريف في النهاية إلى توزيعها في الفراغ كما هو موضح في الشكل التالي:

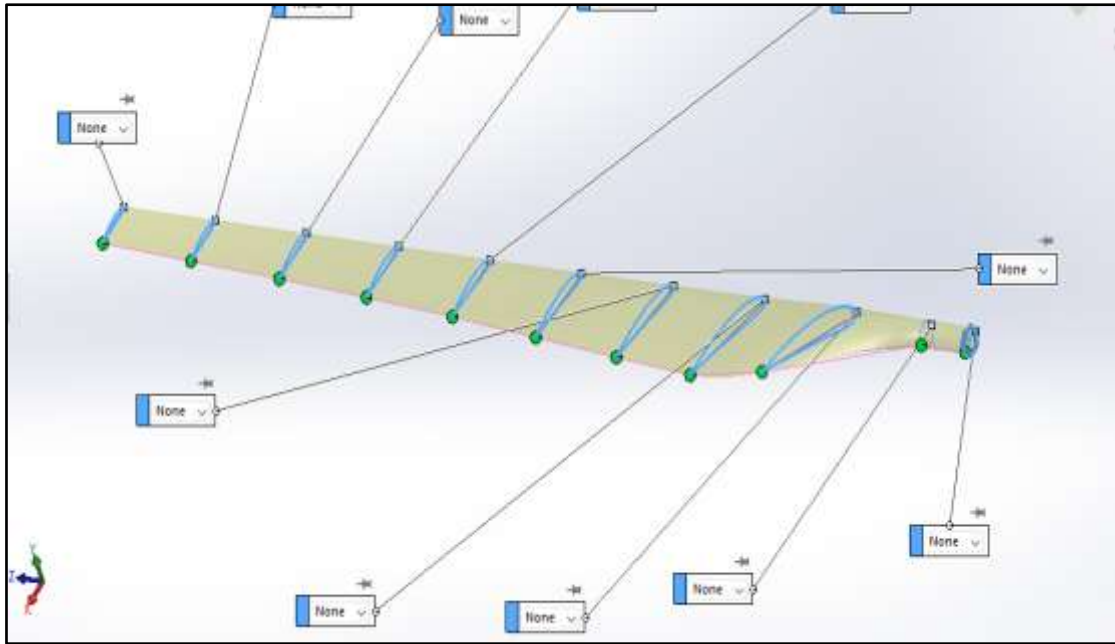


الشكل (IV-8): تغير زاوية الإلتواء و طول الوتر لشفرة توربين الرياح في الفضاء

4- بعد إكمال تصميم المقاطع و حفظه نحتاج الآن لتجميعها للحصول على الشكل النهائي للشفرة للقيام بذلك ننقر على أيقونة التجميع الموضحة الشكل (IV - 9) و ذلك عبر نافذة التجميع.

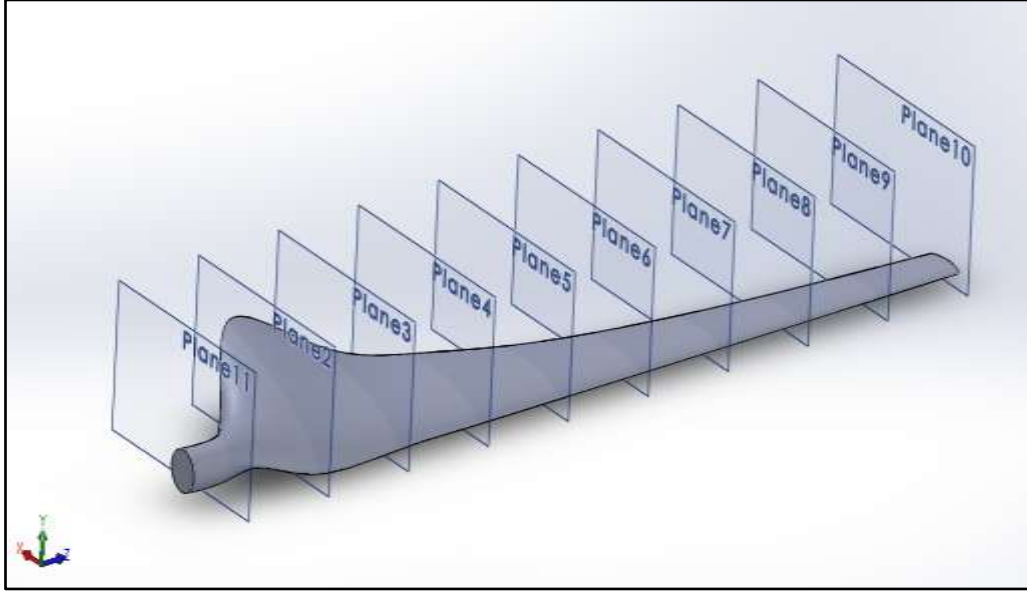


الشكل (IV-9): نافذة وضع التجميع في برنامج SolidWorks

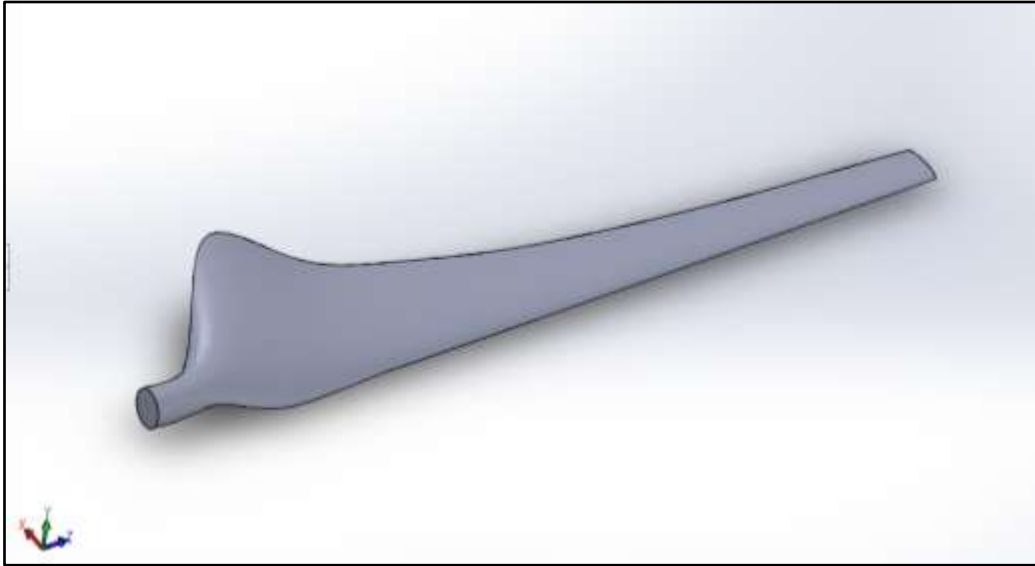


الشكل (IV-10): ربط المقاطع لتشكيل الشفرة

5 - بعد النمذجة الهندسية تمكنا من الوصول لشكل شفرة توربين الرياح التي يمكن تطبيقها في منطقة ورقلة للحصول على الإستطاعة المرغوبة.



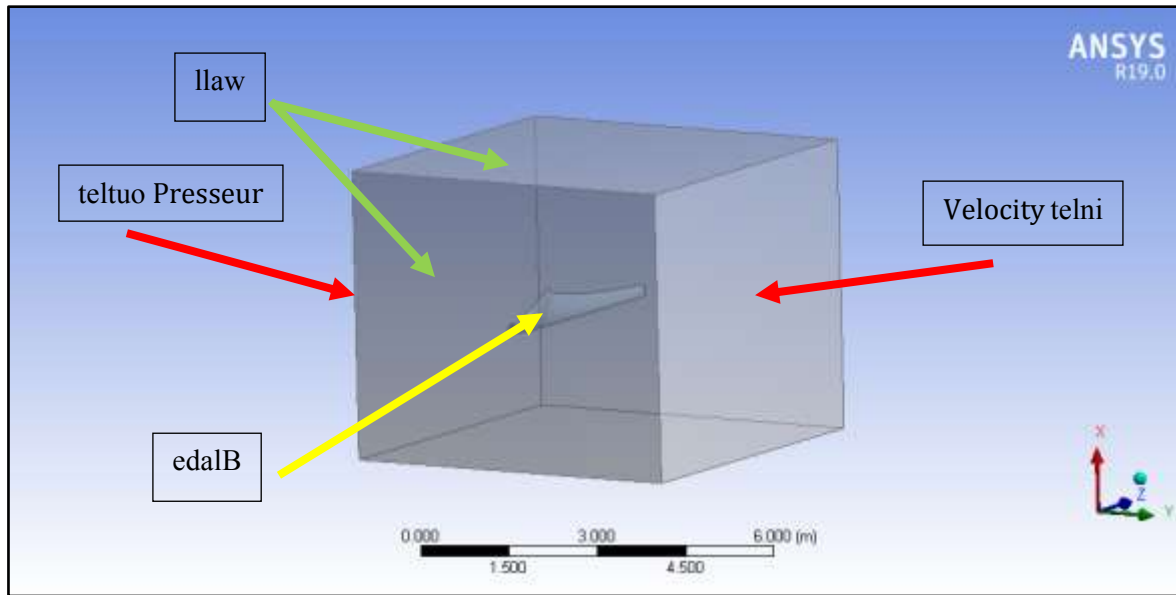
الشكل (IV-11): ربط الملامح بجذر الشفرة



الشكل (IV-12): الشكل النهائي لشفرة الرياح بطول 4.5 متر

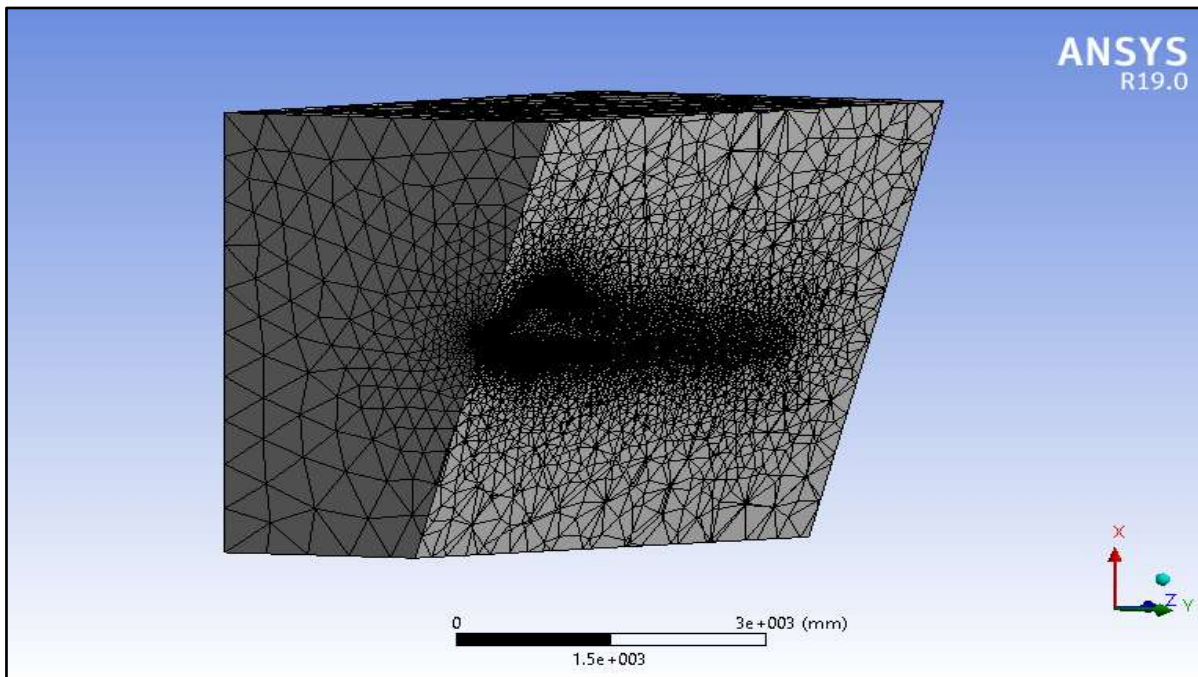
#### (6-IV) المحاكاة في برنامج ANSYS:

- يستخدم هذا البرنامج للمحاكاة الرقمية و تطوير المنتجات الصناعية يغطي جميع الخطوات اللازمة للمحاكاة ( المعالجة الهندسية، التشابك، الدقة ، معالجة النتائج و تحسينها).
- تم التعامل مع شفرة التوربين المراد دراستها باستخدام إطار مرجعي وظيفته تحديد منطقة المحاكاة حول الشفرة المصممة.



الشكل (IV-13): الإطار المرجعي المتحرك لمنطقة المحاكاة حول شفرة توربين الرياح

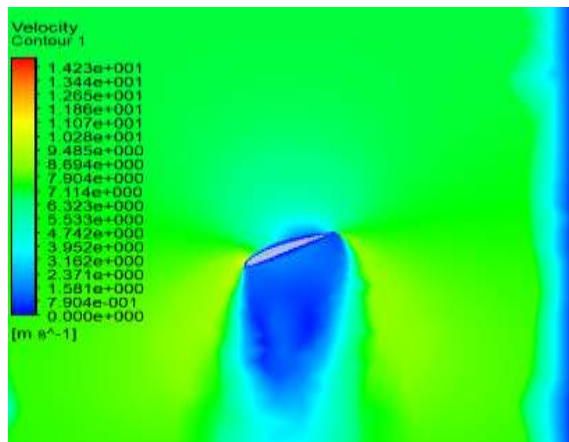
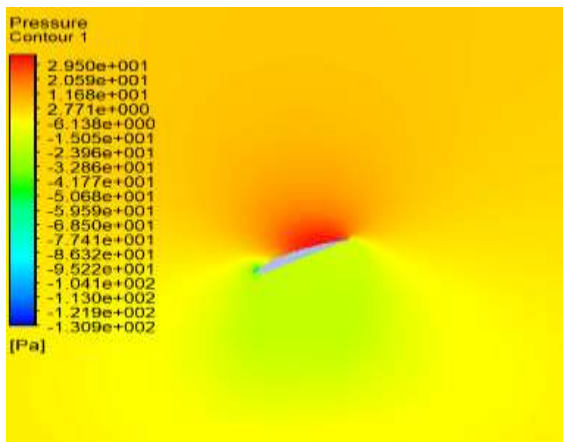
- قمنا بتحويل هذا الإطار المرجعي إلى شبكة مكونة من 196045 عقدة و 1102533 عنصر، من خلال هذه العقدة نتمكن من أخذ فكرة حول توزيع حقل معين (السرعة و الضغط) حول الشفرة بإستعمال الطرق العددية "Méthodes Numérique".



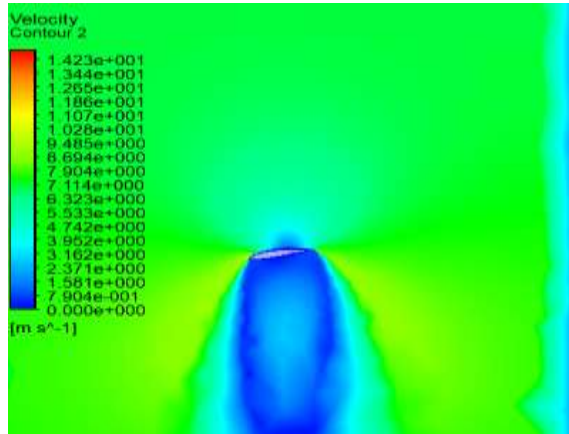
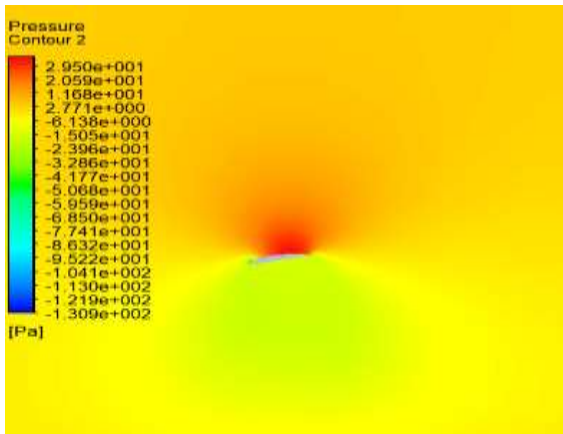
الشكل (IV-14): المجال الشبكي المستخدم في المحاكاة



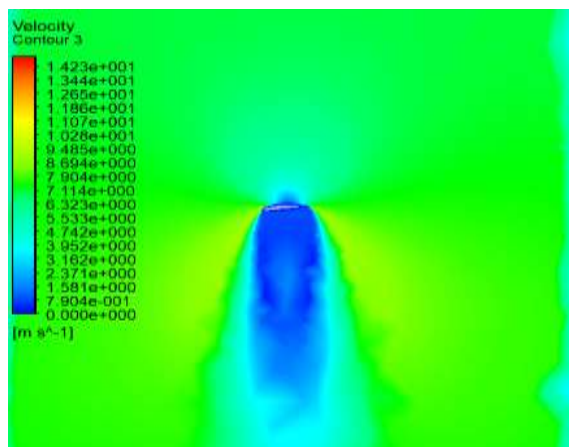
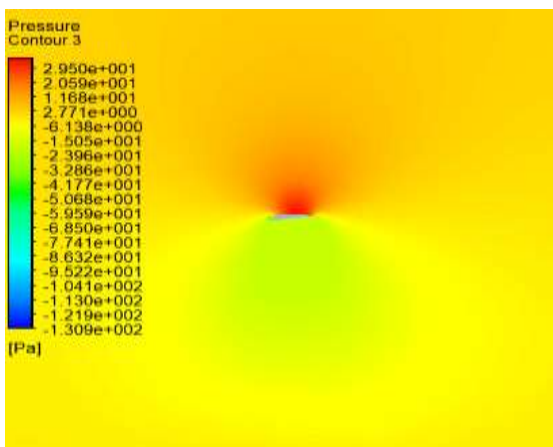
1-6-IV) توزيع السرعة و الضغط حول كل مقطع:



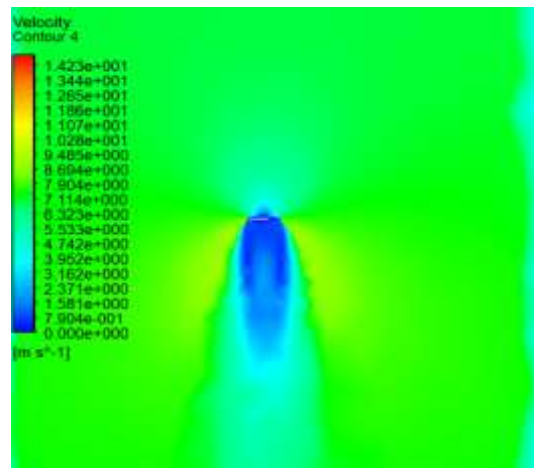
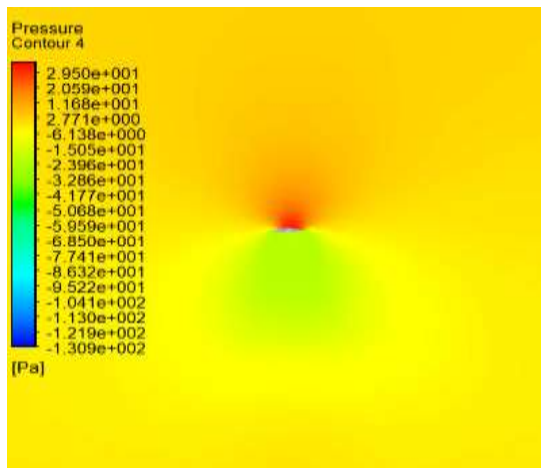
الشكل (IV-15): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=0.7$



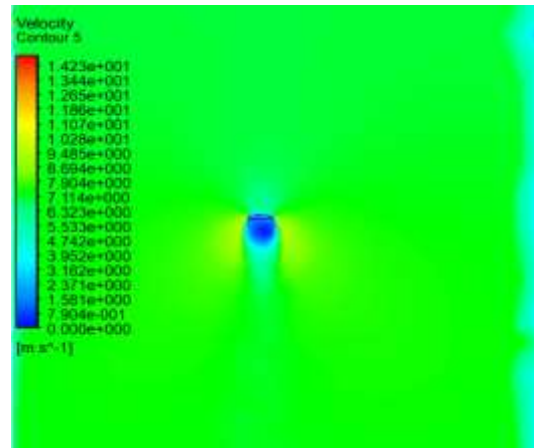
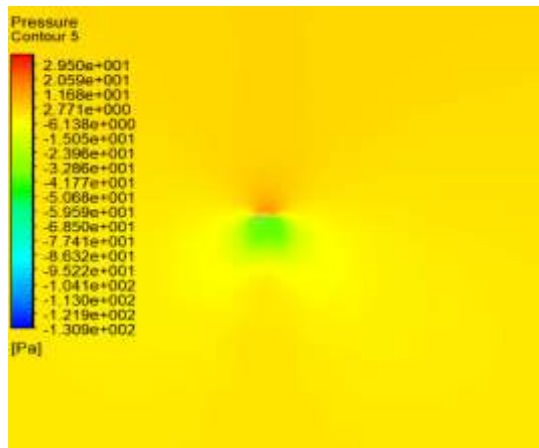
الشكل (IV-16): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=1.650$



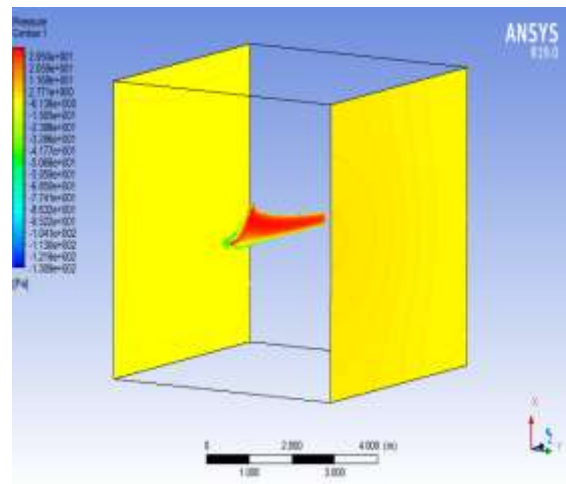
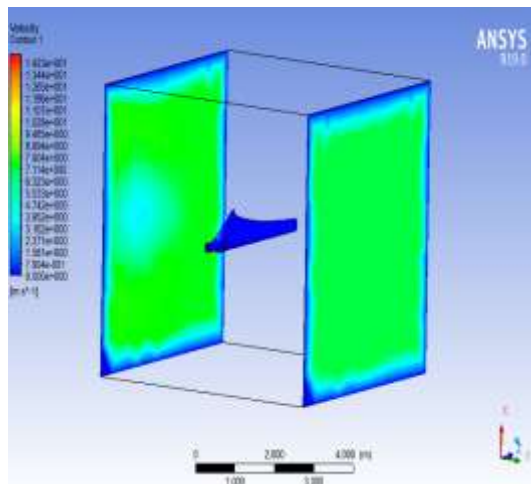
الشكل (IV-17): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=2.6$



الشكل (IV-18): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=3.55$



الشكل (IV-19): توزيع السرعة و الضغط عند  $r=4.5$



الشكل (IV-20): توزيع الضغط و السرعة على نطاق المحاكاة



## تحليل النتائج:

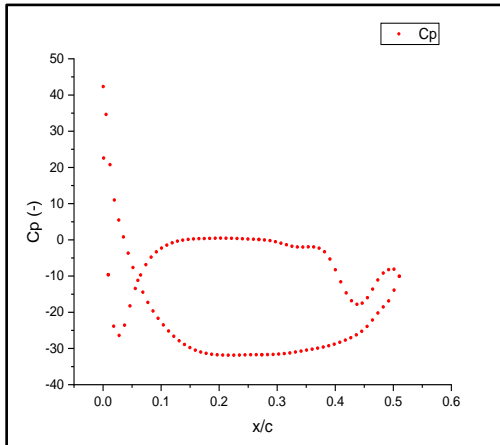
تهدف الصور بالأعلى الى الكشف عن تغير السرعة و الضغط على طول الشفرة لكل مقطع، كما نلاحظ أن هناك فرق واضح بين الصور في توزيع كل من الضغط و السرعة، سبب هذا التغير بالتأكيد راجع الى اختلاف قيمة زاوية الهجوم بين كل مقطع و آخر.

- نلاحظ أن قيمة الضغط مرتفعة جدا عند الجذر ( $r=0.7m$ ) وتتناقص طوليا كلما إتجهنا إلى رأس الشفرة ( $r=4.5m$ ).

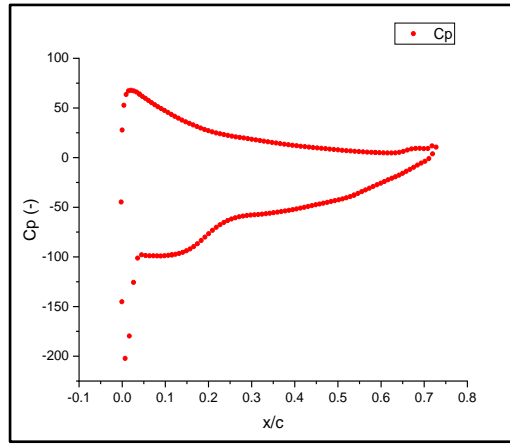
- نلاحظ أن قيمة الضغط عند المقطع ( $r=0.7m$ ) في الحافة العلوية تكون مرتفعة جدا و تصل إلى  $29.5 Pa$ ، و بالنسبة للحافة السفلية تكون منخفضة و تصل  $15 Pa$  -.

- أما السرعة فهي تزداد كلما تم الإتجاه ناحية رأس الشفرة ويظهر ذلك بوضوح من خلال الصور الخاصة بالسرعة لكل مقطع.

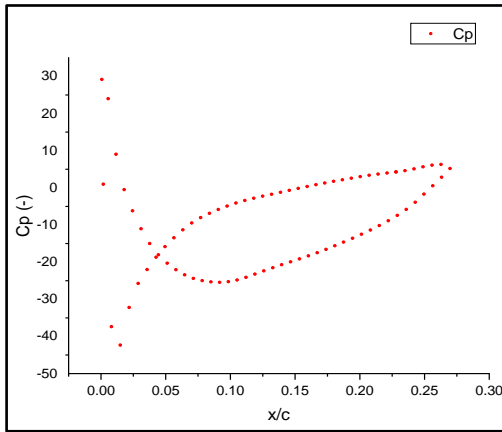
IV-6-2) توزيع معامل الضغط لكل مقطع على طول الشفرة:



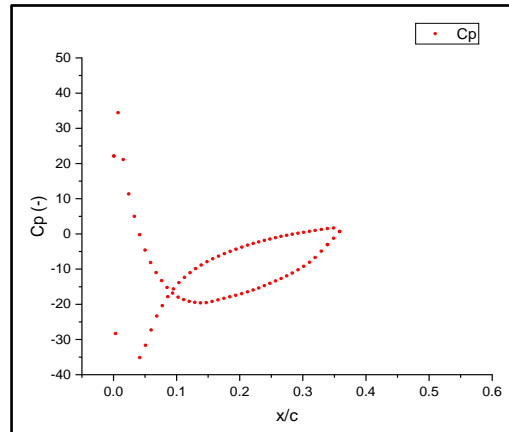
**r = 1.65 m**



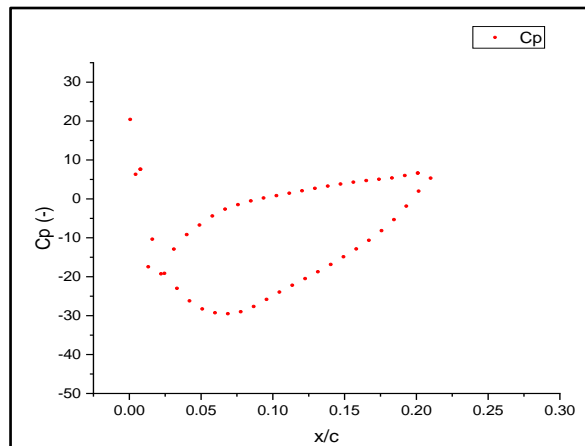
**r = 0.7 m**



**r = 3.55 m**



**r = 2.6 m**



**r = 4.5 m**

الشكل (IV-21): توزيع معامل الضغط على طول الشفرة بالنسبة لمحيط ملف NACA 4412

توضح الصور توزع معامل الضغط  $C_p$  في مناطق مختلفة من طول شفرة توربين الرياح حيث تمثل كل صورة التوزيع المحلي لمعامل الضغط في محيط ملف التعريف و كما نلاحظ فإن محور الفواصل يمثل النسبة بين المسافة  $X$  مقسومة على طول الوتر (chord) و محور الترتيب يمثل مقدار معامل الضغط ومن خلال الصور يتبين أن هناك اختلاف كبير في معامل الضغط بين مقطع و آخر و ذلك ناتج عن الاختلاف في زاوية الإلتواء بين مقطع و آخر.

#### 7-IV حساب الإستطاعة المنتجة من الشفرة:

تتميز هذه الخطوة بحساب قيم عوامل التداخل المحوري  $a$  و التداخل العرضي  $a'$  لكل موضع  $r$  للشفرة مع مراعاة خسائر الضغط في الطرف الحر للشفرة. بعد حساب  $a$  و  $a'$  يمكننا حساب القدرة المستخرجة.

من أجل إجراء هذه الحسابات يتم حساب توزيع الوتر  $C(r)$  و توزيع زاوية الالتواء  $\beta(r)$  بنفس الطريقة السابقة ثم يتم إستخدام طريقة تكرارية لحساب قيم عوامل التداخل المحوري  $a$  و العرضي  $a'$  لكل موضع  $r$  للشفرة نظرا لعدم وجود تعبيرات تحليلية لهذه العوامل يتم تلخيصها بالخطوات التالية:

1. في كل مرة نعطي قيمة ل  $r$  لكل موضع على الشفرة بالنسبة إلى مركز المروحة  $\{r(1), r(2), \dots, r(n)\}$ .
2. نفرض قيم ابتدائية ل  $a$  و  $a'$  مثل  $(a = \frac{1}{3}$  و  $a' = 0)$ .
3. حساب  $\emptyset$  باستخدام المعادلة (III - 37).
4. حساب  $\alpha$  باستخدام الصيغة  $\alpha = \emptyset - \beta$  من المعادلة (III - 36).
5. يتم إعطاء قراءة معاملات الرفع و السحب  $C_L(\alpha)$  و  $C_D(\alpha)$  للزاوية التي تم العثور عليها من جدول خصائص المظهر الجانبي (ملحق ب).
6. حساب قيم  $a$  و  $a'$  الجديدتين باستخدام المعادلتين: (III - 45) و (III - 46).
7. مقارنة قيم  $a$  و  $a'$  بالقيم السابقة ونكرر الخطوات حتى نتقارب مع الدقة المطلوبة، تقارب  $a$  و  $a'$  يعني أنه تم التحقق من النتائج التي تم الحصول عليها من خلال النظريات.
8. نحسب  $dP$  من المعادلة (III - 57).
9. إذا تم تكرار العملية السابقة لكل موضع  $r$  للشفرة، فسوف يسمح ذلك بحساب القيمة الإجمالية ل  $P$  بالتكامل العددي على طول الشفرة.

1. المعطيات:

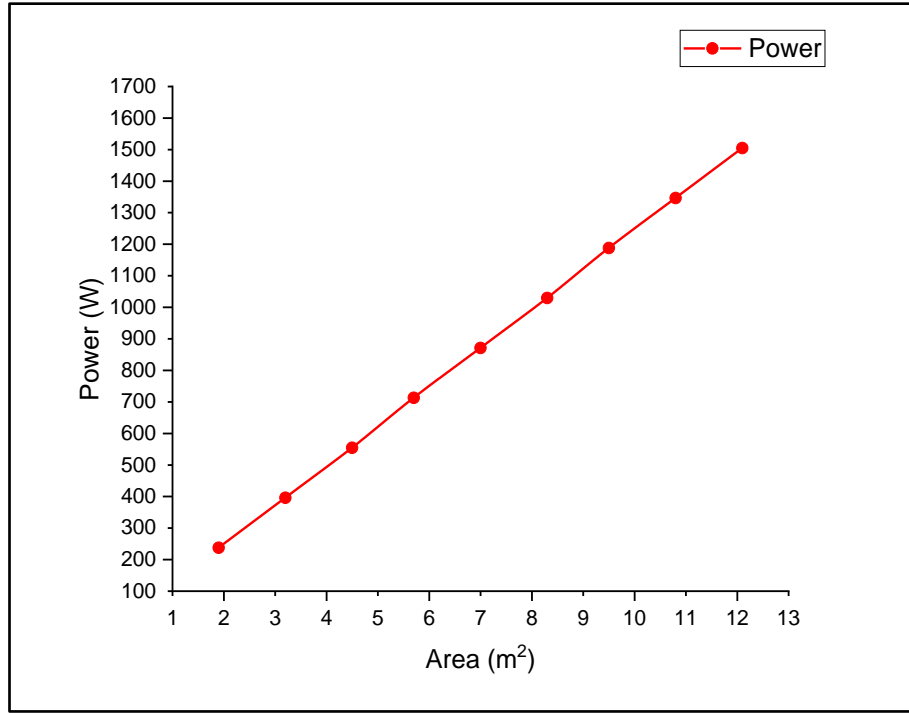
الجدول (IV-2): جدول معطيات شفرة توربين الرياح المدروسة

القيمة	خصائص توربينات الرياح
7	سرعة الرياح التصميمية (m/s)
6	السرعة المحددة
4.5	نصف قطر الدوار (m)
1.0518	معامل رفع ملف التعريف
0,00813	معامل السحب
1.225	كثافة الهواء (kg/cu m)
1.47E-05	لزوجة الهواء الحركية (sq m/s)
5.25	زاوية الهجوم المثالي (degrees)
3	عدد الشفرات
9.33	السرعة الزاوية (radians/s)

2. الإستطاعة المنتجة حسب مساحة الإجتياح:

الجدول (IV-3): الإستطاعة المنتجة حسب مساحة الإجتياح

Area (m <sup>2</sup> )	Power (W)
1.9	237.6
3.2	396
4.5	554.4
5.7	712.8
7	871.2
8.3	1029.6
9.5	1188
10.8	1346.4
12.1	1504.8



الشكل (IV-22): منحنى يبين الإستطاعة المنتجة حسب مساحة مقطع الإحتياح

توضح النتائج في الشكل (IV-22) القدرة المنتجة من المساحة عند تغيير  $I$  بين مقطع و آخر، نلاحظ أنه كلما زادت مساحة المقطع زادت الإستطاعة المنتجة و بجمع الإستطاعة المنتجة من كل مقطع نتحصل على الإستطاعة الكلية للشفرة (7.84 KW) و في أغلب الأحيان تكون أكبر من الإستطاعة الأولية المفروضة (5KW) و هذا يعود للتحسين في التصميم.

#### الخاتمة:

في هذا الفصل تم التحصل على النتائج العددية لتوزيع طول الوتر و زاوية الإلتواء بإستعمال برنامج 'MATLAB'، على الرغم من تطوير النمذجة الحسابية المعقدة إلا أنها قائمة على تحليل و تصميم الشفرة بإستعمال برنامج 'SolidWorks'، ثم محاكاة التصميم النهائي للشفرة بإستعمال برنامج 'ANSYS' من خلال دمج الشبكة في الإطار المرجعي للحصول على دقة عالية و دراسة تأثير توزيع الضغط و السرعة على كل مقطع من الشفرة.

أتاحت هذه الدراسة متابعة تغيير المعاملات الهندسية و الديناميكية المختلفة على طول الوتر و زاوية الالتهاء و ملاحظة تأثيرها على أداء التحسين الطاقوي المنتج.

# الخاتمة العامة

## الخاتمة العامة:

تمتلك الجزائر مساحات شاسعة من سواحل و مرتفعات و صحاري يمكن استغلالها لإنتاج الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة كمزارع الرياح. تعتبر إمكانات الجزائر في الطاقات المتجددة الأكبر إفريقيا بفضل موقعها الإستراتيجي و تنوع مناخها، يمكن أن تساهم مواردها في التنمية الاجتماعية والاقتصادية في بعض المناطق النائية و المعزولة للغاية بشكل فعال مع تكلفة قليلة. يتميز مصدر طاقة الرياح بكونه نظيفاً من الناحية البيئية نظراً لأن توربينات الرياح لا ينبعث منها أي ملوثات أو غازات دفيئة و لا ينتج عنها نفايات. و هذا هو ما دفعنا إلى دراسة تطوير توربينات الرياح ذات المحور الأفقي الصغيرة وتحسين أدائها و الذي يتطلب إتقاناً لتصميم و تشغيل توربينات الرياح لتجنب الاستهلاك البسيط و كذا التكيف مع الظروف المناخية للمنطقة من أجل الاستخدام الأمثل.

يتعلق العمل الحالي بدراسة توربينات الرياح ذات المحور الأفقي الصغيرة و تحسين أدائها عن طريق نظرية زخم عنصر الشفرة بالحصول على المعاملات الأيروديناميكية، ثم تصميم شفرة توربين الرياح بتغيير كل من الوتر و زاوية الالتواء ملف تعريف جنينح NACA 4412. بإستعمال كل من برنامج MATLAB و SolidWorks في الحصول على النتائج العددية و تصميم الشكل النهائي للشفرة ثم محاكاتها في برنامج ANSYS لمعرفة توزيع الضغط و السرعة و مراقبة تأثير معامل الضغط على طول الشفرة تحصلنا على النتائج التالية:

- في الدراسة النظرية تمكنا من الحصول على الإستطاعة المنتجة و القوى الهوائية المؤثرة على الشفرة و المعاملات الأيروديناميكية اللازمة لتصميم نظام توربينات الرياح من خلال نظرية زخم عنصر الشفرة BEMT.
- حسب النتائج العددية وجدنا أن توزيع الوتر و زاوية الالتواء تظهر اختلافات متقطعة على طول امتداد الشفرة، قد تتسبب في حدوث آثار سلبية على أداء الديناميكا الهوائية و ديناميكيات الهيكل.
- من خلال النتائج المتحصل عليها من برنامج MATLAB، تمكنا من تصميم الشكل النهائي لشفرة توربين الرياح ذات ملف تعريف جنينح NACA 4412 بإستعمال SolidWorks التي يمكن تطبيقها في منطقة ورقلة للحصول على القدرة المرغوبة و تحسين مردودها.
- توضح نتائج المحاكاة بالنسبة للضغط أنها مرتفعة عند الجذر ثم تنخفض طولياً، و بالنسبة إلى الحافة العلوية تكون قيمة الضغط مرتفعة جدا (29.5 Pa) مقارنة بالحافة السفلية (-15 Pa) أما بالنسبة للسرعة فتردد كلما إبتعدنا عن الجذر.
- كما وجدنا إختلاف كبير في معامل الضغط بين مقطع و آخر و ذلك ناتج عن الإختلاف في زاوية الالتواء بين المقاطع.
- توضح النتائج فيما يخص القدرة المنتجة أن الإستطاعة المتحصل عليها (7.84 KW) أكبر من الإستطاعة الأولية المفروضة (5 KW) و هذا يعود للتحسين في التصميم من خلال توزيع الأمثل لزاوية الالتواء و الوتر.

كان هذا البحث من أجل تقديم مساعدة فعالة للذين يتعين عليهم إتخاذ قرارات بشأن تخطيط و تنفيذ مشاريع طاقة الرياح في منطقة ورقلة، كما يفتح هذا العمل العديد من المجالات و بالأخص تصنيع توربينات الرياح و إستغلال طاقتها و التحسين من

كفاءتها الأيروديناميكية. من هذا المنطلق نأمل أن نكون قد وضعنا لبنة من أجل الشروع في تصميم و تجسيد مشاريع طاقة الرياح في منطقة ورقلة، نظرا للآفاق بعيدة المدى التي يمكن أن يحققها هذا المشروع و خاصة في المناطق المعزولة والإستصلاحات الزراعية و غيرها.



## المراجع:

- [1] B. S. Mohammed, "Optimisation de l'évaluation Temporelle du Gisement énergétique éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie," Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en physique énergies.2013 ,...
- [2] A. D. Şahin, "Progress and recent trends in wind energy," Progress in energy and combustion science, vol. 30, pp. 501-543, 2004.
- [3] ع. ب. م. المقمر, "طاقة الرياح " جريدة العرب الاقتصادية الدولية, .html 14/10/2010.455338\_http://www.aleqt.com/2010/10/14/article
- [4] م. ك. ا. محمود, رياح التغيير في أنظمة الطاقة العالمية و العربية القاهرة: 2012 .RCREEE,
- [5] C. Kost, B. Pfluger, W. Eichhammer, and M. Ragwitz, "Fruitful symbiosis: Why an export bundled with wind energy is the most feasible option for North African concentrated solar power," Energy Policy, vol. 39, pp. 7136-7145, 2011.
- [6] N. Komendantova, A. Patt, L. Barras, and A. Battaglini, "Perception of risks in renewable energy projects: The case of concentrated solar power in North Africa," Energy Policy, vol. 40, pp. 103-109, 2012.
- [7] D. A. SMAI and M. L. Zahi, "Les Potentialités De L'algerie En Energies renouvelables," Recherches économiques et managériales, vol. 19, pp. 7902-1112, 2016.
- [8] F. BOREKBA and B. OMARI, "Modélisation et simulation de la pale d'une petite éolienne appliquée au site d'Adrar," Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [9] "Guide des Energies Renouvelables. Ministère de L'énergie et des Mines Algérienne. (édition 2007." (
- [10] A. B. Stambouli, "Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives," Renewable and sustainable energy reviews, vol. 15, pp. 1169-1181, 2011.
- [11] Y. Hamakawa, "Recent progress in solar photovoltaic energy conversion," JSAP international, vol. 5, 2002.
- [12] D. F. Young, B. R. Munson, T. H. Okiishi, and W. W. Huebsch, A brief introduction to fluid mechanics: John Wiley & Sons, 2010.
- [13] F. Durst, Fluid mechanics: an introduction to the theory of fluid flows: Springer Science & Business Media, 2008.
- [14] ا. ا. ا. دقم, الباب الثالث - الموائع الساكنة 16 أوت 2018.
- [15] A. L. G. Philip M. Gerhart, John I. Hochstein, Munson, Young and Okiishi's Fundamentals of Fluid Mechanics: Wiley, 2015.

- [16] ع. ا. الليبي. ( 2018, دروس في ميكانيك الموائع (جريان الموائع). 87.
- [17] أ. إ. أرباب, محاضرات في ميكانيك الموائع كلية العلوم - جامعة الخرطوم السودان: دار العزة للنشر و التوزيع 2011.
- [18] O. Louisnard, "Cours de mécanique des fluides," Ecole des Mines d'Albi, 2012.
- [19] R. Qin and C. Duan, "The principle and applications of Bernoulli equation," in Journal of Physics: Conference Series, 2017, p. 012038.
- [20] H. S. Badeer and C. E. Synolakis, "The Bernoulli-Poiseuille equation," The Physics Teacher, vol. 27, pp. 598-601, 1989.
- [21] ح. ع. ع. ا. الجوراني, "إمكانية استغلال طاقة الرياح في توليد الكهرباء في العراق," journal of Human Sciences, vol. 1, 2010.
- [22] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, Wind energy handbook vol. 2: Wiley Online Library, 2001.
- [23] J. K. Kaldellis and D. Zafirakis, "The wind energy (r) evolution: A short review of a long history," Renewable energy, vol. 36, pp. 1887-1901, 2011.
- [24] M. Debbache, "De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites," Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.
- [25] K. Ferkous, "Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne," Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [26] L. Aiche-Hamane and A. Khellaf, "Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie," Revue Energ. Ren.: ICPWE, pp. 147-152, 2003.
- [27] NaouelHamdi, "Modélisation et commande des génératrices éoliennes," Mémoire de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, Janvier 2008.
- [28] KhelladiSmaine, "analyse et approche d'aide a la décision pour le choix d'un projet eolien," Mémoire de magister, Universite Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2009/2010.
- [29] H. Camblong, "Minimisation de l'impact d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable," thèse de doctorat, 2003.
- [30] A. F. F. Dastot, Intégrer les énergies renouvelables: CSTB le futur en construction, juin 2010.
- [31] د. س. س. م. د. ب. ع. ا. ن. أ. م. خ. سلمان, الطاقة البديلة مصادرها واستخداماتها: دار اليازوري العلمية للنشر و التوزيع, 2011
- [32] C. Acket and J. Vaillant, Les énergies renouvelables: état des lieux et perspectives: Editions Technip, 2011.
- [33] J. Vernier, Les énergies renouvelables: Que sais-je?, 2007.
- [34] م. ا. منصور, طاقة الرياح وتطبيقاتها المختلفة: تشغيل وصيانة وتركيب توربينات الرياح: هيئة الطاقة الجديدة.

- [35] Z.-L. Mahri, "Etude dynamique et optimisation des pales d'un aerogenerateur," 2007.
- [36] R. Maouedj, S. Bousalem, and B. Benyoucef, "Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens," *Revue des énergies renouvelables*, vol. 11, pp. 239-250, 2008.
- [37] F. Y. Ettoumi, "Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie," Thèse de Doctorat d'état, USTHB, 2002.
- [38] B. Robyns, A. Davigny, B. Francois, A. Henneon, and J. Sprooten, *Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables: Hermes sciences publications*, 2012.
- [39] B. Multon, O. Gergaud, H. B. Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, and C. Nikita, "Etat de l'art des aérogénérateurs," ed: Ed. NOVELECT-ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, 2002.
- [40] M. D'Ambrosio and M. Medaglia, "Vertical axis wind turbines :History, technology and applications," ed, 2010.
- [41] M. Rapin and J. M. Noël, *Energie éolienne*, 2010.
- [42] D. Infield and L. Freris, "Les energies renouvelables pour la production d'électricité'," *Techniques et Ingnieur*, Dunod/Dunod lusine nouvelle, 20.13
- [43] R. Baïle, "Analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne," Université Pascal Paoli, 2010.
- [44] F. F. F. d'Aéro-Modélisme, "Aerodynamique et mécanique du vol simplifier," Edition juillet, 2009.
- [45] B. CORSAT, L. G. St Hilaire-ETAMPES, T. LEGRAND, and R. VIRETTO-CIT, "Olympiades de physique 2006/2007," Une, vol. 2007, 2006.
- [46] M. Nazmul Haque, "Experimental investigation on the aerodynamic characteristics of NACA 4412 Aerofoil with Curved-Edge planform," 2015.
- [47] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application: John Wiley & Sons*, 2010.
- [48] A.-E. Cherrad, "Etude de l'écoulement transsonique autour d'un obstacle," Université de Batna 2, 2012.
- [49] A. Belguidoum, "les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides," 2012.
- [50] <https://www.connectedpapers.com/main/> 24/04/2021 à 16:37 .
- [51] E. Lysen, *Introduction to wind energy: CWD*, 1983.
- [52] M. Ragheb and A. M. Ragheb, "Wind turbines theory-the betz equation and optimal rotor tip speed ratio," *Fundamental and advanced topics in wind power*, vol. 1, pp. 19-38, 2011.

- [53] J. M. Jonkman, "Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST { \_ } AD," National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US)2003.
- [54] D. Wood, "The design and analysis of small wind turbines," University of Newcastle School of Engineering NSW, vol. 2308, 2002.
- [55] S. Habali and I. Saleh, "Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics: part I: design of the blade and root," Energy conversion and management, vol. 41, pp. 249–280, 2000.
- [56] M. M. Duquette and K. D. Visser, "Numerical implications of solidity and blade number on rotor performance of horizontal-axis wind turbines," J. Sol. Energy Eng., pp. 125–425, 2003.
- [57] S. Habali and I. Saleh, "Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades," Renewable energy, vol. 6, pp. 161–169, 1995.
- [58] O. d. Vries, "Fluid dynamic aspects of wind energy conversion," Advisory Group for Aerospace Research and Development NEUILLY–SUR–SEINE (France)1979.
- [59] W. Jansen, Horizontal-axis Fast Running Wind Turbines for Developing Countries: Steering Committee for Windenergy in Developing Countries, 1976.
- [60] R. Griffiths and M. Woollard, "Performance of the optimal wind turbine," Applied Energy, vol. 4, pp. 261–272, 1978.
- [61] M. O. Hansen, "Chapter 2 2–D Aerodynamics"," Aerodynamics of wind turbine Second Edition, Earthscan, UK and USA, 2008.
- [62] F. Bertagnolio, N. Sørensen, J. Johansen, and P. Fuglsang, "Wind turbine airfoil catalogue," 2001.
- [63] B. CHELALI and C. HOCINE, "Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille," 2015.
- [64] <https://webstore.iec.ch/publication/5433> 25/05/2021 – 23:47 .
- [65] <https://globalwindatlas.info/area/Algeria/Ouargla> 25/05/2021 à12:53 .
- [66] W. Timmer and R. Van Rooij, "Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils," J. Sol. Energy Eng., vol. 125, pp. 488–496, 2003.
- [67] <http://airfoiltools.com/plotter/index?airfoil=naca4412-il> 20 /04/2021 à 11:03 .
- [68] D. Marten and J. Wendler, "QBlade Guidelines v0. 6," Berlin: TU Berlin, 2013.
- [69] A. Fluent, "ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide," ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 2009.
- [70] U. A. D. Site. (24/4/2021–16:39 , [https://mselig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.htm](https://mselig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.htm)

# ملحقات

---

## ملحق (أ):

يمثل الجدول التالي سرعة الرياح بـ ( m/s ) لكل يوم خلال أشهر سنة 2019، تم الحصول عليها من مصلحة الأرصاد الجوية  
المكتب الجهوي - ورقة METEO :

اليوم	جانفي	فيفري	مارس	أفريل	ماي	جوان	جويلية	أوت	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر
1	0,5	3,875	1,875	3,5	4,25	6	2,375	7	3,875	2,5	2,625	2,875
2	1,375	5,375	2,25	2,5	6,375	4,625	5	4,5	1,75	3,5	1,25	2,5
3	3,375	7	3,25	4,375	9,75	3,875	4,625	3,375	2,875	4,375	4,25	4,375
4	1,75	6,125	2,25	6,375	7,125	4	3,875	2,125	2,625	1,625	2,25	3,875
5	1	5	1,375	4,875	3,5	4,25	2,125	3,125	2,5	1,125	3,875	2,5
6	1	2,625	2,875	5,25	2	2,25	3,25	3,375	4,5	1,5	4,875	4,375
7	2,125	1,375	3,375	3	3,25	5,375	4,5	3,625	4,875	2,5	2	3,75
8	1,625	1,25	6,125	1,625	2,375	4,375	4,25	3,375	2,5	7,375	2,75	3,375
9	3	2,625	10,625	4,125	3,375	5	5	1,375	5,625	2,25	3,875	4,375
10	2	2,875	9,875	3,625	3,25	5,625	2,25	4,625	2,75	2,125	4,125	3,125
11	4,625	2,25	9,25	4,375	3,75	3,25	2,375	3,875	7,875	4	4,25	2,625
12	3	5,5	3,5	2,625	5,75	3,375	2,75	3	6,5	4,5	4,875	3
13	1	3,125	4,25	2,25	5,625	5	2,125	2,5	4,875	2,75	2,75	2,875
14	3	1,25	6,25	1,625	3,625	4,125	2,875	2,5	4,25	2,375	3	1
15	0,625	0,5	1,625	4,5	2,625	2,25	4,625	3,5	4,625	2,75	5	1,125
16	2,5	1,625	1,25	4,5	3,5	2,125	5,875	6,125	2,875	3,75	5,5	1,875
17	2,625	5,375	1	1,375	6	5,625	3,375	5,125	2,25	1,75	4,375	5,375
18	0,625	4,125	1,625	3,375	5,75	5,625	3,5	3	2,375	2,25	3,375	5,5
19	0	4,875	5,5	8,375	4	3,75	4,125	2	2	2,625	2,875	2
20	2,75	6,875	6	5,125	4,625	6	5,5	3,875	2	3,625	0,875	2,25
21	3,5	7,125	3,375	7,375	4	6,75	2,75	2,875	5	3,125	3,375	4,25
22	3	2,875	2,875	5,375	2,5	7,75	5	3,75	5,25	4,625	3	4,875
23	5,25	3	2,125	3	3,25	7,875	5,375	4,75	3,5	6,25	4,875	3,125
24	6,875	5	3	4,625	5,25	7,625	3,375	4	2,75	3,875	1,75	0,875
25	5,75	4,25	2	2	5,5	6,375	3,125	3,125	2,375	3	2	0,875
26	2,375	2,25	3,375	3,5	5,25	3,5	2	4,375	3,125	1	1,125	1,875
27	2,75	6	5,875	7,5	3,25	4,5	4,75	5,875	3,25	2	3,375	1,25
28	5,5	3	4,625	5	2,125	5,75	2,375	4,125	3,125	3	1,625	1,125
29	5,375	/	2,375	3,25	3,25	5	4	4,875	3	0,875	1,125	2,5
30	/	/	5,5	3,375	6,875	2,75	4,25	2,875	3	1	0,25	2,5
31	/	/	5,125	/	7,75	/	4,125	5,625	/	1,625	/	3,625

## ملحق (ب):

يمثل الجدول تغيرات معاملي الرفع  $C_l$  و السحب  $C_d$  بدلالة زاوية الهجوم  $\alpha$  لملف تعريف الشفرة NACA 4412 تم التحصل عليها من موقع Aerofoil tools:

Alpha	Cl	Cd	Alpha	Cl	Cd
-15,75	-0,8374	0,08373	-7	-0,2921	0,01033
-15,5	-0,9127	0,06837	-6,75	-0,2649	0,01003
-15,25	-1,0965	0,03328	-6,5	-0,2377	0,00977
-15	-1,1161	0,0312	-6	-0,1825	0,00935
-14,75	-1,121	0,02977	-5,75	-0,1549	0,00912
-14,5	-1,1215	0,02857	-5,5	-0,1275	0,0088
-14,25	-1,1181	0,02751	-5	-0,0718	0,00845
-14	-1,099	0,02637	-4,75	-0,0441	0,00824
-13,75	-1,0711	0,02533	-4,5	-0,0162	0,0081
-13,5	-1,0462	0,02365	-4,25	0,0117	0,00793
-13,25	-1,0163	0,02288	-4	0,0394	0,0078
-13	-0,9847	0,02237	-3,75	0,0674	0,00769
-12,75	-0,9549	0,02183	-3,5	0,0954	0,00761
-12,5	-0,926	0,02126	-3,25	0,1232	0,00752
-12,25	-0,8954	0,02078	-3	0,1512	0,00745
-12	-0,8682	0,01946	-2,75	0,1791	0,00737
-11,75	-0,8365	0,01894	-2,5	0,2069	0,00729
-11,5	-0,8038	0,01852	-2,25	0,2346	0,00723
-11,25	-0,7707	0,01808	-2	0,2625	0,00715
-11	-0,7369	0,01769	-1,75	0,2903	0,00709
-10,75	-0,707	0,01745	-1,5	0,318	0,00703
-10,5	-0,6803	0,01619	-1,25	0,3456	0,00701
-10,25	-0,6491	0,01569	-1	0,3734	0,00697
-10	-0,6172	0,01529	-0,75	0,4012	0,00694
-9,75	-0,585	0,01491	-0,5	0,4288	0,00691
-9,5	-0,5547	0,01456	-0,25	0,4562	0,00686
-9,25	-0,5287	0,01426	0	0,4833	0,00678
-9	-0,5023	0,01345	0,25	0,5102	0,00658
-8,75	-0,4769	0,01285	0,5	0,5366	0,00635
-8,5	-0,4513	0,01249	0,75	0,5622	0,00617
-8,25	-0,4243	0,01214	1	0,5842	0,00594
-8	-0,3979	0,01184	1,25	0,6163	0,00588
-7,75	-0,3715	0,01155	1,5	0,6525	0,00598
-7,5	-0,3442	0,01127	1,75	0,6788	0,00611
-7,25	-0,3183	0,0108	2	0,7055	0,00622

Alpha	Cl	Cd	Alpha	Cl	Cd
2,25	0,7325	0,00633	10,75	1,4805	0,01911
2,5	0,7592	0,00646	11	1,4938	0,01986
2,75	0,7865	0,00656	11,25	1,5061	0,02069
3,25	0,8405	0,00681	11,5	1,5221	0,02129
3,5	0,8672	0,00696	11,75	1,5369	0,02199
3,75	0,8941	0,00709	12	1,55	0,02282
4	0,921	0,00722	12,25	1,5608	0,02382
4,25	0,9473	0,00739	12,5	1,5688	0,02506
4,5	0,9734	0,00758	12,75	1,5831	0,02588
4,75	0,9993	0,00778	13	1,5959	0,02683
5	1,0254	0,00797	13,25	1,6066	0,02796
5,25	1,0518	0,00813	13,5	1,6141	0,02939
5,5	1,0777	0,00834	13,75	1,6213	0,03089
5,75	1,1031	0,00857	14	1,6325	0,03209
6	1,128	0,00884	14,25	1,6414	0,03354
6,25	1,1523	0,00914	14,5	1,6474	0,03528
6,5	1,1761	0,00948	14,75	1,6508	0,03731
6,75	1,1988	0,00989	15	1,6585	0,03899
7	1,2208	0,01036	15,25	1,6638	0,04096
7,25	1,2417	0,01089	15,5	1,6661	0,0433
7,5	1,2614	0,01149	15,75	1,6666	0,04589
7,75	1,2793	0,0122	16	1,6698	0,04827
8	1,2973	0,01288	16,25	1,6706	0,05099
8,25	1,3164	0,01345	16,5	1,6692	0,05402
8,5	1,3346	0,01404	16,75	1,6638	0,05759
8,75	1,3514	0,01469	17	1,6605	0,06101
9	1,3676	0,01527	17,25	1,6584	0,06435
9,25	1,3835	0,01581	17,5	1,6548	0,06793
9,5	1,4004	0,01631	17,75	1,6497	0,07175
9,75	1,4171	0,01682	18	1,643	0,07583
10	1,4317	0,01746	18,25	1,6346	0,08024
10,25	1,4484	0,01797	18,5	1,6237	0,08507
10,5	1,4653	0,01849	18,75	1,6097	0,0904



## الملحق (ج):

لقد إعتمدنا لرسم الشفرة في برنامج SolidWorks على الإحداثيات (y، x) مملف تعريف NACA44.12 [70]:

X	Y
1.0000	0.0013
0.9500	0.0147
0.9000	0.0271
0.8000	0.0489
0.7000	0.0669
0.6000	0.0814
0.5000	0.0919
0.4000	0.0980
0.3000	0.0976
0.2500	0.0941
0.2000	0.0880
0.1500	0.0789
0.1000	0.0659
0.0750	0.0576
0.0500	0.0473
0.0250	0.0339
0.0125	0.0244
0.0000	0.0000
0.0125	-0.0143
0.0250	-0.0195
0.0500	-0.0249
0.0750	-0.0274
0.1000	-0.0286
0.1500	-0.0288
0.2000	-0.0274
0.2500	-0.0250
0.3000	-0.0226
0.4000	-0.0180
0.5000	-0.0140
0.6000	-0.0100
0.7000	-0.0065
0.8000	-0.0039
0.9000	-0.0022
0.9500	-0.0016
1.0000	-0.0013

# شهادة مشاركة

---



PEOPLE'S DEMOCRATIC REPUBLIC OF ALGERIA  
 MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH  
 UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA  
 FACULTY OF MATHEMATICS AND MATTER SCIENCES



N° : TAM372/2021

1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials  
 IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA (Virtual conference)

## CERTIFICATE OF PARTICIPATION

The organizing committee of the first International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials  
 IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA, certifies that:

**Anfal Benrezkallah**

presented a Poster communication entitled:

An analytical study of wind movement in the Ouargla region and its exploitation in the production of electric energy

Co-author (s): Amina Boukhlouf, Abdallah Zine and Mohammed Elbar Soudani

Dean of the Faculty  
 Pr Djamel BECHKI



IC-Coordinator of IC-SEAM'21

Quadr: Elbar Soudani BENMEBROUK



Chairman of the IC-SEAM'21

Quadr: Elbar Soudani MOHAMMEDI



## الدراسة الأيروديناميكية لتصميم شفرة توربين رياح ذو محور أفقي صغير المناسب للظروف المحلية لمنطقة ورقلة

### الملخص :

إن شفرة التوربين هي الجزء الأهم و الضروري في توربينات الرياح إذ يعتمد إستخراج الطاقة من الرياح على تصميمها. اهدف من هذه الدراسة هو تطوير توربينات الرياح ذات المحور الأفقي الصغيرة (HAWT) المناسبة لظروف الرياح المحلية في منطقة ورقلة. أولاً قمنا بتقدير طاقة الرياح في منطقة ورقلة من خلال الدراسة التي شاركنا بها في المؤتمر الدولي الأول للطاقة المستدامة و المواد المتقدمة IC-SEAM'21 المنظم من طرف جامعة قاصدي مرباح ورقلة (21-22 أبريل 2021).

يعتمد تصميم شفرة التوربين على المعاملات الأيروديناميكية، لتطوير المعادلات اللازمة لتحديد هذه المعاملات ندرس الحالة البسيطة حسب نظرية Betz التي نفترض فيه عمل الجهاز بدون ضياع والتي ستكون مرجع في كل الحسابات و من ثم ننتقل إلى حالة وجود الضياع بإستعمال نظرية BEM اعتماداً على هذا نستطيع تصميم و تحليل HAWT لرسم شكل شفرة التوربينات ذات ملف NACA 4412 . استخدام هذه الطريقة لتحديد توزيعات الوتر و زاوية الالتواء لتحسين الأداء الديناميكي الهوائي لتوربينات الرياح و القدرة المرغوبة 5 kW إلى 7.84 kW.

تم تطوير برنامج في 'Matlab' للحصول على توزيع المعاملات الأيروديناميكية. ثم تصميم الشفرات هندسيًا في البرنامج الصناعي 'SolidWorks' و محاكاتها في برنامج 'ANSYS' لدراسة تأثير كل من الضغط و السرعة و معامل الضغط على كل مقطع

### الكلمات الدالة :

الطاقة المتجددة، توربينات الرياح ذات المحور الأفقي (HAWT)، نظرية زخم عنصر الشفرة (BEMT)، الديناميكية الهوائية، زاوية الشفرة

## Aerodynamic study for blade design of a small horizontal axis wind turbine suitable for the local conditions of the Ouargla region

### Abstract:

The turbine blade is the most important and necessary part of a wind turbine as the extraction of energy from the wind depends on its design. The aim of this study is to develop small horizontal axis wind turbines (HAWT) suitable for local wind conditions in the Ouargla region. First, we estimated the wind energy in the region of Ouargla through the study that we participated in in the First International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials IC-SEAM'21 organized by the Kassdi Merbah University of Ouargla (April 21-22, 2021).

The design of the turbine blade depends on the aerodynamic parameters, to develop the equations necessary to determine these parameters, we study the simple case according to the Betz theory, in which we assume that the device works without loss, which will be a reference in all calculations, and then we move to the case of loss using the BEM theory. Depending on this, we can design and HAWT analysis of a NACA 4412 coil turbine blade profile. The benefit of Using this method to determine the chord and torsion angle distributions to improve the aerodynamic performance of a wind turbine and the desired power from 5 kW to 7.84 kW.

A program was developed in 'Matlab' to obtain the distribution of the aerodynamic parameters. Then the blades were engineered in the industrial program 'SolidWorks' and simulated in the 'ANSYS' program to study the effect of .pressure, speed and pressure factor on each section

### Key words:

Renewable Energy, Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), Blade Element Momentum Theory (BEMT), Aerodynamics, Blade Angle