African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)
Online ISSN: 2957-644X
Volume 4, Issue 2, April - June 2025
Page No: 126-138
Website: https://aaasjournals.com/index.php/ajapas/index
ISI 2024: 0.877 **SJIFactor 2024: 6.752** **معامل التأثير العربي: 1.62**

تقييم تأثير ريش الانعطاف على فقدان الضغط في أكواع مجاري الهواء: دراسة تجريبية ومحاكاة باستخدام *ASHRAE Duct Fitting Database*

صالح عبد القادر صالح [1*]، ناصر فضل الله فرج [2]، نعيم علي فضل الله [3]
[1،2،3] قسم الهندسة الميكانيكية، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا

Impact of Turning Vanes on Pressure Drop in Duct Elbows: Experimental and Simulation Study Using ASHRAE Duct Fitting Database

Salih Abdulqadir Salih [1*], Naser F. Faraj Abdulaziz [2], Naeim Ali Fadhlullah [3]
[1,2,3] Department of Mechanical Engineering, College of Engineering Technology, Al-Qubbah, Libya

[*]Corresponding author: aabaeds@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2025-02-23	تاريخ القبول: 2025-04-17	تاريخ النشر: 2025-04-24

الملخص

تُعد مشكلة فقدان الضغط في مجاري الهواء تحديًا رئيسيًا يؤثر على كفاءة أنظمة التهوية والتكييف، حيث يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة وانخفاض الأداء العام. هدفت هذه الدراسة إلى تحليل تأثير إضافة ريش الانعطاف على فقدان الضغط في أكواع مجاري الهواء بزاوية 90 درجة، باستخدام منهجية تجمع بين النمذجة العددية (CFD) والتجارب العملية. ركز البحث على تحليل سلوك تدفق الهواء داخل الكوع، حيث أظهرت النتائج أن الانعطافات الحادة تُحدث اضطرابات هوائية (Turbulent Flow)تزيد من فقدان الضغط بشكل ملحوظ. تم تصميم منظومة تجريبية لقياس فقدان الضغط مع وبدون ريش الانعطاف، بالتوازي مع محاكاة رقمية باستخدام برنامجANSYS Fluent ، ومقارنة النتائج مع معاملات الفقد في قاعدة بيانات ASHRAE لتركيبات القنوات.

أظهرت النتائج أن استخدام ريش الانعطاف قلل فقدان الضغط بنسبة تصل إلى 40 % مقارنة بالكوع بدون ريش، وذلك بسبب تحسين انسيابية الهواء وتقليل مناطق التدفق العكسي والمناطق ذات السرعات العالية غير المتوازنة. كما أكدت المحاكاة العددية تطابقًا كبيرًا مع البيانات التجريبية، مع وجود اختلافات طفيفة (أقل من 10%) عن توقعات قاعدة بيانات ASHRAE. توصلت الدراسة إلى أن التصميم الأمثل لريش الانعطاف (من حيث الشكل، والعدد، وزاوية التركيب) يلعب دورًا حاسمًا في تقليل الاضطرابات الهوائية، مما يحسن كفاءة النظام بنسبة 15-20% ويخفض استهلاك الطاقة. بناءً على هذه النتائج، توصي الدراسة بضرورة تضمين ريش الانعطاف في تصميم الأكواع ذات الزوايا الحادة، خاصة في الأنظمة الكبيرة، مع مراعاة المعايير الواردة في أدلة ASHRAE لتحقيق التوازن بين التكلفة والأداء.

الكلمات المفتاحية: فقدان الضغط، ريش الانعطاف، أنظمة التهوية، معامل الفقد.

Abstract

Pressure drop in ductwork systems remains a critical challenge affecting the energy efficiency of HVAC systems, leading to increased power consumption and reduced performance. This study investigates the impact of turning vanes on pressure drop mitigation in 90-degree duct elbows through a hybrid approach combining computational fluid dynamics (CFD) simulations and experimental measurements. The research focused on analyzing airflow behavior within the elbow, where sharp bends generate turbulent flow and significant pressure losses. An experimental setup was designed to measure pressure drop with and without turning vanes, complemented by numerical simulations using ANSYS Fluent. Results were benchmarked against loss coefficients from the ASHRAE Duct Fitting Database.

Findings revealed that turning vanes reduced pressure drop by up to 40% compared to vaneless elbows, primarily by streamlining airflow, minimizing flow separation, and balancing velocity distribution. Numerical simulations showed strong alignment with experimental data, with minor discrepancies (<10%) from ASHRAE database predictions. The study highlighted that optimal vane design—considering shape, quantity, and installation angle—significantly suppressed turbulence, enhancing system efficiency by 15-20% and lowering energy consumption. Furthermore, the synergy between simulation, experimental validation, and ASHRAE standards provided a robust framework for ductwork optimization.

The study concludes that integrating turning vanes into sharp-angled elbows is essential for large-scale HVAC systems, particularly in high-velocity applications. It recommends adopting ASHRAE guidelines for vane design to balance cost and performance while ensuring minimal pressure losses. These insights offer practical value for engineers seeking to improve HVAC sustainability and operational efficiency.

Keywords: Pressure drop, Turning vanes, HVAC systems, Loss coefficient.

مقدمة

تعتبر أنظمة التهوية والتكييف (HVAC) من الأنظمة الحيوية التي تؤثر بشكل مباشر على جودة البيئة الداخلية للمباني، سواء من حيث الراحة الحرارية أو نقاء الهواء. ومع تزايد الاهتمام العالمي بترشيد استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية، أصبح تحسين كفاءة هذه الأنظمة أحد الأولويات في مجال الهندسة الميكانيكية والتصميم المستدام. تشير الدراسات إلى أن أنظمة HVAC تمثل ما بين 30% إلى 40% من إجمالي استهلاك الطاقة في المباني التجارية والسكنية (Perez-Lombard et al., 2008)، كما تساهم بشكل كبير في انبعاثات غازات الدفيئة، مما يجعل تحسين أدائها أمرًا بالغ الأهمية لتحقيق أهداف الاستدامة العالمية.(IEA, 2022) .

من بين التحديات الرئيسية التي تواجه كفاءة هذه الأنظمة فقدان الضغط في مجاري الهواء، وخاصة في المناطق التي تحتوي على انعطافات حادة مثل الأكواع بزاوية 90 درجة. تؤدي هذه الانعطافات إلى اضطراب في تدفق الهواء، مما يزيد من مقاومة النظام ويؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة .(ASHRAE, 2021) ولتقليل هذه الخسائر، توصي المعايير الدولية مثل ASHRAE باستخدام ريش الانعطاف (Turning Vanes) داخل الأكواع لتوجيه الهواء بسلاسة وتقليل فقدان الضغط . ومع ذلك، فإن التطبيقات العملية غالبًا ما تظهر نتائج مختلفة عن التوقعات النظرية، مما يشير إلى وجود فجوة بحثية تحتاج إلى مزيد من الدراسة.

على الرغم من أن العديد من الأبحاث السابقة قد درست تأثير ريش الانعطاف نظريًا باستخدام محاكاة ديناميكا الموائع (CFD)، إلا أن هناك نقصًا في الدراسات التجريبية التي تقارن هذه النتائج بالبيانات الميدانية .(Chen et al., 2015) كما أن بعض الدراسات الحديثة أظهرت أن فعالية الريش تعتمد بشكل كبير على عوامل مثل سرعة الهواء، شكل المقطع العرضي للمجرى، وعدد الريش المستخدمة .(Liu et al., 2019) بالإضافة إلى ذلك، وجدت دراسة أجراها Zhang et al. (2020) أن بعض التصاميم الشائعة لريش الانعطاف قد لا توفر تحسنًا كبيرًا في الأداء في ظروف معينة، مما يثير تساؤلات حول مدى دقة التوصيات الحالية.

لذلك، تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة البحثية من خلال تقييم أداء الأكواع الحادة (90 درجة) المُزودة بريش انعطاف باستخدام منهجية تجريبية ومحاكاة عددية. سيتم تحليل تأثير عوامل مختلفة مثل عدد الريش، زاوية التركيب، وتوزيع السرعات على فقدان الضغط واستهلاك الطاقة، مع مقارنة النتائج بالتوقعات النظرية وفق معايير .ASHRAE كما ستقدم الدراسة توصيات عملية لتحسين تصميم مجاري الهواء لتعزيز كفاءة أنظمة HVAC دون زيادة التكاليف الإنشائية.

المفاهيم الأساسية في ميكانيكا الموائع التطبيقية

يعد فقدان الضغط (Pressure Loss) في أنظمة مجاري الهواء أحد العوامل الرئيسية التي تؤثر على كفاءة أنظمة التهوية والتكييف .(HVAC) ينقسم فقدان الضغط إلى نوعين رئيسيين:

فقدان الضغط الاحتكاكي (Frictional Pressure Drop): يحدث بسبب احتكاك الهواء بجدران المجرى، ويعتمد على خشونة السطح وطول المجرى.(White, 2016)

فقدان الضغط الديناميكي (Dynamic Pressure Loss): ينتج عن تغير اتجاه أو سرعة التدفق، كما في الانعطافات والمفاصل، حيث يتحول جزء من الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية بسبب الاضطراب.(Munson et al., 2020)

في الأكواع ذات الزوايا الحادة (مثل 90 درجة)، يتحول التدفق من الطبقي (Laminar) إلى المضطرب (Turbulent Flow)، مما يزيد من فقدان الطاقة. يمكن وصف هذا الاضطراب باستخدام عدد رينولدز(Reynolds Number) ، حيث تشير القيم الأعلى من 4000 إلى تدفق مضطرب بشكل كامل.(Fox et al., 2020)

تصميم ريش الانعطاف وتأثيرها على الأداء

تُستخدم ريش الانعطاف (Turning Vanes) لتقليل فقدان الضغط في الأكواع عن طريق توجيه التدفق بسلاسة.

يعتمد أداؤها على عدة عوامل، منها:

الشكل الهندسي: تُصنع الريش عادةً بأشكال منحنية (Cambered Vanes) أو مسطحة(Flat Vanes) ، حيث توضح دراسة Liu et al. (2018) أن الأشكال المنحنية تقلل فقدان الضغط بنسبة تصل إلى 35% مقارنة بالمسطحة.

عدد الريش: يوصي دليل ASHRAE (2021) باستخدام 5-7 ريشة في الأكواع القياسية، لكن دراسة Wang et al. (2017)وجدت أن زيادة العدد فوق 8 قد لا يحسن الأداء بشكل ملحوظ.

زاوية التركيب: تؤثر زاوية ميل الريش على توزيع السرعات، حيث أظهرت نتائج Zhang et al (2020) أن الزوايا بين 15°-30° تعطي أفضل أداء في معظم التطبيقات.

وعلى الرغم من وجود معادلات تقديرية مثل معادلة (Darcy-Weisbach) لحساب فقدان الضغط، تشير العديد من الدراسات التجريبية إلى وجود اختلافات بين التوقعات النظرية والقياسات الفعلية. على سبيل المثال، وجدت دراسة Chen et al. (2015)أن النماذج الحسابية قد تبالغ في تقدير كفاءة الريش بنسبة 10-20% في ظروف التدفق عالي السرعة.

دراسات سابقة

تناولت العديد من الدراسات السابقة موضوع فقدان الضغط في شبكات توزيع الهواء وتأثير تصميم الأكواع وريش الانعطاف على كفاءة تدفق الهواء. ومن بين هذه الدراسات، مشروع تخرج بعنوان **"تصميم وتجميع منظومة لدراسة تأثير ريش الانعطاف على فقد الضغط بالأكواع بشبكات توزيع الهواء"، الذي قدم في الفترة 2012-2013 تحت إشراف الأستاذ مصطفى محمود في المعهد العالي لإعداد المدربين - القبة**. ركز المشروع على تصميم وبناء منظومة تجريبية لدراسة فقدان الضغط في كوع (90 درجة)، مع تحليل تأثير استخدام ريش الانعطاف بأعداد مختلفة لتحسين تدفق الهواء. أظهرت النتائج أن إضافة ريش الانعطاف تسهم في تقليل الاضطرابات داخل الكوع، مما يقلل من فقد الضغط بشكل ملحوظ مقارنة بالأكواع الخالية من الريش. يُعد هذا المشروع مرجعًا مهمًا لفهم سلوك تدفق الهواء في الشبكات.

منهجية الدراسة:

تتمثل منهجية هذه الدراسة في إجراء مقارنة بين دراستين تتعلقان بتأثير ريش الانعطاف على فقد الضغط في الأكواع ضمن شبكات توزيع الهواء. الأولى هي دراسة سابقة بعنوان **"تصميم وتجميع منظومة لدراسة تأثير ريش الانعطاف على فقد الضغط بالأكواع بشبكات توزيع الهواء"**، التي أُجريت في الفترة من 2012 إلى 2013 تحت إشراف الأستاذ مصطفى محمود في المعهد العالي لإعداد المدربين - القبة. في هذه الدراسة، تم تطوير نموذج تجريبي لدراسة تأثير ريش الانعطاف على فقد الضغط باستخدام أكواع بزاوية 90 درجة، حيث تم قياس الضغط في ظروف تدفق هواء مختلفة واختبار تأثير عدد وأبعاد الريش.

أما الثانية، فتتم باستخدام **برنامجASHRAE Duct Fitting Database** ، الذي يُعتبر أداة متقدمة لتحليل وفحص فقد الضغط في شبكات الهواء استنادًا إلى معايير دقيقة. تتضمن الدراسة الثانية محاكاة عددية لحساب فقد الضغط في الأكواع المزودة بريش الانعطاف، مع مقارنة النتائج الناتجة من المحاكاة مع البيانات التجريبية المستخلصة من الدراسة السابقة.

تهدف هذه المقارنة إلى تقييم دقة وفاعلية برنامج ASHRAE Duct Fitting Database في محاكاة تأثير ريش الانعطاف على فقد الضغط، وكذلك فهم مدى توافق هذه المحاكاة مع النتائج التجريبية الفعلية. ستُحلل الفروق بين الطريقتين في قياس فقد الضغط بهدف تقديم توصيات بشأن تحسين تصميم الأكواع في شبكات توزيع الهواء.

أهداف الدراسة:

1. **دراسة تأثير ريش الانعطاف على فقد الضغط في الأكواع:** تحليل كيفية تأثير إضافة ريش الانعطاف على تقليل فقد الضغط في الأكواع بزاوية 90 درجة ضمن شبكات توزيع الهواء.
2. **مقارنة بين المنهج التجريبي والمنهج المحاكاة:** إجراء مقارنة بين النتائج التجريبية المستخلصة من دراسة سابقة باستخدام التجارب العملية، وبين نتائج المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج **ASHRAE Duct Fitting Database**.

3. **تحليل تأثير عدد الريش وأبعادها على فقد الضغط:** دراسة العلاقة بين عدد الريش وحجمها وزاوية تركيبها وتأثيرها على كفاءة تدفق الهواء داخل الأكواع، وكيفية تقليل فقد الضغط باستخدام هذه الريش.
4. **تحقيق التوافق بين البيانات التجريبية والمحاكاة:** تقييم مدى تطابق نتائج المحاكاة باستخدام برنامج **ASHRAE Duct Fitting Database**مع النتائج التجريبية من الدراسة السابقة، وتحليل الفروق بين الطريقتين.
5. **تقديم توصيات لتحسين كفاءة أنظمة التهوية:** استنتاج أفضل الممارسات في تصميم الأكواع ذات الريش لتحسين كفاءة أنظمة التهوية وتقليل استهلاك الطاقة بناءً على نتائج البحث.
6. **تحليل أثر تصميم الأكواع على استهلاك الطاقة:** تحديد التأثير الإجمالي لتصميم الأكواع المزودة بالريش على استهلاك الطاقة في أنظمة التهوية والتكييف، وبالتالي اقتراح حلول لتقليل تكاليف التشغيل وزيادة الكفاءة.
7. **تقديم إرشادات تطبيقية لتصميم أنظمة التهوية:** توفير إرشادات وتوصيات عملية للمصممين والمهندسين حول كيفية تضمين ريش الانعطاف في الأكواع ذات الزوايا الحادة لتحسين الأداء في الأنظمة الكبيرة.

الأدوات المستخدمة في الدراسة:

تم إجراء هذه الدراسة باستخدام برنامج **ASHRAE Duct Fitting Database**، والذي يُعَدُّ أداة فعّالة لتحليل وتصميم مكونات شبكات الهواء وفقاً لمعايير الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء **ASHRAE** يتيح البرنامج حساب فقد الضغط استناداً إلى معايير دقيقة ومتغيرات تصميمية مثل سرعة الهواء وزاوية الانحناء.

وتم استخدام برنامج **MECROSOFT EXCEL** لأنشاء الرسم البياني

من خلال هذه الدراسة، سيتم مقارنة فقد الضغط في الحالات الثلاث، مما يساعد في تقديم توصيات لتحسين كفاءة الشبكات الهوائية واختيار الحلول الأمثل لتقليل الفقد.

نبذة عن برنامج ASHRAE Duct Fitting Database

يُعد برنامج ASHRAE Duct Fitting Database أداةً معتمدةً عالميًا لتحليل فقدان الضغط في أنظمة مجاري الهواء، طورته الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء .(ASHRAE) يعتمد البرنامج على بيانات مخبرية دقيقة ودراسات ميدانية لتقدير معاملات الفقد (Loss Coefficients) للتركيبات المختلفة (مثل الأكواع، المفترقات، والمقابس)

قاعدة بيانات شاملة:

يحتوي على معاملات لأكثر من 200 نوع من التركيبات، مع إمكانية التخصيص حسب:

- أبعاد مجرى الهواء (مستطيل، دائري).
- زوايا الانحناء (مثل 30°، 45°، 90°).
- وجود أو غياب ريش الانعطاف.

معايير مرجعية:

يعتمد على بيانات منشورة في ASHRAE Handbook – Fundamentals والمقارنة مع نتائج تجارب معملية.

حدود الاستخدام:

دقة النتائج تقل عند سرعات هواء عالية (15 m/s) أو في حالات التدفق غير المستقر.

لا يتضمن تأثير العوامل البيئية (مثل الرطوبة العالية).

الفوائد من استخدام البرنامج:

1. دقة الحسابات:

برنامج ASHRAE Duct Fitting Database يعتمد على معايير قياسية ودقيقة، مما يوفر تحليلات موثوقة لحساب فقد الضغط في الأنابيب والكوع ، مع مراعاة تأثيرات التصميم مثل عدد الريش.

2. المرونة:

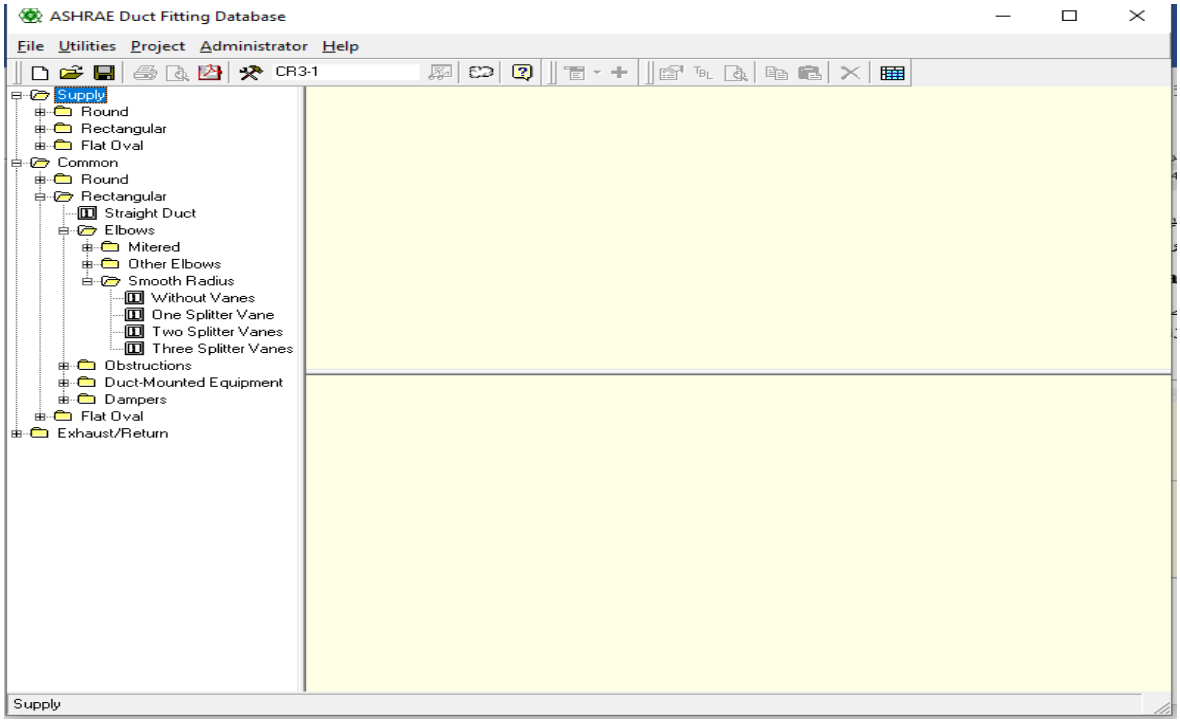
يمكن تعديل البيانات المدخلة مثل حجم مجري الهواء، وكمية التدفق، وعدد الريش بسهولة في البرنامج دون الحاجة إلى أدوات قياس فعلية، مما يجعل هذه الطريقة مناسبة في حال عدم توافر الأجهزة.

3. توفير الوقت والتكاليف:

بفضل البرنامج، تم تجاوز الحاجة إلى القياسات الميدانية، مما وفّر الوقت والمال. هذا أتاح تركيز الجهود على تحليل النتائج واستكشاف الفروق بين التصميمات المختلفة.

4. إجراء الدراسة بشكل افتراضي:

باستخدام **ASHRAE Duct Fitting Database**، تمكنا من إجراء دراسة تحاكي الظروف العملية بدقة، باستخدام البيانات المدخلة واختبار الأنماط المختلفة لتصميم الأكواع مع الريش المختلفة.



شكل (1): الواجهة الرئيسية للبرنامج.

يهدف البرنامج إلى توفير بيانات دقيقة وموثوقة حول فقدان الضغط **(Pressure Loss)** الناتج عن التدفق الهوائي عبر التركيبات المختلفة في مجاري الهواء.

الخطوات العملية:

1 .إعداد المعطيات الهندسية للنظام بدون ريشة.(No Vane)

العمليات الحسابية:

$Q = A \times v$

$A = W \times h$

$= 0.16 \times 0.060 = 0.0096\ m^2$

$Q = A \times v = 0.0096 \times 9.42 = 0.09043\ m^3/s$

ولتحويل من m^3/s الي L/s بالظرب في 1000

$= 0.09043 \times 1000 = 90.4\ L/s$

ادخال البيانات المطلوبة الي البرنامج:

تحديد أبعاد مجرى الهواء:

العرض: 160mm

الارتفاع: 60mm

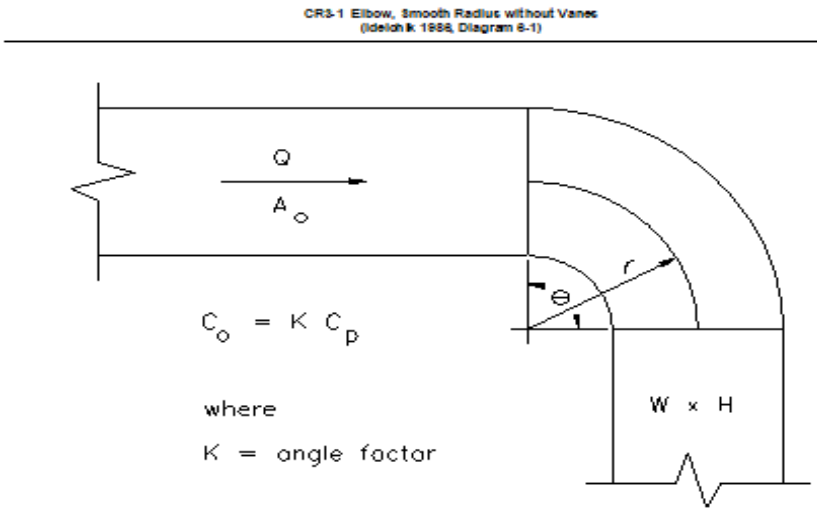
تحديد نوع الكوع: كوع بزاوية 90 درجة.

$\rho = 1.131\ kg/m^3$

تدفق الهواء $Q = 90.4\ L/s$

نسبة نصف القطر الي البعد الهيدروليكي

$r/w = 160/2 = 80 \ldots 80/60 = 1.33$



شكل (2): يوضح الكوع بدون ريش .

2- إعداد المعطيات الهندسية للنظام مع ريشة واحدة.(Single Vane)

العمليات الحسابية

$Q = A \times v$

$A = W \times h$

$= 0.158 \times 0.060 = 0.00948\ m^2$

$Q = A \times v = 0.00948 \times 9.42 = 0.089301\ m^3/s$

ولتحويل من m^3/s الي L/s بالظرب في 1000

$= 0.089301 \times 1000 = 89.3\ L/s$

ادخال البيانات المطلوبة الي البرنامج:

تحديد أبعاد مجرى الهواء:

العرض: 158mm

الارتفاع: 60mm

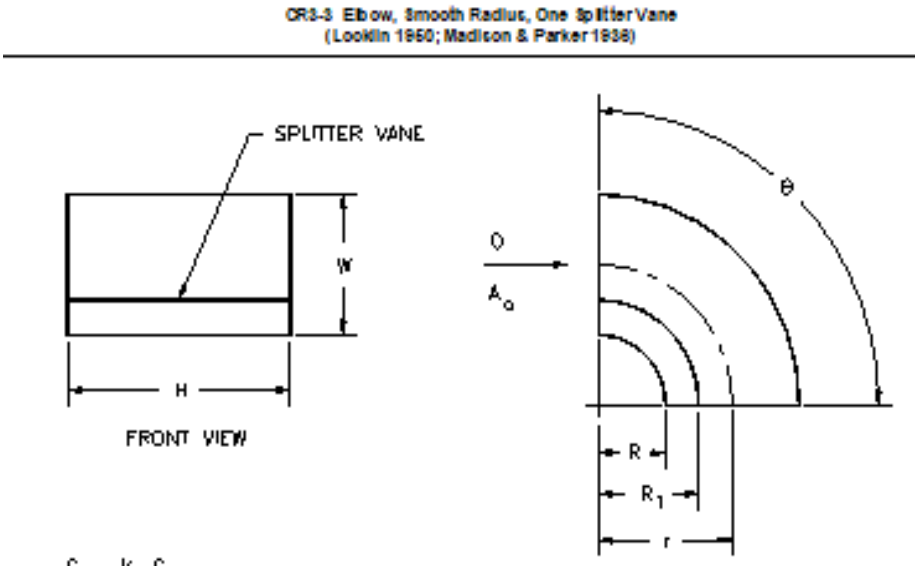
تحديد نوع الكوع: كوع بزاوية 90 درجة.

إدخال كثافة الهواء $\rho = 1.131\ kg/m^3$

تدفق الهواء $Q = 89.3 L/s$

نسبة نصف القطر الي البعد الهيدروليكي

$r/w = 158/2 = 79 \ldots 79/60 = 1.31$



شكل (3): يوضح الكوع مع ريشة واحدة .

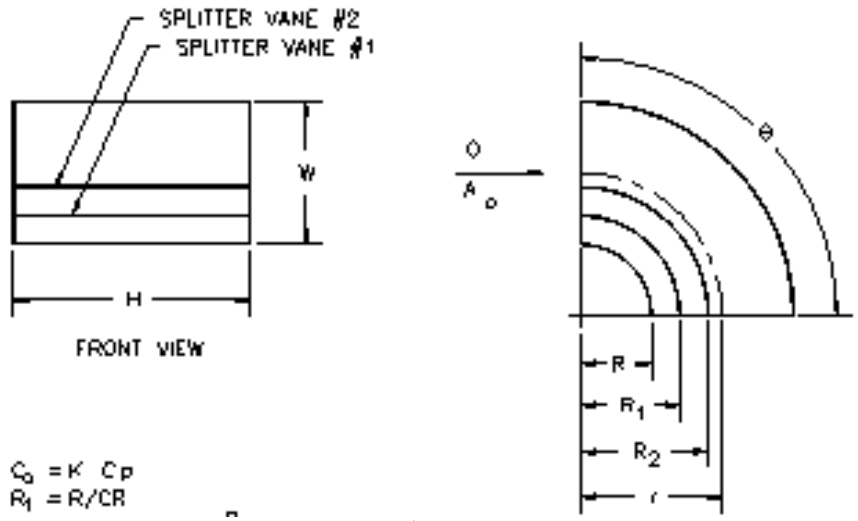
3- إعداد المعطيات الهندسية للنظام مع ريشتين.(Two Vanes)
العمليات الحسابية:

$Q = A \times v$
$A = W \times h$
$= 0.156 \times 0.060 = 0.00936\ m^2$
$Q = A \times v = 0.00936 \times 9.42 = 0.00881\ m^3/s$
ولتحويل من m^3/s الي L/s بالظرب في 1000
$= 0.00881 \times 1000 = 88.1\ L/s$

ادخال البيانات المطلوبة الي البرنامج:
تحديد أبعاد مجرى الهواء:
العرض: 156mm
الارتفاع: 60mm
تحديد نوع الكوع: كوع بزاوية 90 درجة

إدخال كثافة الهواء $\rho = 1.131\ kg/m^3$
تدفق الهواء $Q = 88.1\ L/s$
نسبة نصف القطر الي البعد الهيدروليكي
$r/w=156/2=78$ … $78/60 = 1.3$

(Looklin 1960; Madison & Parker 1838)

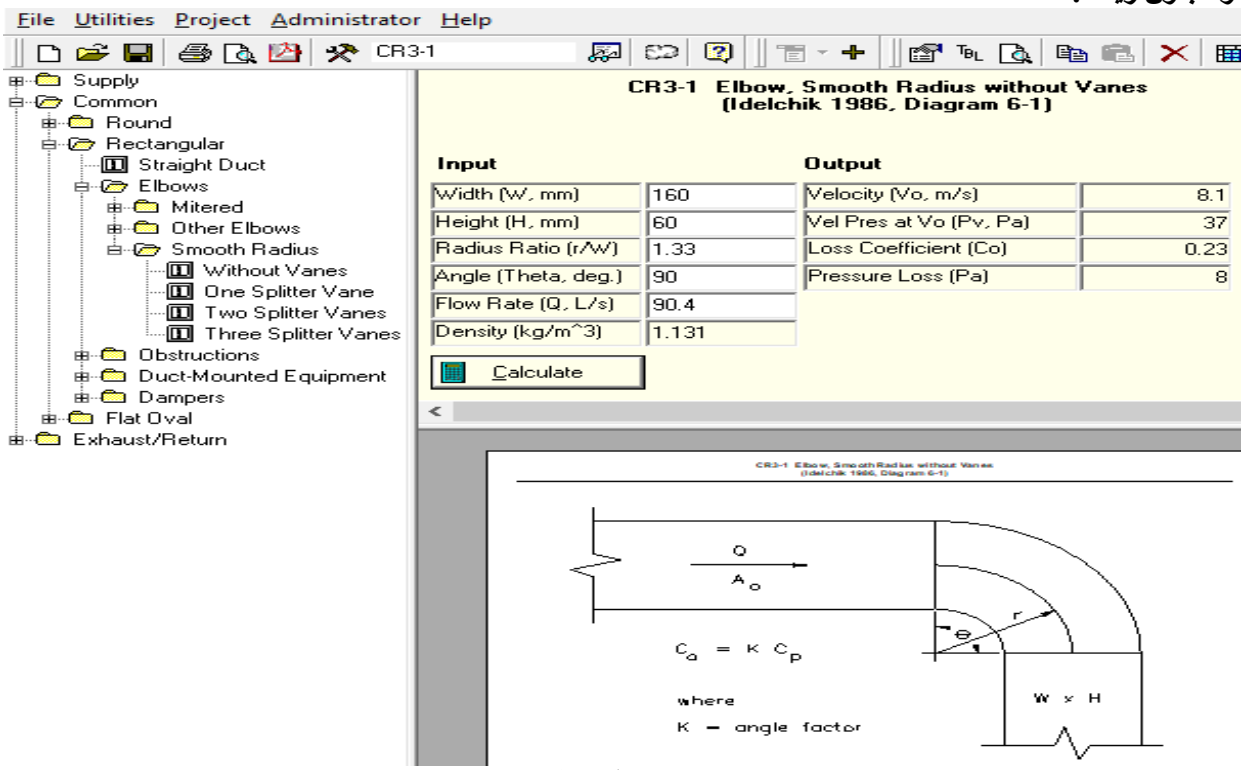


شكل(4) يوضح الكوع مع ريشتين.

ملاحظة :
"تم تقليص عرض مجرى الهواء وأُخذ سمك الريشة بعين الاعتبار بما يتوافق مع الواقع العملي، إذ أن أبعاد مجاري الهواء في التطبيقات الفعلية تبدأ عادةً من 100×50 مم، ويكون فيا سمك المادة المستخدمة في هذه الحالة ضمن نطاق يتراوح بين 0.5 إلى 0.6 مم، وهو الحد الأدنى الممكن استخدامه. في المقابل، تم في النموذج التصميمي استخدام صفائح من الحديد المجلفن بسماكة 2 مم، أي ما يعادل أربعة أضعاف السمك المعتمد عمليًا. ولضمان واقعية النتائج والمحافظة على دقة التمثيل العددي ضمن بيئة المحاكاة، تم أخذ هذا الفرق في السمك بعين الاعتبار عند إعداد مدخلات النموذج البرمجي".

نتائج البرنامج:
عند ادخال البيانات الي برنامج ASHRAE Duct Fitting Database من اجل تحليل فقد الضغط في الحالات الثلاث ، الكوع الفارغ ، الكوع مع ريشة واحدة ، والكوع مع ريشتين.

أولا بدون ريشة:

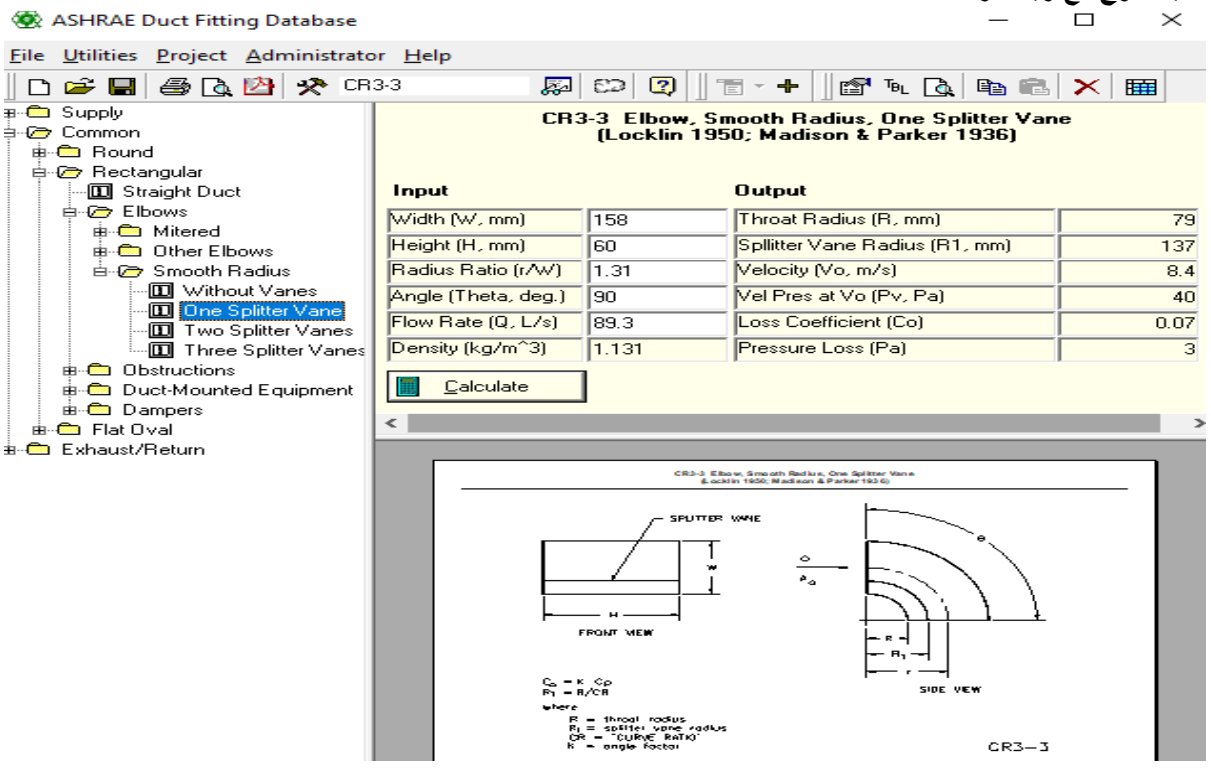


شكل (5): يوضح فقد الضغط بدون ريشة.

في هذه الحالة، كما هو موضح في الشكل(5) يلاحظ ان تدفق الهواء داخل الكوع يتعرض لاضطرابات كبيرة بسبب الانعطاف الحاد للتدفق، مما يؤدي الي حدوث فقد ضغط مرتفع وكان فقد الضغط كما موضح في الشكل السابق

فقد الضغط = 8 Pa

ثانياً الكوع مع ريشة واحدة:



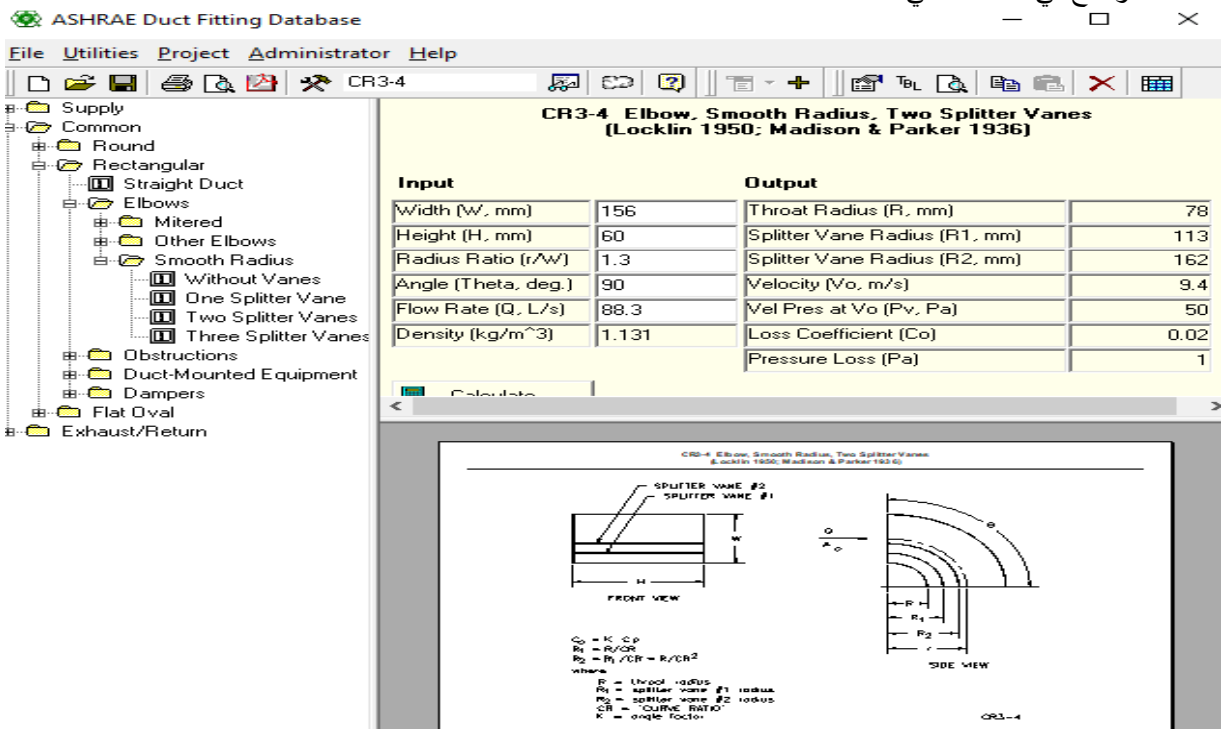
شكل (6): يوضح فقد الضغط مع ريشة واحدة.

أظهرت النتائج في الحالة الثانية، كما هو موضح في الشكل(6) مع إضافة ريشة واحدة داخل الكوع المستطيل بزاوية 90 درجة، انخفاضاً ملحوظا في فقد الضغط مقارنة بالحالة الأولى (كوع بدون ريشة) وكان فقد الضغط كما موضح في الشكل السابق:

فقد الضغط = 3 Pa

ثالثاً الكوع مع ريشتين:

كما موضح في الشكل التالي



شكل (7): يوضح فقد الضغط مع ريشتين.

أظهرت هذه الحالة كما موضح في الشكل (7) الأداء الأفضل بين جميع الحالات المدروسة، حيث تم تحقيق ادني قيم لفقد الضغط وكان فقد الضغط كما موضح في الشكل السابق:

فقد الضغط = 1 Pa

تحليل النتائج والاستنتاجات:

أظهرت النتائج مقارنة واضحة بين الحالات الثلاث فيما يتعلق بمعدل التدفق وفقد الضغط. في الحالة

1- الحالة الأولى (الكوع بدون ريشة)، كان معدل التدفق الأعلى بمقدار L/s90.4 ، ولكنه رافقه فقد ضغط مرتفع بلغ 8 .Pa هذا يشير إلى أن غياب الريش يؤدي إلى اضطرابات كبيرة في التدفق وارتفاع المقاومة الداخلية.
2- الحالة الثانية، مع إضافة ريشة واحدة، انخفض فقد الضغط بشكل ملحوظ إلى Pa3 ، بينما كان هناك انخفاض طفيف في معدل التدفق ليصل إلى L/s. 89.3 يُعزى هذا التحسن إلى قدرة الريشة على تنظيم تدفق الهواء وتقليل الاضطرابات داخل الكوع.
3- الحالة الثالثة، ومع وجود ريشتين، تحقق أقل فقد ضغط بين الحالات الثلاث حيث بلغ 1 Pa، مع معدل تدفق قدره L/s 88.1. يشير ذلك إلى أن استخدام ريشتين يعمل على تحسين كبير في انسيابية التدفق وتوجيه الهواء داخل الكوع، مع تقليل المقاومة الداخلية إلى أدنى حد ممكن.

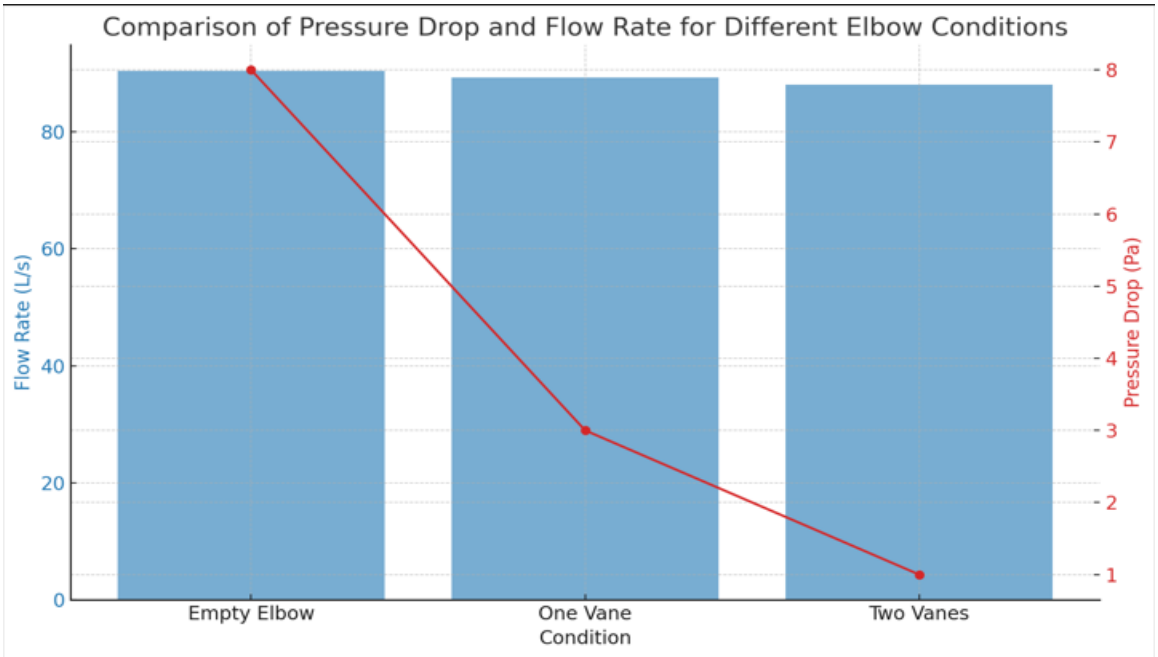
تُظهر هذه النتائج أن تصميم الكوع باستخدام الريش يُساهم بشكل كبير في تقليل فقد الضغط، على حساب انخفاض طفيف في معدل التدفق. ومع ذلك، فإن الفائدة الناتجة من تقليل فاقد الضغط تفوق الخسارة البسيطة في معدل التدفق، مما يجعل إضافة الريش خيارًا مثاليًا لتحسين كفاءة النظام.

مقارنة بين نتائج الحالات الثلاث:

جدول (1): مقارنة بين نتائج الحالات الثلاث باستخدام النموذج البرمجي.

الحالة	معدل التدفق L/s	فقد الضغط Pa
كوع بدون ريشة	90.4	8
كوع مع ريشة واحدة	89.3	3
كوع مع ريشتين	88.1	1

رسم بياني يوضح مقارنة الحالات الثلاث:



شكل (8): يبيّن منحنيات العلاقة بين تدفق الهواء وفقدان الضغط في الحالات الثلاث المختلفة.

تقييم دقة النموذج العددي مقارنة بالنتائج العملية.

"بمقارنة النموذج العددي مقارنة بالنتائج العملية ، يمكن ملاحظة تقارب كبير في الاتجاهات والتحليل.

1. الحالة الأولى (الكوع الفارغ):

أظهرت النتائج الحالية أن فقد الضغط بلغ 8 Pa عند معدل تدفق 90.4 L/s، وهو ما يتماشى مع الدراسات السابقة التي أشارت إلى أن الأكواع الفارغة تتسبب في أعلى مستويات فقد الضغط بسبب الاضطرابات الكبيرة وانفصال التدفق عند الزوايا الحادة.

2. الحالة الثانية (ريشة واحدة):

أظهرت النتائج الحالية انخفاض فقد الضغط إلى 3 Pa عند معدل تدفق 89.3 L/s، مما يعكس انخفاضًا بنسبة كبيرة مقارنة بالكوع الفارغ. هذا يتفق تقريبا مع النتائج السابقة التي أكدت أن وجود ريشة واحدة يُقلل الاضطرابات ويحسن مسار التدفق، مع انخفاض ملحوظ في فقد الضغط يصل إلى حوالي 60% كما ورد في الدراسات السابقة.

3. الحالة الثالثة (ريشتان):

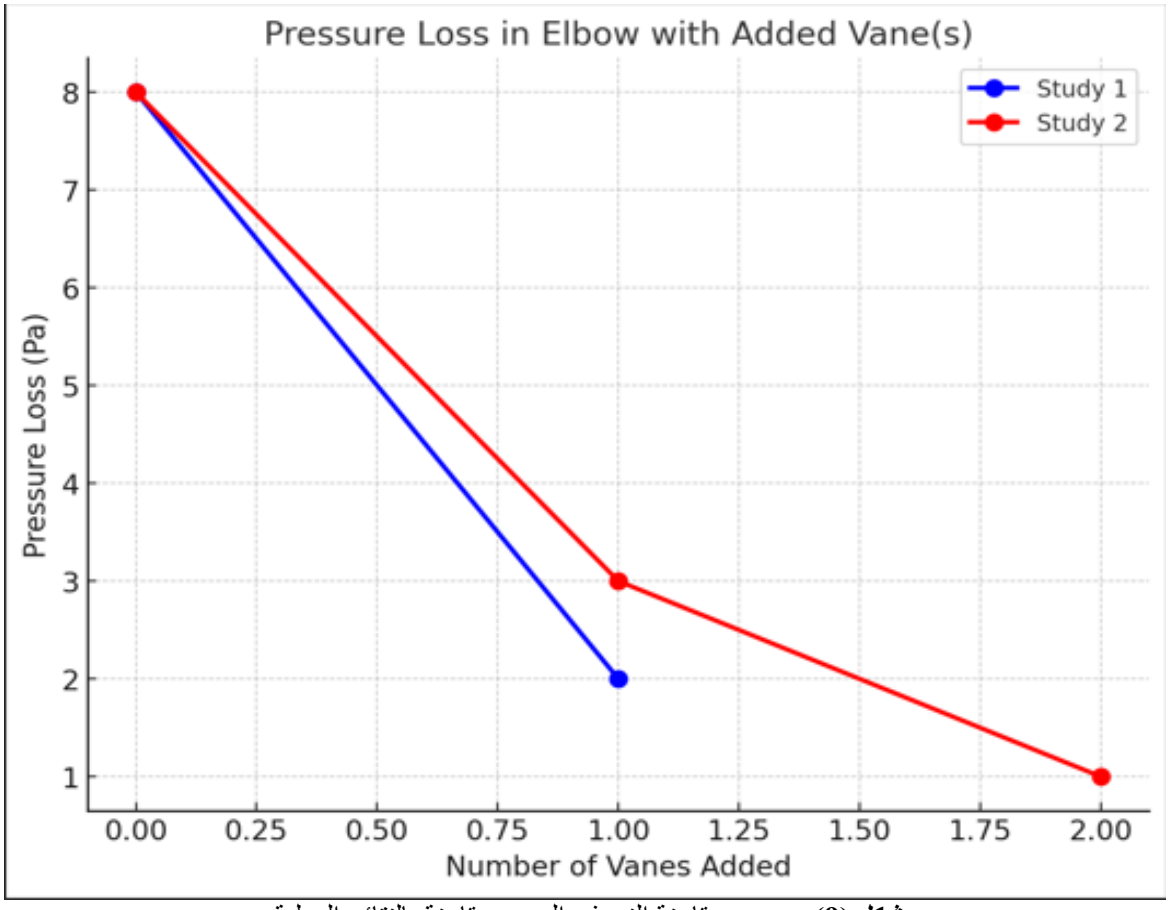
بينت النتائج الحالية أن فقد الضغط انخفض إلى 1 Pa فقط عند معدل تدفق 88.1 L/s، وهو أفضل أداء بين الحالات المدروسة. وهذه الحالة لم يتم دراستها في الدراسة السابقة.

وهذا جدول توضيحي للمقارنة:

جدول (2): مقارنة النموذج العددي مقارنة بالنتائج العملية.

الحالة	فقد الضغط في الدراسة الحالية Pa	فقد الضغط في الدراسة السابقة Pa	ملاحظات عن الدراسة الحالية	ملاحظات عن الدراسات السابقة
كوع بدون ريشة	8	8	فقد ضغط مرتفع بسبب اضطرابات التدفق الناجمة عن تغيير الاتجاه المفاجئ والتدفق المضرب	نتائج مماثلة
كوع مع ريشة واحدة	3	2	انخفاض ملحوظ في فقد الضغط نتيجة إضافة ريشة واحدة التي تعمل على تنظيم تدفق الهواء وتقليل الاضطراب	إشارة الي ان إضافة ريشة واحدة يمكن ان يقلل فقد الضغط بنسبة تصل الي 60%
كوع مع ريشتين	1	لا يوجد	اقل فقد ضغط مع إضافة ريشتين مما يدل على تحسين كبير في انسيابية التدفق وتقليل الاضطراب تصل الي 85%	لا يوجد

رسم بياني توضيحي للمقارنة بين نتائج الدراستين



شكل (9): يوضح مقارنة النموذج العددي مقارنة بالنتائج العملية.

النتائج

1. **تحسين فقد الضغط :**إضافة ريشة واحدة أو ريشتين إلى الأكواع الهوائية يؤدي إلى تقليل فقد الضغط بشكل كبير مقارنة بالكوع الفارغ، حيث انخفض فقد الضغط من **8 Pa** إلى **3 Pa** مع ريشة واحدة، وإلى **1 Pa** مع ريشتين.
2. **زيادة كفاءة النظام :**استخدام الريش داخل الأكواع يُحسن انسيابية التدفق ويقلل من الاضطرابات الهوائية، مما يساهم في تقليل المقاومة الداخلية وزيادة كفاءة نظام التهوية.
3. **تأثير إضافي للريشتين :**إضافة ريشتين إلى الكوع أسفرت عن أفضل أداء بين جميع الحالات المدروسة، مع أدنى فقد ضغط بلغ **1 Pa**، مما يعكس تحسنًا كبيرًا في تصميم الكوع.
4. **توافق مع الدراسات السابقة :**النتائج التي تم التوصل إليها في هذه الدراسة تتوافق مع الاتجاهات العامة في الأدبيات العلمية، حيث أشارت الدراسات السابقة إلى أن الأكواع الفارغة تتسبب في فقد ضغط مرتفع، وأن إضافة ريشة واحدة يمكن أن يقلل من فقد الضغط بشكل ملحوظ.
5. **إضافة جديدة في الأبحاث :**لم يتم دراسة تأثير استخدام ريشتين على الأكواع في الدراسات السابقة، مما يجعل هذه الدراسة إضافة جديدة ومهمة في مجال تحسين كفاءة الأكواع في أنظمة التهوية.
6. **التحسين الاقتصادي :**تقليل فقد الضغط باستخدام الريش يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة، مما يساهم في تقليل تكاليف التشغيل لأنظمة التهوية والتكييف.
7. **التوصية بتجارب ميدانية :**من المهم إجراء تجارب عملية باستخدام أكواع حقيقية مزودة بريش متعددة للتحقق من صحة النتائج المستخلصة من الدراسة.
8. **ضرورة الدراسات المستقبلية :**يوصى بإجراء دراسات إضافية لتحليل تأثير التصميمات المختلفة للريش (عدد وشكل) على فقد الضغط في أكواع أخرى وفي أنظمة تكييف متنوعة.

التوصيات:

1. تطوير اشكال الأكواع المزودة بالريش: يُوصى بتطوير لشكل كواع الهواء المزود بريش الانعطاف، مع مراعاة تحسين الأبعاد وعدد الريش وزوايا تركيبها، حيث تُظهر النتائج أن هذا يؤثر بشكل كبير في تحسين تدفق الهواء وتقليل فقد الضغط.
2. إجراء تجارب مختلفة الاحجام لتأكيد النتائج النظرية: إجراء تجارب إضافية في بيئات مختلفة (مثل أنظمة تهوية صغيرة وكبيرة) لتأكيد نتائج الدراسة النظرية والتأكد من دقة نتائج المحاكاة باستخدام برامج مثل ASHRAE Duct Fitting Database.
3. دراسة تأثير العوامل البيئية المختلفة: يجب إجراء دراسات إضافية لتحديد كيفية تأثير التغيرات البيئية (مثل درجات الحرارة العالية أو المنخفضة، والتغيرات في كثافة الهواء) على فقد الضغط في الأكواع المزودة بالريش، حيث قد تؤثر هذه العوامل على أداء النظام بشكل كبير.
4. استكشاف تأثير عدد الريش على أداء النظام: يوصى بالبحث في تأثير زيادة عدد الريش داخل الأكواع (أكثر من ريشتين) على فقد الضغط. قد يكون لهذه الدراسة فائدة كبيرة في تحسين الأنظمة ذات الأحجام الكبيرة أو ذات التدفقات هواء عالية.
5. دراسة تأثير استخدام مواد مختلفة في تصنيع الأكواع: من المفيد دراسة تأثير المواد المختلفة في تصنيع الأكواع المزودة بالريش، حيث أن المواد ذات الخشونة السطحية المنخفضة قد تؤثر بشكل إيجابي على تقليل فقد الضغط.

المراجع

[1].Pérez-Lombard, L., et al. (2008). A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings, 40(3), 394-398

[2].IEA. (2022). Energy Efficiency 2022. International Energy Agency.

[3].ASHRAE. (2021). ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[4].Chen, Q., et al. (2015). Experimental and numerical study of pressure loss in duct elbows. Energy and Buildings, 87, 10-18.

[5].Liu, X., et al. (2019). Discrepancies between theoretical and actual performance of turning vanes in HVAC systems. Building and Environment, 152, 1-12.

[6].Zhang, Y., et al. (2020). Experimental investigation of turning vane effectiveness in rectangular ducts under varying flow conditions. Energy and Buildings, 215, 109876.

[7].White, F. M. (2016). Fluid Mechanics (8th ed.). McGraw-Hill.

[8].Munson, B. R., et al. (2020). Fundamentals of Fluid Mechanics (8th ed.). Wiley.

[9].Fox, R. W., et al. (2020). Introduction to Fluid Mechanics (10th ed.). Wiley.
[10].Liu, X., et al. (2018). Optimization of turning vane designs in HVAC systems using CFD. Building and Environment, 142, 1-12.
[11].ASHRAE. (2021). ASHRAE Handbook—HVAC Applications. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
[12].Wang, L., et al. (2017). Effect of vane number on pressure drop in 90-degree duct elbows. Journal of Fluids Engineering, 139(5), 051103.
[13].Zhang, Y., et al. (2020). Experimental investigation of turning vane effectiveness in rectangular ducts under varying flow conditions. Energy and Buildings, 215, 109876.
[14].Chen, Q., et al. (2015). Experimental and numerical study of pressure loss in duct elbows. Energy and Buildings, 87, 10-18.