

دراسة تطبيقية وعملية لجهاز تدفق هواء
"حالة دراسية لدراسة خصائص مروحة عند سرعة ثابتة"

**A Practical and Applied Study of an Air Flow Meter
"Characteristic Curves of Fan with Constant Speed"**

إسماعيل مفتاح الباعور

Asmail Meftah Albaour

قسم الهندسة الميكانيكية، كلية العلوم التقنية

مصراته، مصراته، ليبيا

ismailmuftah48@gmail.com

علي محمد اشكاب

Ali Mohamed Eshkab

قسم الهندسة الميكانيكية، كلية العلوم التقنية

مصراته، مصراته، ليبيا

alieshkab9@gmail.com

الملخص:

تهدف هذه الورقة العلمية إلى إجراء دراسة تجريبية لخصائص مروحة طاردة مركزية تعمل عند سرعة دوران ثابتة وسيتم التركيز على قياس وتحليل معدل التدفق الحجمي للمروحة عند سرعة ثابتة والتي كانت 1500 rpm وتغير في مساحة مقطع أنبوب التصريف كما تناولت الورقة العلاقة بين الضغط ومساحة التصريف والذي ينص عليه مبدأ إضافة إلى العلاقة بين مساحة التصريف وسرعة المائع كما تنص معادلة الاستمرارية وبالتالي نكون قد درسنا أهم العلاقات والنظريات في علم ديناميكا الموائع، وتم رسم علاقات بيانية بين خصائص المروحة كدالة لمعدل تدفق المروحة، كما لاحظنا العلاقة بين عزم الدوران والظروف التشغيلية المحيطة بالمروحة. من خلال هذه الدراسة، نسعى إلى فهم أفضل أداء للمروحة تحت تأثير ظروف.

كما يمثل الجهاز المستخدم منصة تجريبية تتيح دراسة سلوك المروحة وقياس خصائص أدائها المختلفة. من خلال هذا الجهاز، يمكن تحليل تأثير تصميم شفرات المروحة، أو زاوية الميل، أو تأثير وجود عوائق في محيطها، على معدل التدفق، والضغط الناتج، وكفاءة استهلاك الطاقة.

الكلمات الدالة: - المروحة - معدل التدفق - الضغط

Abstract

This scientific paper aims to conduct an experimental investigation into the characteristics of a centrifugal fan operating at a constant rotational speed. The focus will be on measuring and analyzing the volumetric flow rate of the fan at this fixed speed, while also examining variations in the cross-sectional area of the discharge duct. Furthermore, the paper addresses the relationship between pressure and discharge area, as dictated by the principle of the Bernoulli's equation addition to the correlation between discharge area and fluid velocity, as described by the continuity equation. Consequently, this study encompasses the key relationships and theories within the field of fluid dynamics. Graphical representations illustrating the fan's characteristics as a function of its flow rate are presented, and the relationship between torque and the prevailing operating conditions surrounding the fan is also observed. Through this investigation, we seek to gain a deeper understanding of the fan's performance under various conditions.

The utilized apparatus serves as an experimental platform enabling the study of the fan's behavior and the measurement of its diverse performance characteristics. This setup allows for the analysis of the impact of fan blade design, pitch angle, and the influence of obstructions in its vicinity on the flow rate, generated pressure, and energy consumption efficiency.

Keywords: Fan – Flow rate – Pressure.

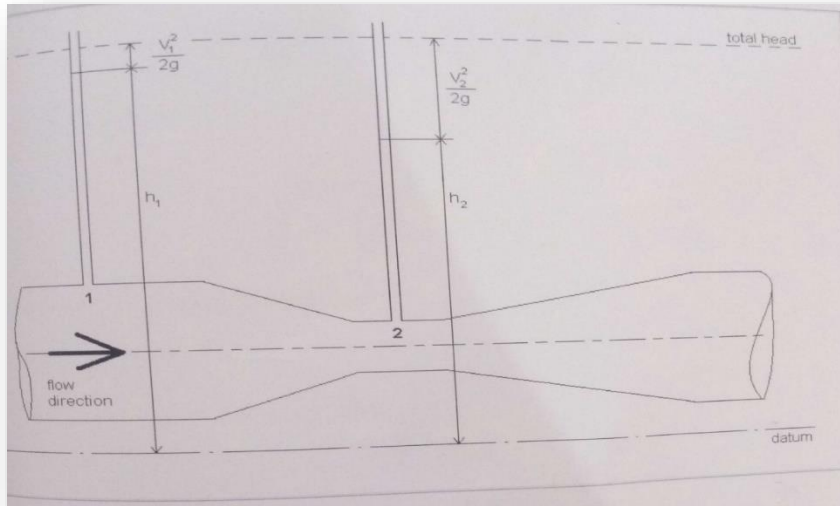
1. المقدمة

تتطلب دراسة الديناميكا الهوائية لفهم بعض الخصائص الأساسية التي تطبق على الديناميكا الهوائية والعلاقات التي تربطها بشكل عام، وتشمل هذه الخصائص والعلاقات بعض القوانين التي تصف سلوك تدفق الهواء وسرعته وتحديد مختلف القوي الديناميكية الهوائية والعزوم التي تعمل على السطح، وجميع هذه القوي الديناميكية الهوائية الخارجية على السطح هي نتيجة لضغط الهواء وتدفعه ومن اهم النظريات والعلاقات المستخدمة في ذلك هي معادلة الاستمرارية ومعادلة برنولي ورقمي رينولدز وماخ. وتعد المراوح من الآلات الديناميكية الدورانية ذات الأهمية البالغة في العديد من التطبيقات الهندسية والصناعية. [4] فهي تستخدم على نطاق واسع في توليد تدفق الهواء أو السوائل لأغراض التهوية، والتبريد، والدفع، والخلط، وغيرها. يعتمد الأداء الفعال للمروحة بشكل كبير على تصميمها الهندسي وعلى فهم خصائص تدفق المائع الناتج عنها. [6]

2. معادلة الاستمرارية:

أنبوب فنثوري هو جهاز يُستخدم منذ سنوات عديدة لقياس معدل التدفق على طول أنبوب. تم تصميم مقياس تدفق فنثوري لتقليل انفصال الطبقة الجدارية الذي يؤدي إلى مقاومة الشكل بشكل كبير. يُغذى المائع عبر انقباض إلى جزء عنقي ذي مساحة أصغر من مساحة الأنبوب. بحيث يؤدي التغير في مساحة المقطع العرضي إلى تغير في سرعة المائع؛ تكون السرعة في العنق أعلى منها في الأنبوب. يرتبط هذا الارتفاع بتغير في الضغط بين المقطع الاصيلي والعنق، ويعتمد مقدار هذا التغير في الضغط على معدل التدفق، ويمكن تحديد معدل التدفق عن طريق قياس هذا الانخفاض في الضغط. [2]

في هذا المقياس الموضح أسفل، يتسارع المائع بمروره عبر مخروط متقارب بزاوية 15-20 درجة. يُقاس فرق الضغط بين الطرف العلوي للمخروط والعنق ويوفر الإشارة لمعدل التدفق. ثم يتباطأ المائع في مخروط ذي زاوية أصغر (5-7 درجات) حيث يتم تحويل جزء كبير من الطاقة الحركية مرة أخرى إلى طاقة ضغط. [10]



شكل (1) يوضح أنبوب فنثوري

وباعتبار أن المائع المتدفق غير قابل للانضغاط وافترض عدم وجود فقد في الطاقة على طول تدفق المائع عبر الجهاز (خط الطرد) وأن السرعة والارتفاع ثابتان عبر كل مقطع، يمكن كتابة معادلة برنولي كالآتي:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \text{const}$$

ومن معادلة الاستمرارية

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2$$

وهنا لإيجاد قيمة السرعة عند عنق التصريف يتم بتعويض قيمة السرعة في المقطع الاسلي في معادلة برنولي بما يساويها من خلال معادلة الاستمرارية كما في المعادلة الاتية

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

ويتم الحصول على السرعة عند منطقة التقلص في مساحة المقطع تكون الصورة النهائية للمعادلة كالاتي

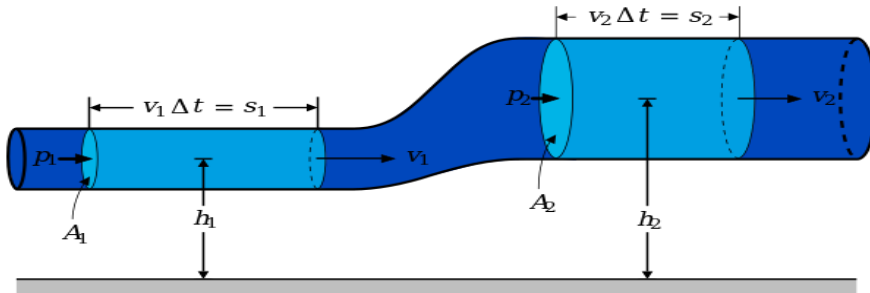
$$v_2 = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

كما يمكن إيجاد معدل التدفق الحجمي في هذه الحالة من خلال المعادلة الاتية

$$[10] \quad Q = A_2 v_2 = A_2 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

3 . معادلة (مبدأ) برنولي:

تعتبر معادلة برنولي عن العلاقة بين الضغط والسرعة والارتفاع وهي تستخدم في التدفق المستقر وغير القابل للانضغاط بحيث تكون كل من السرعة والضغط دالة في الموضع. [7]



شكل (2) خط الانسياب لمعادلة برنولي

ويتم الحصول على معادلة برنولي من خلال تكامل معادلة أويلر للحركة بين نقطتين على طول خط الانسياب كما في المعادلة الاتية: [1]

$$\int \frac{d_p}{\rho} + \int g d_{z1} + \int v_1 dv = cost$$

وفي حالة كان المائع غير قابل للانضغاط فإن كثافته ثابتة منما يجعل المعادلة تصبح

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z = cost$$

ولتطبيق معادلة برنولي السابقة على نقطتين على طول خط الانسياب للمائع فإنها تصبح على الوضع الاتي:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

بحيث يكون:

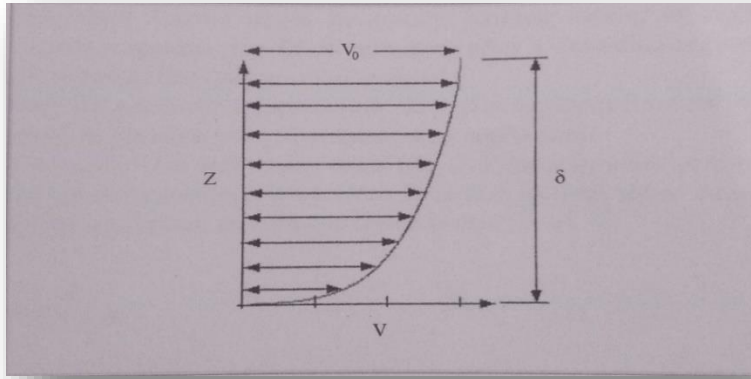
$\frac{P}{\rho g}$ علو الرفع

$\frac{v^2}{2g}$ علو الحركة

Z علو الوضع

4. نظرية الطبقة الجدارية

في مجال ديناميكا الموائع، يمثل فهم سلوك الموائع بالقرب من الأسطح الصلبة تحديًا فريدًا نظرًا للتأثيرات القوية للزوجية. في بداية القرن العشرين، قدم العالم الألماني لودفيج براندتل مفهومًا أحدث نقله نوعية في تحليل تدفق الموائع، وهو نظرية الطبقة الجدارية (Boundary Layer Theory) [4] تقوم هذه النظرية على تقسيم منطقة التدفق بالقرب من سطح صلب إلى طبقة رقيقة نسبيًا، تُعرف بالطبقة الجدارية، حيث تكون تأثيرات اللزوجة مهيمنة وتحدث فيها معظم التغيرات في السرعة. أما خارج هذه الطبقة، فيُعتبر التدفق مثاليًا أو غير لزج، مما يبسط المعادلات الحاكمة للحركة بشكل كبير. [5]



شكل (3) الطبقة الجدارية

5. مفهوم رقم رينولدز:

رقم رينولدز هو كميّار للفصل بين السريان الرقائقي والسريان المنتظم، ويتم الحصول على هذه القيم من خلال التعويض في علاقة رياضية تجمع مجموعة من خصائص المائع تم الحصول عليها من خلال التجارب العملية وتختلف قيم رقم رينولدز على حسب شكل الحيز الذي يسري خلاله المائع ففي الاسطح المستوية يكون السريان منتظماً رقائقي إذا كان

$$Re \leq 5 \times 10^5$$

ويكون مضطرباً أو دوامياً إذا كان أكبر من ذلك
أما في الأسطوانات والانابيب فيكون التدفق منتظماً إذا كان

$$R_e \leq 2000$$

ويكون مختلطاً إذا كان

$$2000 < R_e \leq 2300$$

أما إذا كان أكبر من ذلك فيكون مضطرباً أو دوامياً. [3]

6. وصف الجهاز المستخدم

هو منصة لتدفق الهواء لإجراء مجموعة من التجارب والأبحاث في علم ديناميكا الهواء والتي تدرس مجموعة من الخصائص للمروحة المستخدم وتحقيق العديد من العلاقات والنظريات في ديناميكا الموائع. [8]
*خصائص الجهاز

جدول (1) يوضح خصائص المنصة المستخدمة من قبل الشركة المصنعه

1600 m ³ /h	معدل تدفق الهواء للمروحة
220/240 V , 50 Hz	مزود الطاقة
1900 × 800 1600 (H) mm	الابعاد الكلية
80 Kg approx	الوزن الصافي
Prodit s. a. s	المصنع
7329/0043/000	رقم التسلسلي
2008	سنة الصنع

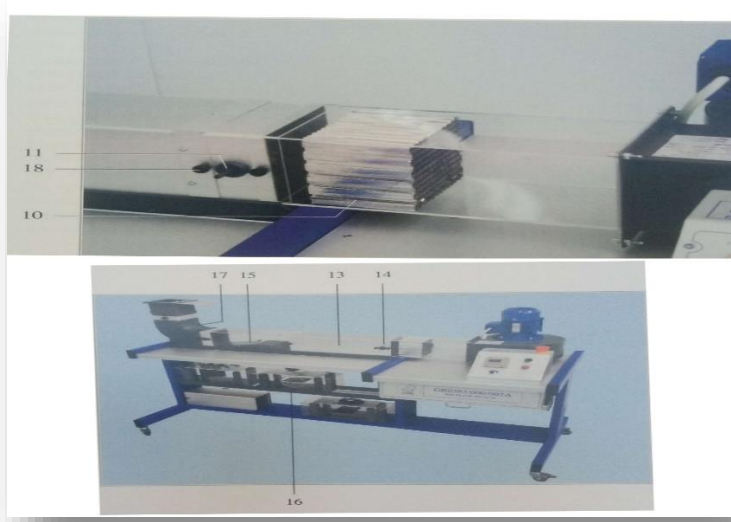
وتتكون هذه المنصة من مجموع من الاجراء والأجهزة والتي موضح بالصور الاتية:

جدول (2) مكونات منصة تدفق الهواء

مفتاح تشغيل وإيقاف رئيسي	مروحة ذات مقاومة متغيرة للتحكم في
4 شبكة تهوية المروحة	منفذ تغذية الطاقة
6 مفتاح تشغيل ثانوي	5 مفتاح تامين المروحة
8 مفتاح اختيار سره الدوران	7 مفتاح إيقاف ثانوي
10 مشبك توزيع الهواء	9 شاشة عرض السرعة
12 صمام لقفل فتحة التدفق	11 أنبوب لقياس الضغط
14 وصلة قناة مستقيمة بطول 70	13 وصلة قناة مستقيمة 400 مم
16 رف تخزين الوصلات المساعدة	15 وصلة بمساحة مقطع متغيره
18 دبوس تثبيت صغير	17 وصلة منحنية



شكل (4) مروحة طاردة مركزية



شكل (5) مكونات منصة تدفق الهواء

***التجارب التي يتم تنفيذها على هذه المنصة**

- خصائص المروحة عند سرعة ثابتة وتغير في مساحة مقطع التصريف
- خصائص المروحة عند سرعة متغيره وثبات مقطع التصريف
- قياس معدلات تدفق الهواء
- تحقيق لمعادلتي الاستمرارية وبرنولي
- دراسة تأثير القوي الديناميكية على جناح الطائرة عند زوايا هجوم مختلفه [8]

***منحنيات خصائص المروحة عند سرعة ثابتة**

تم تنفيذ هذه التجربة على منصة تدفق الهواء التي تم التعرف عليها سابقا والتي تستخدم لإجراء مجموعة من اهم التجارب العلمية للخصائص الديناميكية للهواء.



شكل (6) طاولة تدفق الهواء

***الغرض من اجراء التجربة**

الغرض من هذه التجربة هو قياس معدل التدفق Q ، وسرعة الهواء v ، والضغط الديناميكي P_d ، والضغط الكلي P_t عندما تكون سرعة دوران المروحة n ثابتة وتغير في مساحة مقطع تصريف الهواء. [8]
ملاحظة: / هذه التجربة ستجرى عند سرعة ثابتة والتي تم اختيارها عند 1500 rpm باعتبارها متوسط السرعات التي يمكن تحميلها على المروحة وكذلك باعتبار التجربة تشمل غلق كامل لنفق خروج الهواء من ما يعرض المروحة الى الخطر في حال تعرضها الى سرعات عالية كما ان عند سرعة ثابتة سيتم تطبيق معادلة الاستمرارية والتي تعبر عن السرعة ومساحة المقطع إضافة الى معادلة برنولي وهي كعلاقة بين الضغط والسرعة.

***خطوات تنفيذ التجربة**

- 1) يتم تشغيل المروحة وفقاً للتعليمات الواردة (في الظروف الابتدائية)
- 2) اضبط سرعة دوران المروحة n على قيمة محددة مسبقاً (على سبيل المثال 1500 rpm)

(3) إقفال مجر خروج الهواء، ثم نقوم بقياس:

. فرق الضغط ΔP

. الضغط الاستاتيكي P_s .

ملاحظات مهمة

ΔP -: يجب قياسه عن طريق توصيل المانومتر المائل بأنبوب الضغط والموضوع على أنبوب قياس معدل التدفق

كما هو موضح بالشكل الاتي و الموجود في الجزء الخلفي لمنضدة تدفق الهواء.

P_s -: يجب قياسه في مقطع القناة (137×137 مم مربع).

بحيث يتم حساب الضغط الاستاتيكي من العلاقة التالية:

$$P_s = P_{read} \pm P_{atm}$$

حيث أن P_{read} /: هو الضغط المقاس بواسطة طرف المانومتر المائل

P_{atm} : هو الضغط الجوي والذي يساوي $101325 P_a$

:

إذا كان $P_{measured} > P_{atm}$ ، فمن الصحيح استخدام المعادلة السابقة بالصورة الاتية

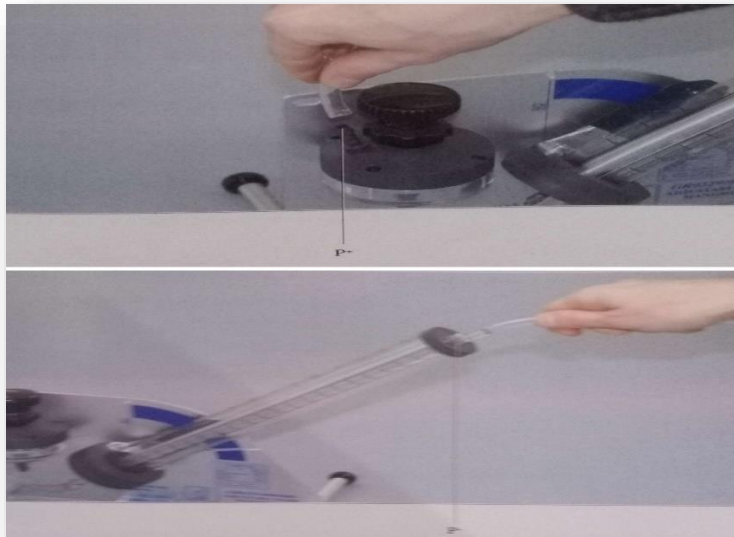
$$P_s = P_{atm} + P_{read}$$

بينما إذا كان $P_{measured} < P_{atm}$ ، فمن الصحيح استخدام المعادلة بالشكل الاتي

$$P_s = P_{atm} - P_{read}$$

في حالة كانت قراءة المانومتر المائل تنخفض إلى الصفر، فيتم توصيل أنبوب القياس بالطرف الآخر للحصول على

قيمة للضغط يمكن قراءتها كما بالشكل الاتي. [3]



شكل (7) جهاز قياس الضغط

- 4) نقوم بفتح تدريجي لقفل مجر الهواء أن تكون نسبة الزيادة في الفتح متساوي مثلاً (0%، 25%، 50%، 75%، 100%) ونكرر أخذ القياسات المذكورة بالنقطة (3) لكل قيمة فتحة يتم اختبارها.
- 5) يتم إعداد جدول التالي وتدوين كافة النتائج المتحصل عليها من التجربة وكذلك المتغيرات التي يتم إيجادها باستخدام العلاقات الرياضية

جدول (3) يوضح المتغيرات العملية والنظرية للتجربة المنفذه

سرعة المروحة (rpm)			كثافة المائع (Kg/m^3)			قيم المتغيرات من التجربة			
القيم الموجودة رياضياً			القيم الموجودة رياضياً						
نسبة الفتحة (%)	فرق الضغط (mm)	الضغط الاستاتيكي (mm)	العزم (N·m)	فرق الضغط (Pa)	الضغط الاستاتيكي (Pa)	معدل التدفق (m^3/s)	سرعة الهواء (m/s)	الضغط الديناميكي (Pa)	الضغط الكلي (Pa)

*العلاقات الرياضية المستخدمة في التجربة :

- 1- لكل حالة تدفق، يتم حساب الضغط التفاضلي (ΔP) والضغط الاستاتيكي (P_s) ، بوحدة الباسكال، باستخدام الصيغة التالية:

$$P_s(P_a) = P_{mm} \times \rho \times g \div 1000$$

- 2- إيجاد معدل التدفق الحجمي Q بوحدة (m^3/s)، باستخدام العلاقة التالية:

$$Q = A_{pipe} \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$$

ملاحظة

- يتم استخدام قيمة كثافة الهواء $\rho_{air} = 1.2257 Kg/m^3$

- تمثل A_{pip} مساحة مقطع أنبوب دخول الهواء بالجهاز.

- 3- حساب سرعة الهواء لكل عملية باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

$$v = \frac{Q}{A_{duct}}$$

حيث: A_{duct} : مساحة مقطع خط التدفق للجهاز. [1]

- 4- إيجاد قيمة الضغط الديناميكي في كل مرحلة من التجربة باستخدام العلاقة التالية:

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2}$$

حيث: P_d : الضغط الديناميكي ρ : كثافة الهواء v : سرعة الهواء

- 5- حساب الضغط الكلي P_t من خلال جمع الضغط الاستاتيكي مع الضغط الديناميكي.

*نتائج التجربة :

نقوم بإعداد الجدول المشار إليه سابقاً لتدوين النتائج

جدول (4) يوضح القيم العملية والنظرية للمتغيرات خلال التجربة

كثافة مائع المانوميتر (Kg/m^3) 1019						سرعة المروحة (rpm) 1500			
القيم الموجودة رياضياً						قيم المتغيرات من التجربة			
P_t (KP_a)	P_d (P_a)	v (m/s)	Q (m^3/s)	P_s (KP_a)	ΔP (P_a)	C ($N \cdot m$)	P_s (mm)	ΔP (mm)	(n) (%)
101.59	0	0	0	101.59	0	0.87	31	0	0
101.65	180.1	17.14	0.081	101.47	54.98	0.49	19	5.5	25
101.476	106.4	13.17	0.1236	101.37	129.95	0.36	8.5	13	50
101.38	60.01	9.895	0.1393	101.32	164.94	0.29	3.5	16.5	75
101.34	37.71	7.751	0.1455	101.3	179.93	0.22	1.5	18	100

*التحليل الإحصائي

يعتبر التحليل الاحصائي عنصراً مهماً في مثل هذه الورقات وفي القياسات الهندسية ومد تأثيرها على النتائج المتحصل عليها وموثوقية تلك النتائج وسوف نقوم في هذا الخصوص بحساب الانحراف المعياري للقيم المقاسه عند تنفيذ التجربة والمتمثل في فرق الضغط عند خط السحب للمروحة بوحدات ملم والضغط الاستاتيكي بعد دفع الهواء من المروحة بوحدات ملم للنقاط الاربعة الاخيره باعتبار النقطة الاوله نقطة ركود بسبب غلق مجري الهواء للمنصة. [6]

أولاً: / الانحراف المعياري في خط السحب للمروحة

1- حساب المتوسط (المتوسط الحسابي) :

عدد القيم $n=4$ هو

$$\mu_y = \frac{\sum Y}{n} = \frac{5.5 + 13 + 16.5 + 18}{4} = 13.25$$

2- حساب الانحراف عن المتوسط لكل قيمة

نقوم بطرح المتوسط من كل قيمة:

$$(x - \mu)$$

$$5.5 - 13.25 = -7.75 \bullet$$

$$13 - 13.25 = -0.25 \bullet$$

$$16.5 - 13.25 = 3.25 \bullet$$

$$18 - 13.25 = 4.75 \bullet$$

3- تربيع الانحرافات:

ربع كل انحراف

$$(x - \mu)^2$$

$$(-7.75)^2 = 60.0625 \bullet$$

$$(-0.25)^2 = 0.0625 \bullet$$

$$(3.25)^2 = 10.5625 \bullet$$

$$(4.75)^2 = 22.5625 \bullet$$

4- جمع مربعات الانحرافات:

$$\begin{aligned} & \sum(x - \mu)^2 \\ & = 60.0625 + 0.0625 + 10.5625 + 22.5625 = 93.25 \end{aligned}$$

5- حساب التباين:

بما أنها عينة، نقسم على: n-1

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x-\mu)^2}{n-1}$$

$$\sigma^2 = \frac{93.25}{4 - 1} \approx 31.0833$$

6- حساب الانحراف المعياري:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{31.0833} \approx 5.5752$$

الانحراف المعياري للقيم لفرق الضغط بخط السحب هو [5.5,13,16.5,18] هو تقريباً 5.5752 ملم.

ثانياً: / حساب الانحراف المعياري في خط الدفع للمروحة

1. ساب المتوسط (المتوسط الحسابي):

عدد القيم هو 4

$$\mu_y = \frac{\sum Y}{n}$$

2. حساب الانحراف عن المتوسط لكل قيمة:

نقوم بطرح المتوسط من كل قيمة: (y-μy)

$$19 - 8.125 = 10.875 \circ$$

$$8.5 - 8.125 = 0.375 \circ$$

$$3.5 - 8.125 = -4.625 \circ$$

$$1.5 - 8.125 = -6.625 \circ$$

3. تربيع الانحرافات

ربع كل انحراف:

$$(y-\mu_y)^2$$

$$(10.875)^2 = 118.265625 \circ$$

$$(0.375)^2 = 0.140625 \circ$$

$$(-4.625)^2 = 21.390625 \circ$$

$$(-6.625)^2 = 43.890625 \circ$$

4. جمع مربعات الانحرافات

$$\begin{aligned} & \sum(y - \mu y)^2 \\ = & 118.265625 + 0.140625 + 21.390625 + 43.890625 = 183.6075 \end{aligned}$$

5. حساب التباين:

بما أنها عينة، نقسم على: n-1

$$\begin{aligned} \sigma y^2 &= \frac{\sum(y - \mu y)^2}{n - 1} \\ \sigma y^2 &= \frac{183.6075}{4 - 1} = 61.2025 \end{aligned}$$

6. حساب الانحراف المعياري:

$$\begin{aligned} \sigma y &= \sqrt{\sigma y^2} \\ \sigma y &= \sqrt{61.2025} \approx 7.8232 \end{aligned}$$

ومن هنا فإن الانحراف المعياري للضغط الاستاتيكي هو

الانحراف المعياري للقيم [19,8.5,3.5,1.5] هو تقريباً 7.8232 ملم.

يمكن ان نرجع الانحراف المعياري في القياسات الي

1- دقة المانومتر المستخدم

2- عدم استقرار الظروف الجوية

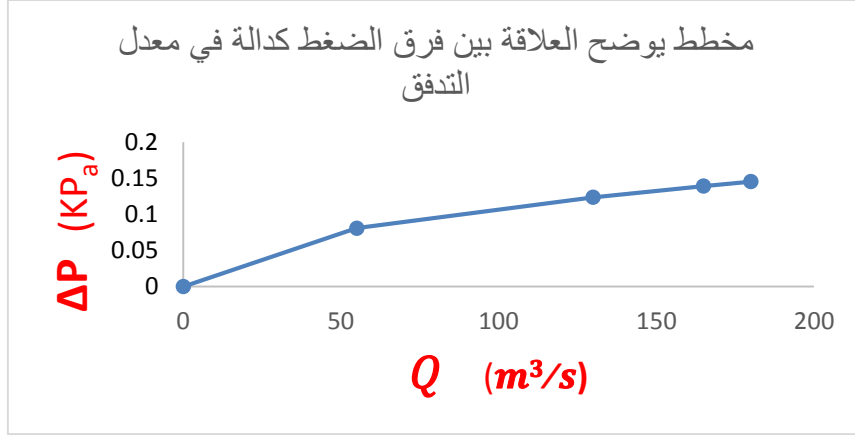
3- موقع جهاز القياس مقارنة بنقطة القياس

4- اشكال في خصائص تصميم المروحة

5- أخطاء بشرية

*المخططات

- رسم منحنى فرق الضغط كدالة لمعدل التدفق عند السرعة الدورانية المحددة.
- رسم علاقة بيانية لتوضيح العلاقة بين الضغط الاستاتيكي كدالة لمعدل التدفق الحجمي



مخطط (1) يوضح العلاقة بين فرق الضغط ومعدل التدفق

*شرح لشكل المنحنى مخطط فرق الضغط ومعدل التدفق

المنحنى يبدأ من نقطة الأصل (0, 0)، مما يعني أنه عندما يكون معدل التدفق صفراً، يكون فرق الضغط أيضاً صفراً. هذا منطقي لأنه لا يوجد تدفق لإنشاء فرق في الضغط.

ثم يرتفع المنحنى بشكل غير خطي، ويمكن تقسيم سلوكه إلى قسمين رئيسيين:

1. الارتفاع الأولي الحاد (من $Q=0$ إلى $Q \approx 50 \text{ m}^3/\text{s}$) في هذه المنطقة، مع زيادة طفيفة في معدل التدفق، يرتفع فرق الضغط بشكل ملحوظ. هذا يشير إلى أن النظام (على الأرجح مروحة في هذه الحالة) قادر على توليد ضغط كبير حتى عند معدلات تدفق منخفضة.

2. الارتفاع الأقل حدة أو شبه الخطي (من $Q \approx 50 \text{ m}^3/\text{s}$ إلى $Q \approx 180 \text{ m}^3/\text{s}$) بعد النقطة الأولى، يستمر فرق الضغط في الزيادة مع زيادة معدل التدفق، ولكن بمعدل أقل حدة. قد يصبح هذا الجزء من المنحنى شبه خطي. هذا السلوك نموذجي لمنحنيات أداء المراوح الطاردة المركزية.

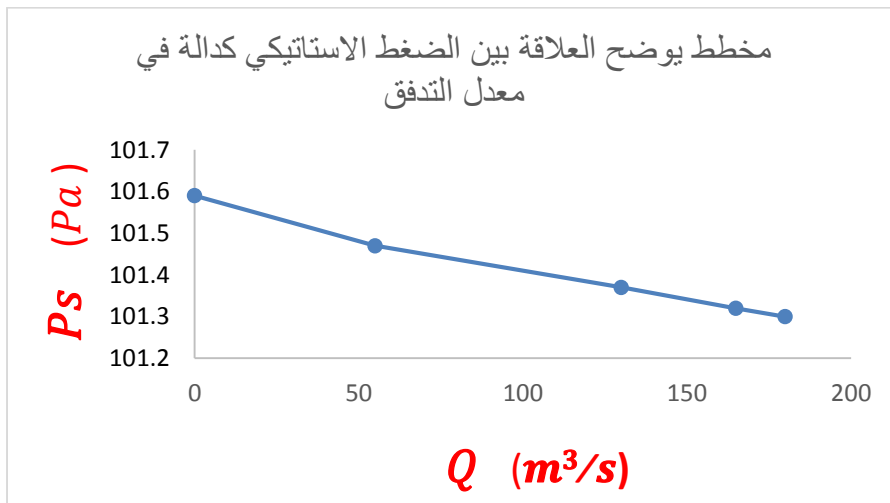
لماذا يظهر المنحنى بهذا الشكل في سياق المراوح الطاردة المركزية؟

• منطقة الضغط العالي والتدفق المنخفض: عند معدلات التدفق المنخفضة، تعمل المروحة بشكل أساسي على زيادة ضغط الهواء. تكون المقاومة في النظام الهوائي منخفضة، وبالتالي يمكن للمروحة توليد فرق ضغط كبير لدفع كمية صغيرة من الهواء.

• منطقة التدفق العالي والانخفاض التدريجي في الضغط: مع زيادة الطلب على تدفق الهواء (زيادة معدل التدفق)، تبدأ المقاومة في النظام الهوائي (مثل الاحتكاك في القنوات، وجود فلاتر أو عوائق) في الازدياد بشكل كبير. للتغلب على هذه المقاومة المتزايدة ودفع المزيد من الهواء، تحتاج المروحة إلى العمل عند نقطة تشغيل مختلفة على منحنى الأداء الخاص بها. بشكل عام، مع زيادة معدل التدفق، يميل فرق الضغط الذي يمكن للمروحة توليده إلى الانخفاض تدريجياً.

- الخصائص التصميمية للمروحة: شكل شفرات المروحة وزاوية ميلها وتصميم الحزبون (Volute) كلها عوامل تؤثر على شكل منحنى الأداء هذا. فبعض تصاميم المراوح تكون أفضل في توليد ضغط عالٍ عند تدفقات منخفضة، بينما تكون تصاميم أخرى أكثر كفاءة عند تدفقات أعلى.
- مقاومة النظام: المنحنى لا يمثل فقط خصائص المروحة وحدها، بل يمثل تفاعلها مع مقاومة النظام الهوائي المتصل بها. كلما زادت مقاومة النظام، كلما احتاجت المروحة إلى توليد فرق ضغط أكبر لتحقيق نفس معدل التدفق. ملخص ما يمكن فهمه من المنحنى:

شكل المنحنى الظاهر هو نموذج سلوك متوقع لمنحنى أداء مروحة طاردة مركزية. يبدأ بضغط مرتفع عند تدفق منخفض، ثم ينخفض معدل زيادة الضغط مع زيادة معدل التدفق بسبب ازدياد مقاومة النظام وحاجة المروحة للعمل عند نقاط تشغيل مختلفة على منحنى أدائها. الفهم الدقيق لهذا المنحنى ضروري لاختيار المروحة المناسبة لتطبيق معين وضمان الأداء الأمثل للنظام.



مخطط (2) يوضح العلاقة بين الضغط الاستاتيكي ومعدل التدفق

شرح لشكل المنحنى وتفسيره:

المنحنى يبدأ من نقطة على المحور الرأسي عند معدل تدفق صفر ($Q=0$). هذه النقطة تمثل أعلى قيمة للضغط الاستاتيكي عند عدم وجود تدفق أي عندما تكون المروحة تعمل ولكنها لا تدفع هواءً، وهذا ما يسمى "الضغط الساكن المحكم" أو "Static Shutoff Pressure". ثم يظهر المنحنى سلوكاً تنازلياً، حيث:

الانخفاض التدريجي للضغط الاستاتيكي مع زيادة معدل التدفق: مع زيادة معدل التدفق (Q) ، ينخفض الضغط الاستاتيكي (PS). هذا هو السلوك النموذجي لمعظم المراوح (سواء كانت طاردة مركزية أو محورية) عند رسم منحنى الضغط الاستاتيكي مقابل معدل التدفق.

لماذا يظهر هذا السلوك؟

*مبدأ عمل المروحة: تقوم المروحة بتحويل الطاقة الميكانيكية (دوران الدفاعة) إلى طاقة ضغط (ضغط استاتيكي) وطاقة حركة (ضغط ديناميكي أو سرعة تدفق). هناك علاقة عكسية بين الضغط الاستاتيكي ومعدل التدفق في نظام المروحة. [9]

*توازن الطاقة (معادلة برنولي): بشكل مبسط، يمكن فهم هذا السلوك من خلال مبادئ ديناميكا الموائع. في نظام المروحة، يتم إنتاج إجمالي طاقة (Total Energy) والتي تتكون من مجموع الطاقة الكامنة (الضغط الاستاتيكي) والطاقة الحركية (الضغط الديناميكي المرتبط بالسرعة). [7] . عندما يكون معدل التدفق منخفضاً (أو صفراً)، تكون طاقة الحركة قليلة جداً أو معدومة، وبالتالي تتركز معظم طاقة المروحة المنتجة في الضغط الاستاتيكي.

. كلما زاد معدل التدفق (أي زادت سرعة الهواء)، زادت طاقة الحركة (الضغط الديناميكي). بما أن إجمالي الطاقة التي يمكن للمروحة توليدها عند سرعة دوران ثابتة محدود، فإن زيادة الضغط الديناميكي تأتي على حساب الضغط الاستاتيكي، مما يؤدي إلى انخفاض الضغط الاستاتيكي. [6]

*زيادة الفقد (Losses): مع زيادة معدل التدفق، تزداد أيضاً الفقدان الهيدروليكي (مثل فقدان الاحتكاك وفقدان الشكل) داخل المروحة والنظام المتصل بها. هذه الفقدان تستهلك جزءاً من طاقة المروحة المنتجة، مما يساهم في انخفاض الضغط الاستاتيكي المتاح.

ملخص ما يمكن فهمه من المخطط:

المخطط الذي يوضح العلاقة بين الضغط الاستاتيكي ومعدل التدفق (PS vs Q) هو منحنى هبوطي يمثل كيفية انخفاض قدرة المروحة على الحفاظ على الضغط الاستاتيكي مع زيادة كمية الهواء التي تدفعها. هذا السلوك أساسي في فهم كيفية اختيار وتصميم المراوح لأنظمة التهوية وتكييف الهواء والتطبيقات الصناعية.

كيفية الاستفادة من النتائج المسجلة في تحسين كفاءة المراوح الصناعية:

المعلومات المقدمة (سرعة المروحة، كثافة مائع المانوميتر، والجدول الذي يحتوي على القيم التجريبية والنظرية للعديد من المتغيرات) والمخططات السابقة (التي توضح العلاقة بين فرق الضغط الكلي ومعدل التدفق، والعلاقة بين الضغط الاستاتيكي ومعدل التدفق) هي أدوات قوية جداً لفهم أداء المروحة الطاردة المركزية وتحديد سبل تحسين كفاءتها.

ويمكن الاستفادة من هذه البيانات في تحسين كفاءة المراوح الصناعية:

1. فهم خصائص أداء المروحة (المنحنيات خصائص المروحة):

***منحنيات الأداء: (Performance Curves)** المخططات المشار إليها للمروحة تعتبر منحنيات حاسمة لتحديد نقطة التشغيل المثلى .

***منحنى فرق الضغط الكلي: (ΔP vs Q)** يوضح إجمالي القدرة على الضغوط التي تولدها المروحة. عادة ما تكون هناك نقطة قصوى للكفاءة بالقرب من الذروة أو في الجزء المنحدر باعتدال من هذا المنحنى.

***منحنى الضغط الاستاتيكي: (PS vs Q)** يوضح الضغط المتاح للتغلب على مقاومة النظام (مثل فقدان الاحتكاك في القنوات).

***تحديد نقطة الكفاءة القصوى:** من خلال رسم منحنى الكفاءة (η) مقابل معدل التدفق (Q) (والتي يمكن حسابها من البيانات المتاحة)، يمكن تحديد نقطة التشغيل التي تحقق عندها المروحة أعلى كفاءة. هذه النقطة التي يجب أن تسعى المروحة للعمل عندها في التطبيقات الصناعية.

2. تحليل الجدول السابق: القيم التجريبية للتجربة وكيفية الاستفادة منها:

الجدول يوفر بيانات غنية يمكن استغلالها:

• **كثافة مائع المانوميتر: (10191019 Kg/m^3)** هذه القيمة تستخدم في حسابات الضغط، خاصة عند

تحويل قراءات المانوميتر (بالملم من عمود الماء أو الزئبق) إلى باسكال. دقتها مهمة لضمان صحة الحسابات.

• **سرعة المروحة: (rpm = 1500)** هذه هي السرعة الثابتة التي أجريت عندها التجربة. أي تحسينات في التصميم سيتم تقييمها عند هذه السرعة.

• **C (N·m):** يمثل العزم (Torque) المطلوب لتشغيل المروحة. هذا متغير أساسي لحساب القدرة المدخلة للمروحة ($P_{in} = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot C / 60$) حيث N هي سرعة الدوران بال rpm.

• **Q (m³/s):** معدل التدفق الحجمي (Volume Flow Rate)، وهو الأداء الأساسي للمروحة.

• **Pt (KPa) & PS (Pa):** الضغط الاستاتيكي والضغط الكلي (فرق الضغط الكلي كما في المخطط الأول). هذه هي مخرجات الضغط للمروحة.

• **v (m/s):** سرعة التدفق. يمكن حسابها من معدل التدفق والمساحة ($v = Q/A$).

• **Pd (Pa):** الضغط الديناميكي (Dynamic Pressure). يمكن حسابه من السرعة ($Pd = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2$)

بشكل عام، تكمن الاستفادة في:

• **تشخيص المشاكل:** تحديد أين ومتى تفقد المروحة طاقتها (انخفاض الكفاءة).

• **التصميم الموجه بالبيانات:** استخدام البيانات التجريبية والعديدية لتوجيه قرارات التصميم والتعديلات.

• **تحسين الكفاءة التشغيلية:** من خلال ضمان عمل المروحة بالقرب من نقطة الكفاءة القصوى، مما يقلل استهلاك الطاقة وتكاليف التشغيل.

• الحد من الضوضاء والاهتزازات: غالباً ما ترتبط نقاط التشغيل غير الكفؤة بزيادة الضوضاء والاهتزازات، وتحسين الكفاءة يمكن أن يقلل منها أيضاً. [9]

البيانات التي قدمتها هي نقطة انطلاق ممتازة لأي مشروع يهدف إلى تحسين أداء المراوح الصناعية.
*الخلاصة:

تم العمل على منصة تدفق الهواء والموجودة بمعمل ميكانيكا الموائع بكلية العلوم التقنية مصراته ليبيبا لاحتضنا مدى ضرورة تواجد مثل هذه الأجهزة لتعزيز المعرفة وقدرة الربط بين النظريات والعلاقات الرياضية في علم الموائع بصورة عامة ومن خلال هذه التجربة تم العمل على تطبيق نص معادلي برنولي والاستمرارية والتي تربط العلاقة بين السرعة والضغط ومساحة المقطع. كذلك إيجاد خصائص المروحة عند سرعة ثابتة ورسم المخططات التي توضح التغير الذي يحدث عند معدل التدفق وفرق الضغط إضافة إلى الضغط الاسناتيكي وذلك بتغير مساحة مقطع التصريف للهواء.

*المراجع

Balachandran, P. (2012). *Engineering fluid mechanics*. PHI Learning Private Limited

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2013). *Ebook: Fluid mechanics fundamentals and applications (si units)*. McGraw Hill.

الدكام، ا. ه.، أبوغريس، ص. م.، & سيالة، ف. م. ف. (1999). *أساسيات ميكانيكا الموائع (الجزء الثاني)*. تحقيق، م. (2022). *دراسة تأثير زاوية الهجوم على قوى الرفع والسحب للجنح المتماثل*. (بحث تخرج بكالوريوس) (كلية العلوم التقنية مصراته).

كامل، م. ت. (2021 طبعة 1990). *ميكانيكا الموائع*

Liu, X., Dang, Q., & Xi, G. (2008). Performance improvement of centrifugal fan by using CFD. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2(2),.

Omar, A. A. B. A. (2024). *Exploring Bernoulli Numbers and their Applications* (Master's thesis, Middle East Technical University (Turkey)).

Prodit. (2008, April 28). *Insight Equipment for Technical Training Fluid Mechanics Air Flow Bench: Operating Manual*. Satea.

Singh, O. P., Khilwani, R., Sreenivasulu, T., & Kannan, M. (2011). Parametric study of centrifugal fan performance: experiments and numerical simulation. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*.

Towhiduzzaman, M. (2016). Performance analysis of continuity equation and its applications. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 1(5).