نوقشت هذه الرسالة

دراسة وتصميم قناة هوائية تحت صوتية من النوع المغلق طراز جوتنجن وبحث إمكانية تصنيعها محلياً

وأجيزت يوم الثلاثاء الواقع في 2013/2/12 من قبل السادة أعضاء لجنة الحكم التالية أسماؤهم:

الاسم	الصفة	التوقيع
أ.د.م. انطانيوس عقل	الأستاذ في قسم الميكانيك العام	عضواً مشرفاً
د.م. حمزة مكارم	المدرس في قسم الميكانيك العام	عضواً
د.م. يحيى كشكول	المدرس في قسم الميكانيك العام	عضواً

تم إجراء التعديلات المطلوبة، وأصبحت الرسالة صالحة لمنح درجة الماجستير في قسم الميكانيك العام اختصاص ميكانيك موائع.

جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الميكانيك العام

دراسة وتصميم قناة هوائية تحت صوتية من النوع المغلق طراز جوتنجن وبحث إمكانية تصنيعها محلياً

بحث أعد لنيل درجة الماجستير في هندسة الميكانيك العام
اختصاص ميكانيك موائع

إعداد المهندس
أحمد خالد رستم آغا

المشرف العلمي
الأستاذ الدكتور المهندس
انطانيوس عقل

العام الدراسي
2012–2013

تصريح

أصرح بأن البحث "دراسة وتصميم قناة هوائية تحت صوتية من النوع المغلق طراز جوتنجن وبحث إمكانية تصميمها محلياً" لم يسبق أن قُبل للحصول على شهادة ولا هو مقدم حالياً للحصول على شهادة أخرى.

وقد تم الاستناد لجميع المراجع العلمية المذكورة لإعداد المادة العلمية الواردة فيه وبتوجيه من المشرف العلمي أ.د.م انطانيوس عقل.

م. أحمد رستم آغا

كلـــــمة شـــــكر

لا يسعني بعد أن أكملت سطور هذه الرسالة، إلا أن أتقدم بجزيل الشكر والامتنان لأستاذي **الأستاذ الدكتور المهندس انطانيوس عقل** الذي كان له الفضل الكبير في خروج هذه الرسالة إلى النور فهو لم يبخل بعلمه وبوقته في تقديم النصائح والتوجيه، فغمرني بلطفه وطيب قلبه وأعطاني الكثير من علمه، لذا فإنني أدين له بالفضل فله مني كل الشكر والتقدير، وأتمنى له دوام الصحة والعافية والنجاح.

كما يسرني أن أتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان والتقدير **للدكتور المهندس يحيى كشكول** على كل الجهود التي بذلها وعلى وتعاونه في إتمام هذه الرسالة.

كما أتقدّم بشكري العميق إلى **الدكتور حمزة مكارم** الذي تفضّل بقبول الاطلاع على البحث، ولم يبخل عليّ بوقته وجهده وملاحظاته القيّمة في تحكيم البحث.

ولا أنسى أن أشكر أخي وصديقي الغالي **رجا أبو عقل**، رفيق الدرب، سخي العطاء على كل العون والمساعدة التي قدمها لإنجاز هذا البحث.

الفهرس

الفصل الأول

مقدمة

1.1 مدخل لتحديد المهمة العلمية وأهداف البحث..... 5
2.1 لمحة تاريخية عن تطور الأقنية الهوائية..... 5
3.1 الطرز الأساسية للأقنية الهوائية..... 9
1.3.1 تصنيف الأقنية الهوائية حسب نوع الدارة..... 9
1.1.3.1الأقنية المفتوحة..... 9
2.1.3.1 الأقنية المغلقة..... 10
2.3.1 تصنيف الأقنية الهوائية حسب سرعة الجريان..... 10
3.3.1 تصنيف الأقنية الهوائية حسب الغرض..... 11
4.1 اختيار وتحديد المؤشرات الأيروديناميكية والمواصفات التقنية للقناة الهوائية المطلوبة..... 11
1.4.1 المواصفات الفنية والأبعاد الأساسية للقناة الهوائية..... 11
2.4.1 مخطط القناة الهوائية المطلوب تصميمها..... 12

الفصل الثاني

الدراسة الأيروديناميكية التفصيلية للقناة الهوائية

مدخل..... 15
1.2 قسم الاختبار *(1)*..... 15
1.1.2 المواصفات الأساسية لقسم الاختبار..... 15
1.1.1.2 معامل درجة الاضطراب..... 18
2.1.2 مقارنة بين قسم الاختبار المفتوح والمغلق..... 19
1.2.1.2 قسم الاختبار المفتوح..... 19
2.2.1.2 قسم الاختبار المغلق..... 19
3.1.2 حساب معامل الفقد في قسم الاختبار..... 20
2.2 الناشرات *(2.1,2,3)*..... 21
1.2.2 الناشرة القصيرة *(2.4)*..... 25
3.2 الأكواع وريش التوجيه *(3.1,2,3,4)*..... 26
4.2 قسم المروحة *(6)*..... 30
1.4.2 شفرات التوجيه بعد وقبل المروحة..... 32
5.2 حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*..... 34
1.5.2 خلايا عش النحل *(8.1)*..... 36
2.5.2 المناخل *(8.2)*..... 37
6.2 النفاثة *(9)*..... 40
7.2 الخلاصة والاستنتاجات..... 43

الفصل الثالث

تصميم مكونات القناة الهوائية وإعداد المخططات التنفيذية

1.3 قسم الاختبار *(1)*..... 44

1.1.3 اختيار شكل قسم الاختبار..... 44
2.1.3 أبعاد قسم الاختبار..... 44
3.1.3 بعض الإجراءات التصميمية لتحسين أداء قسم الاختبار..... 45
2.3 الناشرات *(2.1,2,3,4)*..... 46
3.3 الأكواع وريش التوجيه *(3.1,2,3,4)*..... 48
1.3.3 تحديد بروفيل وأبعاد ريش التوجيه في الأكواع..... 48
4.3 قسم المروحة *(6)*..... 51
1.4.3 تحديد قطر الصرة..... 51
2.4.3 تحديد قطر المروحة..... 53
3.4.3 عدد ريش المروحة..... 53
4.4.3 عرض ريش المروحة..... 54
5.4.3 شكل شفرات التوجيه قبل وبعد المروحة..... 54
5.3 المقطع الانتقالي *(7)*..... 55
6.3 حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*..... 55
7.3 النفاثة *(9)*..... 55
1.7.3 تصميم النفاثة حسب بورجر *Boerger*..... 56
2.7.3 تصميم النفاثة بطريقة كثيري الحدود المتلاقيين في نقطة 59
3.7.3 تصميم النفاثة حسب معادلة جامعة روستوك 61
4.7.3 مقارنة التصاميم الثلاثة للنفاثة واختيار الحل..... 62
8.3 الهيكل المعدني الحامل للقناة..... 62
9.3 الخلاصة والاستنتاجات..... 64

الفصل الرابع

نمذجة ومحاكاة الجريان في القناة الهوائية باستخدام برنامج *Fluent*

مدخل..... 65
1.4 مراحل عملية النمذجة والمحاكاة..... 65
1.1.4 توليد الشبك *Mesh*..... 65
2.1.4 مجالات الحساب الرقمي *Computational Domains* 67
2.4 خطوات الحل في برنامج *Fluent*..... 70
1.2.4 نمذجة الإضطراب..... 70
2.2.4 برنامج *Fluent*..... 71
1.2.2.4 الشرط الحدي للمروحة..... 72
1.1.2.2.4 نمذجة ومحاكاة ارتفاع الضغط عبر المروحة..... 72
2.1.2.2.4 مدخلات المروحة..... 72
3.4 نتائج النمذجة والمحاكاة..... 73
1.3.4 قسم الاختبار *(1)*..... 73
2.3.4 الناشرات *(2)*..... 76
3.3.4 الأكواع *(3)*..... 77
4.3.4 النفاثة *(9)*..... 79
1.4.3.4 حالة قسم اختبار مغلق..... 80
1.1.4.3.4 مقارنة توزع السرعة في النفاثات الثلاثة..... 80

2.1.4.3.4 مقارنة خطوط التيار في النفاثات الثلاثة..... 82
3.1.4.3.4 مقارنة معامل درجة الاضطراب في النفاثات الثلاثة..... 83
4.1.4.3.4 مقارنة بروفيل توزع السرعة عند المخرج في النفاثات الثلاثة..... 84
5.1.4.3.4 مقارنة فرق الضغط خلال النفاثات الثلاثة..... 85
2.4.3.4 حالة قسم اختبار مفتوح..... 85
1.2.4.3.4 مقارنة توزع السرعة في النفاثات الثلاثة..... 85
2.2.4.3.4 مقارنة أشعة السرعة في النفاثات الثلاثة..... 88
3.2.4.3.4 مقارنة معامل درجة الاضطراب في النفاثات الثلاثة..... 89
4.2.4.3.4 مقارنة بروفيل توزع السرعة عند المخرج في النفاثات الثلاثة..... 90
3.4.3.4 اختيار الحل الأنسب للنفاثة..... 92
4.4 الخلاصة والاستنتاجات..... 92

الفصل الخامس

طريقة تصنيع عناصر القناة الهوائية وتجميعها وبحث إمكانات التصنيع المتوفرة محلياً

1.5 مادة تصنيع القناة الهوائية..... 93
2.5 تصنيع قسم الاختبار *(1)*..... 94
3.5 تصنيع المجمع *(2.1.1,2)*..... 95
4.5 تصنيع الناشرة الأولى *(2.1)*..... 96
5.5 تصنيع الكوع الأول والثاني *(3.1,2)*..... 96
6.5 تصنيع الناشرة الثانية *(2.2)*..... 98
7.5 تصنيع قسم المروحة *(6)*..... 99
8.5 تصنيع الناشرة الثالثة *(2.3)*..... 99
9.5 تصنيع القسم الانتقالي*(7)* 100
10.5 تصنيع الكوع الثالث والرابع *(3.3,4)*..... 101
11.5 تصنيع الناشرة القصيرة *(2.4)*..... 102
12.5 تصنيع حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*..... 103
13.5 تصنيع النفاثة *(9)*..... 104
14.5 الهيكل الحامل للقناة الهوائية..... 107
15.5 البحث عن الإمكانات المحلية لتصنيع القناة وحساب الكلفة التقديرية..... 107

الفصل السادس

أسس اختبار ومعايرة القناة الهوائية

1.6 انتظام الجريان..... 108
2.6 قياس شدة الاضطراب في قسم الاختبار..... 108
3.6 نمو الطبقة الحدية على جدران القناة الهوائية..... 111
1.3.6 تحديد مواقع نقاط الانفصام..... 112
4.6 قياس سرعة الجريان..... 112
5.6 تدرج الضغط الستاتيكي الطولي في قسم الاختبار..... 113
6.6 قياس الضغط الستاتيكي لدارة القناة..... 114
7.6 قياس الضغط الديناميكي..... 114
8.6 قياس مستوى الضجيج..... 114

9.6 نظم البيانات في الأقنية الهوائية..... 115
10.6 الخلاصة والاستنتاجات..... 116

الفصل السابع

التجارب والاختبارات الممكن إجراؤها في القناة الهوائية وأجهزة القياس المطلوبة

1.7 أمثلة عن التجارب والاختبارات الممكن إجراؤها في القناة الهوائية..... 118
1.1.7 قسم اختبار مفتوح..... 118
2.1.7 قسم اختبار مغلق..... 118
2.7 أجهزة القياس المطلوبة..... 119
1.2.7 المسبار خماسي الثقوب..... 119
2.2.7 مسبار السلك الساخن..... 121
3.2.7 مقياس السرعة الليزري الدوبلري..... 123
4.2.7 ميزان القوى والعزوم..... 125
5.2.7 ميكرومانومتر بيتس..... 128
6.2.7 مانومترات مضاعفة متعددة لقياس توزع الضغط الستاتيكي..... 128
3.7 الخلاصة والاستنتاجات..... 129
8. الخاتمة والاستنتاجات والاقتراحات المستقبلية..... 130

9. المراجع العلمية..... 134

10. قائمة الرموز والاختصارات والمصطلحات العلمية المستخدمة..... 141
1.10 قائمة الرموز العلمية المستخدمة مع الواحدات..... 141
2.10 قائمة الأدلة المستخدمة..... 143
3.10 قائمة الاختصارات المستخدمة..... 143
4.10 قائمة المصطلحات العلمية المستخدمة..... 144

11. الملاحق..... 146
1.11 الملحق *A* حساب فواقد الجريان لمكونات القناة الهوائية..... 147
2.11 الملحق *B* المخططات التنفيذية لتصنيع القناة الهوائية..... 201
3.11 الملحق *C* حساب الكلفة التقديرية لتصنيع القناة الهوائية محلياً ومقارنتها مع كلفة استيراد قناة مماثلة..... 248

الفصل الأول

مقدمة

1.1 مدخل لتحديد المهمة العلمية وأهداف البحث

إن الشرط اللازم لتوفير إمكانية لانطلاقة بحث علمي حقيقي، أساسي وتطبيقي، في مجال ميكانيك السوائل وتطبيقاته يرتبط بوجود قناة هوائية وأجهزة قياس حديثة ذات مواصفات تعكس المستوى التقني العالي المعروف عالمياً، وإمكانيات بحثية تجريبية مختلفة ومتعددة.

وجود هذه القناة يفتح مجالات واسعة لإجراء بحوث علمية ذات مستوى عالٍ من قبل أعضاء الهيئة التدريسية المختصين وطلاب الدراسات العليا لمرحلة الماجستير والدكتوراه، ومجالات متعددة لإجراء بحوث علمية تطبيقية لفروع صناعية متعددة مثل صناعة السيارات والعنفات الريحية.

يوجد في العالم عدد قليل من الشركات المختصة في تصميم وتنفيذ الأقنية الهوائية المعدة لأغراض البحث العلمي، وهي تنجز ذلك استناداً لطلبية محددة من الزبون وفقاً للمواصفات الفنية التي يحددها.لذلك يستغرق توريد القناة وقتاً طويلاً نسبياً، وتكون بالتالي كلفتها عالية علماً أن معايرة القناة بعد تركيبها تكلف بها مكاتب أو شركات اختصاصية معتمدة ومستقلة.

من خلال دراسة مرجعية واسعة ومعمقة *[51,48,43,42,36,30,12,11,6,3,2,1]* ومن خلال تصورنا لإمكانيات ومجال البحث العلمي الأساسي والتطبيقي في كليتنا تم تحديد موضوع البحث ليشمل دراسة وتصميم قناة هوائية تحت صوتية من النوع المغلق، طراز جوتنجن *Goettinger type* بسرعة أعظمية في قسم الاختبار تصل لحدود *60 m/s*، والبحث عن الإمكانات الفعلية المتوفرة في ورشات الكلية والسوق المحلية لتصنيع القناة محلياً، مع الأخذ بعين الاعتبار أن عدداً من مكونات القناة يفضل استيراده من الشركات المتخصصة، مثل المروحة ومحركها وريش التوجيه في الأكواع والمناخل وخلايا عش النحل، إضافة لأجهزة القياس الضرورية، التي بدونها تفقد القناة أهميتها.

نسعى من خلال هذا البحث لتحقيق الأهداف التالية:

1. بلورة وتوضيح وتطبيق الأسس الأيروديناميكية لدراسة أقنية هوائية معقدة تحقق متطلبات محددة مسبقاً للجريان، مثل درجة الاضطراب ومستوى الضجيج في جميع مقاطع القناة وبخاصة قسم الاختبار.
2. تصميم العناصر والمكونات الأساسية للقناة مع مراعاة المواد الأولية وإمكانيات التصنيع المتوفرة في السوق المحلية.
3. بحث الإمكانات المتوفرة لتصنيع جميع العناصر والمكونات الممكن تصنيعها محلياً، واستيراد البعض منها، ومن ثم تجميع القناة واختبارها ومعايرتها، علماً أنه تتوفر عدة إمكانات للاستفادة من العلاقات العلمية مع جامعات ألمانية لإجراء عملية المعايرة، منها جامعة روستوك وجامعة برلين التقنية.

2.1 لمحة تاريخية عن تطور الأقنية الهوائية

تعتمد عملية التطوير في مجال الأيروديناميك والهيدروديناميك بشكل كبير على التجهيزات المخبرية المتوفرة، حيث أنه منذ القدم استخدم الباحثون في هذا المجال تجهيزات بحثية مناسبة لأبحاثهم ، مثل: أذرع التدويم *Whirling Arms* والأقنية المائية *[27]*. وتعد الأقنية الهوائية من أهم التجهيزات المخبرية المستخدمة في مجال الأيروديناميك.

ليوناردو دافنشي *Leonardo Da Vinci* أول من نبه إلى الفكرة الأساسية لبناء الأقنية الهوائية منذ أكثر من *400* عـــام عندما لاحظ أن صورة جريان الهواء حول جسم ساكن مطابقة لصور الجريان حول نفس الجسم عندما يتحرك في هـــواء ساكن بشرط أن تكون السرعة النسبية بين المراقب والجسم معدومة *[12]*.

للباحثين في مجال الأيروديناميك يعني هذا أن شروط الجريان من الممكن محاكاتها بتثبيت الجسم المراد اختباره وتحريك الهواء حوله بسرعة الجسم الفعلية، والقناة كانت هي التطبيق المثالي لتنفيذ ومراقبة هذه العملية حيث تميزت بأنها يمكن الاستفادة منها في مجالات عدة بالإضافة لكونها آمنة واقتصادية نسبياً، حيث أنه على سبيل المثال التجارب التي كانت تجرى علـــى طائرة بالقياس الحقيقي في بداية عصر الطيران كانت تكلف أضعاف الكلفة بالمقارنة مع النموذج المختبر في القناة الهوائية، كما أن اختبار الطائرات في الجو قد يكلف أرواحاً في بعض الأحيان.

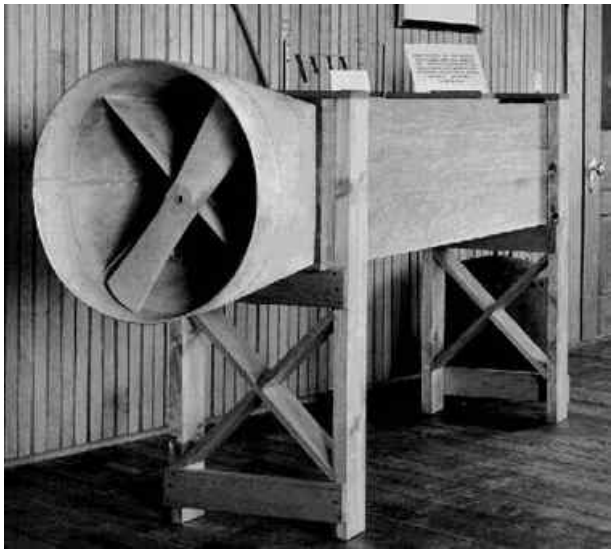
إضافة لأن بعض القياسات المأخوذة يمكن أن تكون أدق وعملية التحكم بالتجربة تتم بشكل أفضل على الأرض وبعـــض أدوات القياس ممكن تثبيتها وقراءة النتائج منها بسهولة أكبر في القناة.

في عام *1871* بنى فرانسيس وينهام *Francis Wenham* أول قناة هوائية في غرينويش بإنكلترا لصالح جمعية الطيران في المملكة المتحدة *[54,12]*، هذه القناة كانت تتألف من مروحة مقادة بمحرك بخاري تعمل على دفع الهواء خلال صندوق خشبي بطول *3.7 m [17]* ومساحة مقطعه *45.7 X 45.7 cm* ومفتوح من الطرفين.

كل الأقنية الناجحة التي بنيت فيما بعد كانت لها السمات الرئيسية لقناة وينهام والتي تتمثل في نظام قيادة يعمل على تدوير مروحة تولد جريان هواء من الممكن التحكم به يمر على نموذج بأبعاد محددة مثبت في قسم الاختبار للقناة وتجري مراقبته بدقة، بالإضافة إلى ميزان القوى وأجهزة القياس الأخرى المتوفرة.

استخدام الأقنية الهوائية لدراسة الجريان حول جناح حامل ساعد على تكوين فكرة عن القوى المؤثرة على الجناح وقـــدم إمكانية لتصميم الشكل الأفضل للجناح من حيث قوة الرفع وقوة المقاومة، ومع ذلك لم تدرك الأهميـــة الفعليـــة لهـــذا الاختراع قبل بداية القرن العشرين حيث أن التطورات التي جاءت في هذا القرن قادت إلى تسريع تطور الأقنية الهوائيـــة وأبرزت أهميتها الفعلية:

أولاً: في عام *1901* الأخوان رايت *Wright Brothers* بنيا قناة هوائية للحصول على بيانات موثقة لتصميم أول طائرة مقادة من إنسان وذات دفع ذاتي والشكل *(1.1)* يوضح هذه القناة.



الشكل *(1.1)*: القناة الهوائية التي بناها الأخوان رايت *[55]*.

ثانياً: اكتشاف الكهرباء قدم محركاً نظيفاً وذا حجم أقل ليحل محل المحرك البخاري القديم في قيادة مروحة القناة الهوائية، حيث أنه قبل عام *1910* لم يكن هناك أية قناة هوائية باستطاعة محرك أكبر من *75 KW*، والمحركات البخارية كانت تقود معظم الأقنية الهوائية في المراحل المبكرة من تطورها وذلك عند سرعات صغيرة نسبياً، أما المحركات الكهربائية فقد وفرت سرعات أكبر بكثير.

في عام *1901* بنيت أول قناة في الولايات المتحدة ذات مروحة مقادة بواسطة محرك كهربائي من قبل ألبرت زام *Albert Zahm* في الجامعة الكاثوليكية *[27]*.

في عام *1913* تم تعديل قناة زام لتصبح بقسم اختبار أبعاده *244 X 244 cm* وبسرعة تصل إلى *72 m/s* وهي نفس سرعة التحليق للطائرات العسكرية في الحرب العالمية الأولى و ذلك في المحطة البحرية بواشنطن.

الأقنية الهوائية المصنعة قبل الحرب العالمية الأولى بداية بقناة وينهام ومروراً بقناة الأخوين رايت كانت من النوع المفتوح.

الأقنية التي بناها غوستاف إيفيل *Gostave Eiffel* في باريس أوائل القرن العشرين كانت من النوع المفتوح أيضاً وهي:

- في عام *1909* كان قد أكمل بناء قناته بقطر لقسم الاختبار *1.5 m* وبسرعة *20 m/s*.
- ثم في عام *1912* حسّن تصميمه ليبني قناة بسرعة *32 m/s*.

ثالثاً: بين عامي *1908* و*1915* قام فريق الأبحاث الأيروديناميكية في جامعة جوتنجن بقفزة نوعية عندما بنوا أول قناة هوائية من النوع المغلق. وبذلك غير هذا الفريق بقيادة الفيزيائي والمهندس الفذ لودفيج براندل *Ludwig Prandtl* مسار تطور الأقنية الهوائية ، هذه القناة الجديدة تفوقت بالمزايا التالية مقارنة مع الأقنية المفتوحة *[27]*:

1. استهلاك طاقة أقل.
2. الجريان أكثر انتظاماً مع تحقيق معامل درجة اضطراب منخفض وذلك باستخدام المناخل وخلايا عش النحل.

أما الفواقد الناتجة عن دوران الهواء في القناة 360° فقد تم تخفيضها باستخدام ريش التوجيه في الأكواع.

في عام *1916* تم بناء الجيل الثاني من الأقنية المغلقة طراز جوتنجن بتركيب حجرة استقرار الجريان للحصول على جريان أقل اضطراباً، وتركيب النفاثة في مدخل قسم الاختبار لزيادة سرعة الجريان. وبذلك فإن سرعة الجريان في الأقنية المغلقة كانت أكبر من أي قناة بنيت من قبل كما أن الجريان أكثر استقراراً.

في عام *1964* عمل برادشو و بانكهورست *Bradshaw & Pankhurst* على نشر مقالة جمعا فيها الخطوط العريضة لمبادئ التصميم الكامل للأقنية الهوائية ذات السرعات المعروفة في ذلك الوقت *[10]*.

والدراسات التجريبية التي قام بها ميهتا وبرادشو *Mehta & Bradshaw* عام *1979* قادت إلى زيادة فهم كيفية تصميم مكونات القناة المختلفة *[10]*.

والجدول *(1.1)* يتضمن أهم الأقنية الهوائية التي تم بناؤها منذ عام *1871* وحتى عام *2008*.

وحتى الآن فإن الأقنية الهوائية تبقى الأداة الهندسية الضرورية لإجراء التجارب والقياسات على النماذج في عمليات البحث الأساسية للتأكد من وثوقية نتائج الدراسات النظرية والحسابات العددية *[8]*.

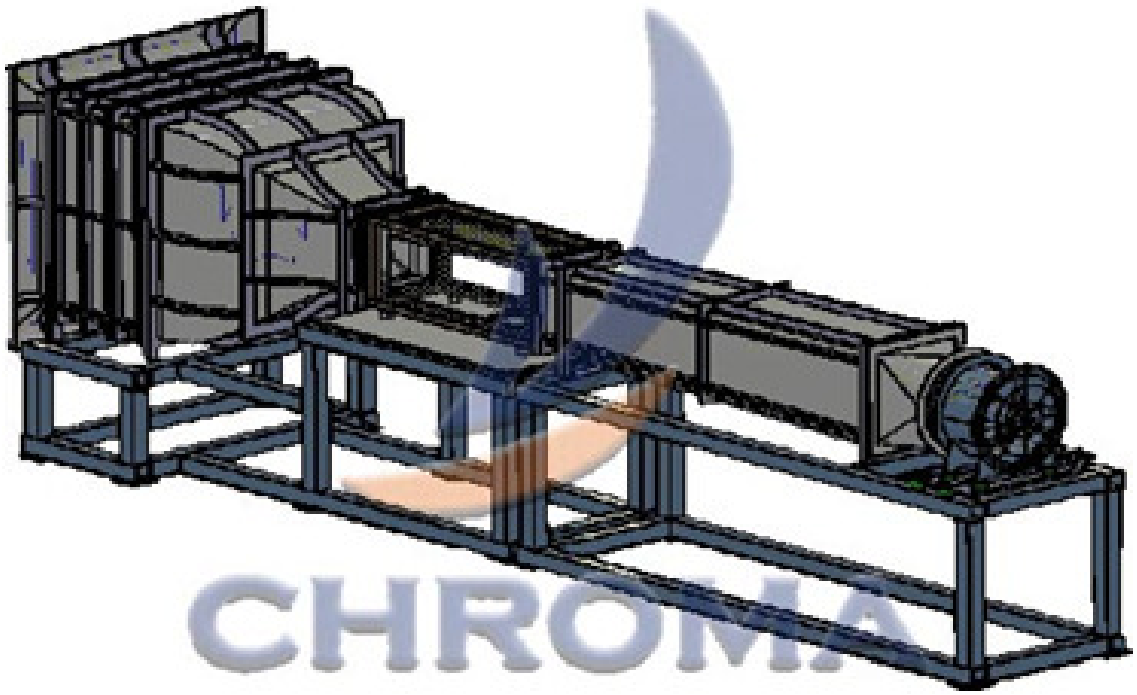
الجدول *(1.1)*: تاريخ تطور الأقنية الهوائية *[60,59,58,57,56,55,54,49,43]*

المكان	المصمم	التوصيف	التاريخ
المملكة المتحدة	فرانسيس وينهام	أول قناة هوائية في العالم	*1871*
روسيا	كونستانتين تسيلكوفسيكي	قناة روسية	*1897*
دايتون–أوهايو–الولايات المتحدة	الأخوان رايت	قناة بمقاس *40 X 40 cm*	*1901*
الجامعة الكاثوليكية–الولايات المتحدة	ألبرت زام	قناة بمقاس *183 X 183 cm*	*1901*
موسكو–روسيا	دميتري ريابوشنسكي	قناة روسية	*1904*
جامعة جوتنجن–ألمانيا	لودفيج براندل	أول قناة من النوع المغلق	*1909*
باريس–فرنسا	غوستاف إيفيل	قناتان هوائيتان من النوع المفتوح	*1912*
جامعة جوتنجن–ألمانيا	لودفيج براندل	أول قناة حديثة	*1917*
مركز أبحاث لانجلي–الولايات المتحدة	ماكس مونك	قناة ذات كثافة متغيرة	*1923*
مركز أبحاث لانجلي–الولايات المتحدة		قناة بحثية بمروحة محورية	*1927*
مركز أبحاث لانجلي–الولايات المتحدة	سميث دي فرانس	قناة اختبار نماذج بالقياس الحقيقي	*1931*
بينينموند–الولايات المتحدة		أول قناة هوائية فوق صوتية	*1936*
جامعة ويسكونسين–الولايات المتحدة	ويليام بوينغ	قناة هوائية عالية السرعة	*1936*
مركز أبحاث لانجلي–الولايات المتحدة		قناة هوائية عالية السرعة	*1939*
مركز أبحاث لانجلي–الولايات المتحدة		أول قناة أمريكية فوق صوتية	*1942*
NACA Lewis	كارل بيوليتي	قناة بمقاس *12.19 X 24.38 m*	*1944*
NACA Lewis		قناة فوق صوتية بمقاس *2.44X1.83*	*1948*
NACA Lewis		قناة فوق صوتية بمقاس *3 X 3 m*	*1955*
AECD		قناة هوائية دافعة *Propulsion*	*1955*
القناة الهوائية بجامعة روستوك–ألمانيا	*Prof. Leder*	قناة مغلقة بمقاس *0.65 X 0.65 m*	*1996*
القناة الهوائية بمعهد تشونغ تشنغ– تايوان		قناة مفتوحة بمقاس *0.4 x 0.4 m*	*2002*
القناة الهوائية بمعهد فون كارمن–بلجيكا		قناة مغلقة بمقاس *0.1 x 0.17 m*	*2005*
القناة الهوائية بجامعة ريجنزبورغ – ألمانيا	*Prof. Stephan Laemmlein*	قناة مغلقة بمقاس *0.5 x 0.6 m*	*2006*
القناة الهوائية بجامعة مينيسوتا–الولايات المتحدة		قناة مغلقة بمقاس *1 X 1.25 m*	*2007*
القناة الهوائية بمعهد علوم الطيران آخن–ألمانيا		قناة مغلقة قطر قسم الاختبار *1.5 m*	*2008*

3.1 الطرز الأساسية للأقنية الهوائية

1.3.1 تصنيف الأقنية الهوائية حسب نوع الدارة

يوجد نوعان أساسيان للأقنية الهوائية هما الأقنية المفتوحة والأقنية المغلقة. هناك ميزات ومساوئ لكل من النوعين المفتوح والمغلق، وبشكل عام فإن ما يحدد نوع القناة هو الميزانية المتاحة والغرض الذي من أجله صممت القناة.



الشكل *(2.1)*: قناة هوائية من النوع المفتوح تصنيع شركة كروما *Chroma [80].*

1.1.3.1 الأقنية المفتوحة

الهواء الجاري عبر قناة مفتوحة يجري بمسار مستقيم من المدخل إلى النفاثة وصولاً إلى قسم الاختبار والذي يليه الناشرة وقسم المروحة ثم قسم خروج الهواء، الشكل *(2.1)* يوضح مخطط لقناة هوائية مفتوحة بقسم اختبار مغلق من تصنيع شركة كروما *Chroma* الأندونيسية *[80].*

ميزات الأقنية المفتوحة:

1. تكاليف التصنيع عادة تكون أقل بكثير من الأقنية المغلقة.
2. عملية تنظيف القناة أسهل وخاصة إذا استخدم دخان كثيف لترئية الجريان في القناة *[1].*

مساوئ الأقنية المفتوحة:

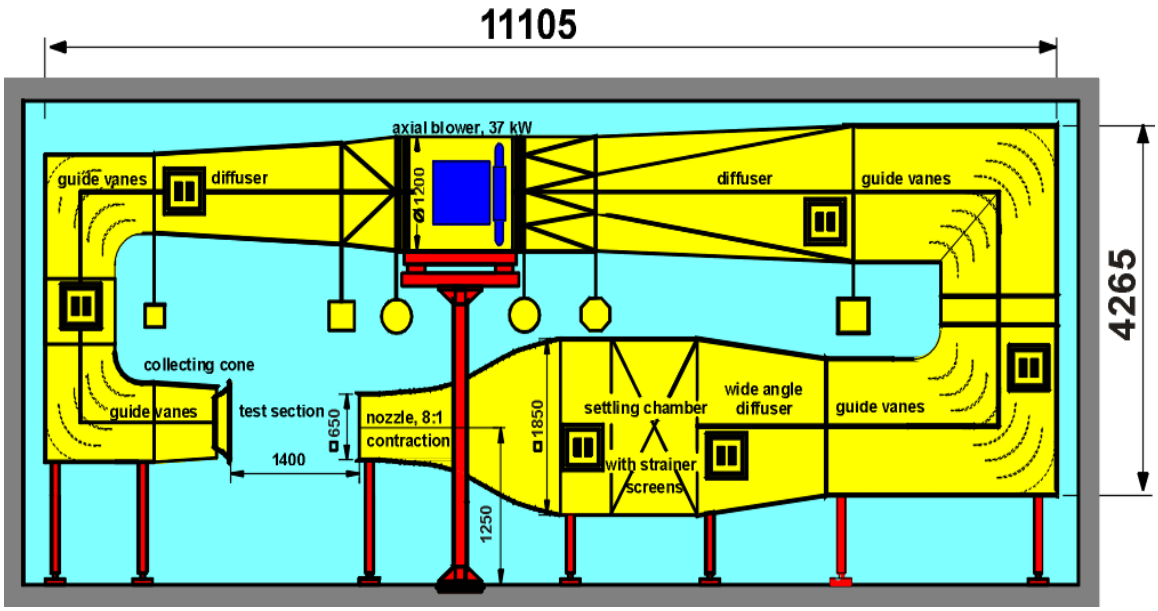
1. غالباً تحتاج إلى مناخل إضافية عند المدخل للحصول على جريان منتظم عالي الجودة.
2. من أجل سرعة معينة وتجارب محددة تحتاج القناة إلى طاقة أكبر للعمل، بخاصة عندما تستخدم القناة في تجارب للتطوير أي عندما تعمل بشكل مستمر.
3. بشكل عام فإن الأقنية المفتوحة مرتفعة الضجيج.

2.1.3.1 الأقنية المغلقة

جريان الهواء في القناة المغلقة يعاد تدويره بشكل مستمر ضمن القناة والشكل *(3.1)* يوضح مثالاً لهذا النوع من الأقنية.

ميزات الأقنية المغلقة:

1. من خلال استخدام ريش التوجيه في الأكواع والمناخل فإن جودة الجريان يمكن التحكم بها بشكل جيد والأهم من ذلك لا يتأثر الجريان في القناة بالجو المحيط بها.
2. الطاقة المطلوبة لهذا النوع من الأقنية أقل عند نفس السرعة ونفس أبعاد قسم الاختبار، وهذا العامل ضروري في الأقنية التي تعمل في تجارب التطوير لفترات عمل طويلة.
3. الضجيج الصادر عنها أقل.



الشكل *(3.1)*: القناة الهوائية في جامعة روستوك *[49]*.

مساوئ الأقنية المغلقة:

1. الكلفة التأسيسية أكبر مقارنة مع الأقنية المفتوحة بسبب وجود مجاري الهواء اللازمة لعملية التدوير وريش التوجيه في الأكواع.
2. عملية تنظيف القناة أصعب.
3. إذا كانت القناة تعمل لفترات طويلة فيجب عندها تأمين طريقة للتبريد *[1]*.

2.3.1 تصنيف الأقنية الهوائية حسب سرعة الجريان

تصنف الأقنية الهوائية حسب سرعة الجريان إلى *[45]*:

1. الأقنية تحت الصوتية *(Subsonic wind-tunnels)*: قيمة عدد ماخ في هذه الأقنية $M = 0 - 0.7$ حيث: $M = V/a$ حيث V سرعة الجريان، a سرعة الصوت.
4. أقنية الهواء الانتقالية (تحت الصوتية – صوتية – فوق الصوتية) *(Transonic wind tunnels)* : قيمة عدد ماخ في هذه الأقنية $M = 0.7 - 1.2$.

2. الأقنية فوق الصوتية *(Supersonic wind tunnels)*: قيمة عدد ماخ في هذه الأقنية $M = 1.2 - 5$.
5. الأقنية فو ق الصوتية العالية *(Hypersonic wind tunnels)*: قيمة عدد ماخ في هذه الأقنية أكبر من 5.

3.3.1 تصنيف الأقنية الهوائية حسب الغرض

يمكن أن تصنف الأقنية الهوائية حسب الغرض الذي صممت لأجله حيث يمكن أن نذكر:

1. الأقنية الهوائية الخاص بتجارب الطيران

تم تصميم واستخدام نسبة كبيرة من الأقنية الهوائية الخاصة باختبارات الطيران، وعادة ما تكون سرعة الجريان في هذا النوع من الأقنية قريبة من سرعة الصوت أو حتى أكبر من هذه القيمة *[1]*.

2. الأقنية الهوائية الخاصة بالسيارات والعربات

وتستخدم هذه الأقنية للحصول على البارامترات الأيروديناميكية التي تؤثر على أداء السيارة.

3. الأقنية الهوائية الخاصة بالقياسات الصوتية

وتستخدم في الاختبارات المتعلقة بالضجيج.

4. الأقنية الهوائية الخاصة بالبيئة

تصمم هذه الأقنية لمحاكاة الطبقة الحدية الطبيعية للأرض، وتستخدم لتحديد أحمال الهواء على الأبنية وشكل انتشار التلوث وعوامل الحت والتعرية الخاصة بالتربة وشكل الجريان في مجمعات الأبنية.

4.1 اختيار وتحديد المؤشرات الأيروديناميكية والمواصفات التقنية للقناة الهوائية المطلوبة

1.4.1 المواصفات الفنية والأبعاد الأساسية للقناة الهوائية

لتحقيق الهدف الذي من أجله نريد تصميم القناة فقد تم من خلال دراسة مرجعية مستفيضة تحديد المؤشرات التصميمية والمواصفات الفنية التالية:

1. أن تكون القناة ذات دارة مغلقة لتأمين تحكم أفضل في شروط الجريان وتخفيض الاستطاعة الضرورية لتشغيل القناة عند سرعة معينة مقارنة مع قناة ذات دارة مفتوحة *[31]*.
2. الحصول على جريان منتظم وشدة اضطراب منخفضة. لتحقيق ذلك سيتم استخدام المناخل وخلايا عش النحل في حجرة تهدئة واستقرار الجريان في القسم الذي يلي الناشرة القصيرة ويسبق النفاثة.
3. نسبة التضيق للنفاثة بحدود $10 - 6$ وهي تمثل النسبة بين مساحة أكبر مقطع في الدارة أي عند حجرة تهدئة واستقرار الجريان ومساحة المقطع العرضي لأصغر قسم في الدارة أي قسم الاختبار، وقد تم تحديدها بعد الاطلاع على عدة مراجع *[36,32,10,1]* وعدة أقنية مماثلة للقناة المراد تصميمها مثل قناة جامعة روستوك *Rostock [49]* وقناة جامعة ريجنزبورج *Regensburg [43]* وجامعة براونشفايغ *[82]*، إضافة لكتالوجات بعض الشركات التي تصنع أقنية هوائية حسب الطلب ومنها شركة *Lippold* الألمانية *[48]* وشركة *Chroma* الأندونيسية *[80]*.
4. قسم الاختبار يمكن استخدامه مغلقاً أو مفتوحاً مما يفسح المجال لإجراء تجارب متنوعة أكثر.
5. في حال كون قسم الاختبار مغلقاً:

- سوف يتم إجراء التجارب التي تتطلب مستوى اضطراب منخفض.

- مساحة قسم الاختبار: $A= 0.5 X 0.6 m^2$

- طول قسم الاختبار: $L_{TS}= 1.6 m$

- سرعة الجريان الأعظمية: $V= 60 m\s$

- معامل درجة الاضطراب: $Tu\leq 0.5 \%$

6. في حال كون قسم الاختبار مفتوحاً:

- سوف يتم في هذه الحالة إجراء التجارب التي تحتاج مراقبة عن كثب و سهولة في الوصول للنماذج و تجارب القياسات الصوتية.

- مساحة قسم الاختبار: $A= 0.5 X 0.6 m^2$

- طول قسم الاختبار: $L_{TS}= 1.4 m$

- سرعة الجريان الأعظمية: $V= 55 m\s$

- معامل درجة الاضطراب: $Tu= 0.5 \%$

7. أبعاد القناة الأساسية:

- الارتفاع الكلي: $H= 3.54 m$

- الطول الإجمالي: $L_{tot}= 10.135 m$

وذلك من أجل تركيبها في مخبر ميكانيك السوائل القديم في بناء الورشات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.

8. مادة تصنيع القناة: ستانلس ستيل أو صفائح فولاذية مغلفنة بسماكة *2-3 mm* وذلك من أجل الحصول على سطح أملس قدر الإمكان ومتانة عالية ومقاومة للصدأ والعوامل الجوية أيضاً.

9. توضع القناة بشكل عمودي لتوفير المساحة اللازمة للقناة وبما يتناسب مع الموقع الذي ستركب فيه

10. ريش المروحة يجب أن تكون قابلة للتوجيه.

11. قابلية التحكم بسرعة المروحة لضبط السرعة عند أي قيمة ضمن المجال *0-Vmax*.

12. تجهيز القناة بميزان قوى ثلاثي أو سداسي المركبات.

13. تجهيز القناة بأجهزة القياس اللازمة.

14. أن تكون تكلفة تصنيع القناة منخفضة قدر الإمكان.

2.4.1 مخطط القناة الهوائية المطلوب تصميمها

بعد الاطلاع على عدة مراجع *[58,57,52,51,48,45,43,36,32,30,1]* وانطلاقاً من الحاجات الأساسية التي يجب أن تؤمنها القناة الهوائية في مخبر ميكانيك السوائل في كليتنا تم تحديد الأبعاد الأولية للقناة المنشودة، واستناداً لذلك تم إجـــراء الدراسة الأيروديناميكية التفصيلية (راجع الفصل الثاني) وتصميم مكونات القناة الهوائية (الفصل الثالث). وأثناء عمليـــة

التصميم وبعد إجراء نمذجة ومحاكاة للتصميم الأولي (الفصل الرابع) تم تعديله للوصول للتصميم النهائي الموضح في الشكل *(4.1)*.

تتألف دارة القناة الهوائية المغلقة من طراز جوتنجن من المكونات الأساسية التالية، الشكل *(4.1)*:

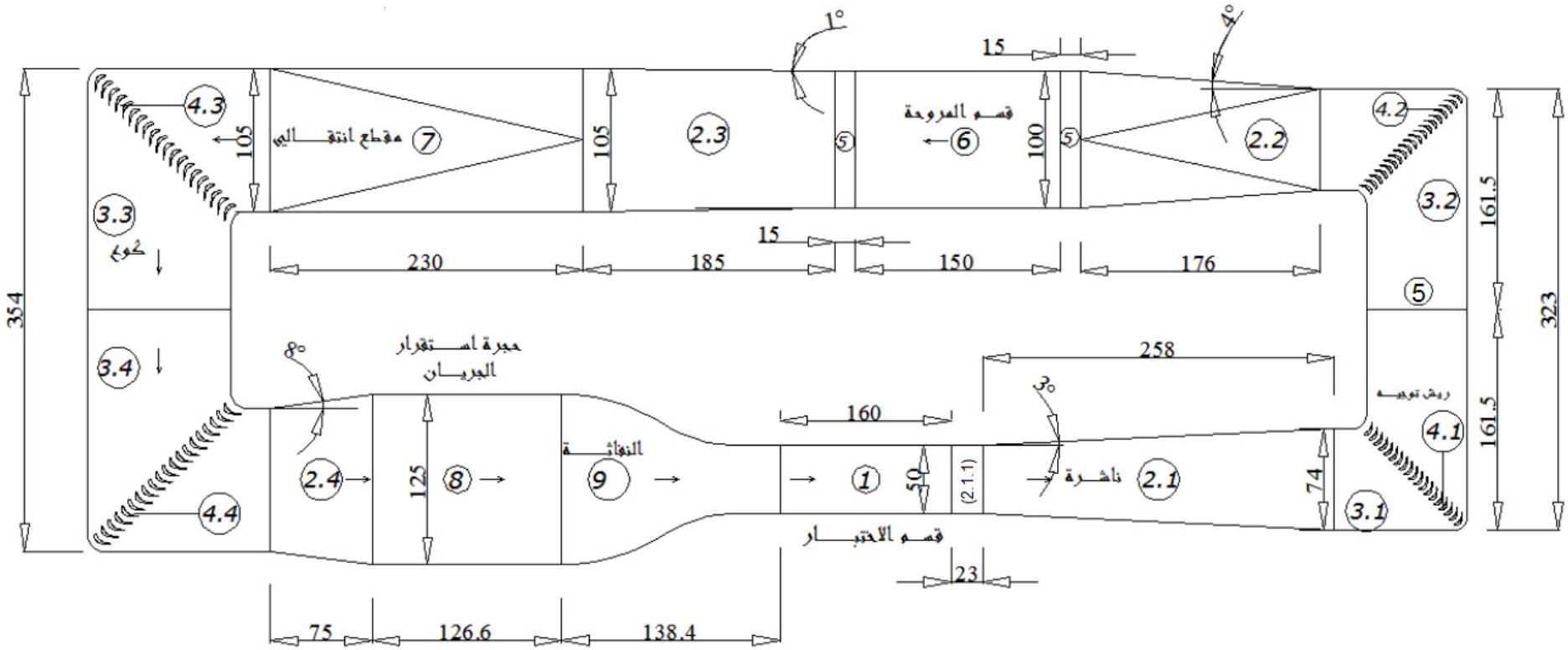
(1) قسم الاختبار.
(2) الناشرات وعددها أربع *(2.1,2,3,4)*.
(3) الأكواع وعددها أربعة *(3.1,2,3,4)*.
(4) ريش التوجيه *(4.1,2,3,4)*.
(5) قسم وصل.
(6) قسم المروحة.
(7) مقطع انتقالي.
(8) حجرة تهدئة واستقرار الجريان وتضم كل من: خلايا عش النحل والمناخل.
(9) النفاثة.
(10) الهيكل المعدني الحامل للقناة.

تولد المروحة الضغط المناسب للتغلب على فواقد الجريان في دارة القناة الهوائية وتأمين تيار من الهواء بمواصفات أيروديناميكية محددة في قسم الاختبار خاصة من حيث السرعة ودرجة الاضطراب. جريان الهواء الصادر عن المروحة يعبر أولاً الناشرة *(2.3)*، ثم يمر عبر مقطع انتقالي *(7)* يليه الكوعان *(3.3 و 3.4)* وصولاً إلى الناشرة القصيرة *(2.4)* ثم حجرة استقرار الجريان *(8)*، التي تحوي بداخلها خلايا عش النحل و المناخل ، فالنفاثة *(9)* التي يليها قسم الاختبار *(1)*. بعد خروج الجريان من قسم الاختبار يدخل إلى الناشرة *(2.1)* ثم يمر عبر الكوعين *(3.1 و 3.2)* والناشرة *(2.2)* ليعود إلى المروحة مرة أخرى.

وقد خضع هذا التصميم لعدة تعديلات حتى توصلنا للتصميم الموجود في الشكل *(4.1)* وبالأبعاد الموضحة في الشكل، أهم هذه التعديلات هو تعديل طول النفاثة حيث أنه في البداية كان طول النفاثة m 2 ولكن بعد الاطلاع على عدة طرق لتصميم النفاثة *[71,67,30]* تم التوصل لتحديد الطول الأفضلي للنفاثة هو m *1.384* مما أعطى المجال لزيادة طول قسم الاختبار.

سيتناول البحث في الفصول اللاحقة الموضوعات التالية:

1. دراسة أيروديناميكية تفصيلية للقناة الهوائية.
2. تصميم القناة الهوائية ووضع المخططات التنفيذية اللازمة لتصنيعها.
3. نمذجة ومحاكاة الجريان في القناة الهوائية باستخدام برنامج ***Fluent***.
4. طريقة تصنيع مكونات القناة وتجميعها.
5. أسس اختبار ومعايرة القناة الهوائية.
6. التجارب والاختبارات الممكن إجراؤها في القناة الهوائية.



الشكل *(4.1)*: مخطط القناة المراد تصميمها الأبعاد بـــ *cm*.

الفصل الثاني
الدراسة الأيروديناميكية التفصيلية للقناة الهوائية

مدخل

في هذا الفصل سوف يتم توضيح الأسس الأيروديناميكية لعمل كل مكون من مكونات القناة الهوائية وتبيان وظيفته الأيروديناميكية في دارة القناة وتحديد طريقة حساب معامل الفقد الخاص به. وقد تم دراسة المكونات ابتداءً من قسم الاختبار وحتى النفاثة وذلك بحسب اتجاه جريان الهواء في دارة القناة، أما الحسابات التفصيلية للفواقد وحساب استطاعة المروحة فقد أدرجت في الملحق *(A)* (الفقرة *1.11* ص*147*).

1.2 قسم الاختبار *(1)*

يعد قسم الاختبار العنصر الأهم لمكونات القناة الهوائية، حيث أن التجارب والاختبارات التي صُمِّمَت القناة الهوائية من أجلها سوف يتم إجراؤها في هذا القسم وكل القياسات سوف تؤخذ منه. لذلك فإن مواصفات قسم الاختبار ذات تأثير حاسم على نتائج التجارب التي تجرى في القناة الهوائية وعلى الاستنتاجات المستخلصة بعد ذلك. وأهم ما يميز قسم الاختبار هو أبعاده الأساسية ونوعه، مغلق أو مفتوح، ومواصفات الجريان داخله *[42]*.

1.1.2 المواصفات الأساسية لقسم الاختبار

في القناة الهوائية يتم تثبيت نموذج للجسم المختبر وتحريك الهواء من حوله. وحسب *[39]* يجب أن نضمن قدر الإمكان عدم تأثر عملية القياس بـ:

1. الامتداد المحدود لجريان الهواء في قسم الاختبار لقناة ما مقارنة مع الامتداد الهائل للهواء الجوي.
2. درجة الاضطراب في قسم الاختبار والتي لا يمكن إزالتها بشكل كامل.

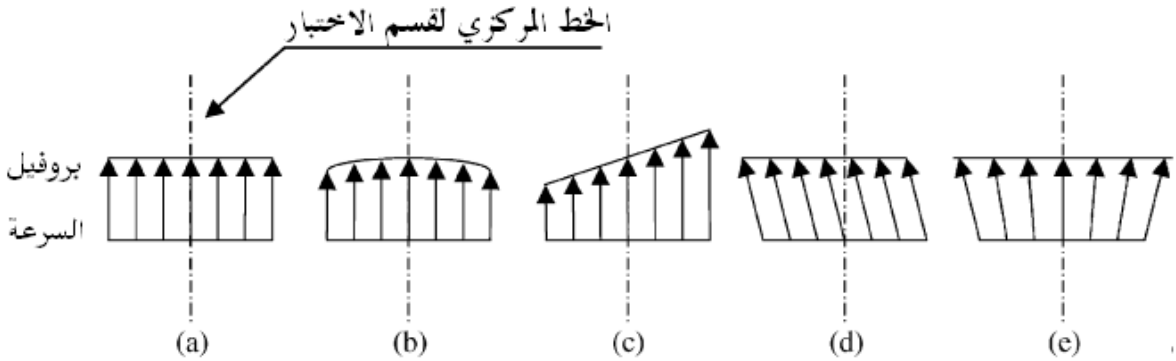
معظم التجارب المنفذة في الأقنية الهوائية تتطلب جرياناً منتظماً ودرجة اضطراب منخفضة في قسم الاختبار *[18]*. من العوامل التي تؤدي إلى جريان غير منتظم:

1. نمو الطبقة الحدية المتزايد وحدوث الانفصام.
2. التصميم السيئ لريش التوجيه في الأكواع *[14]*.

يتم الحصول على جريان منتظم باستخدام خلايا عش النحل والمناخل وباختيار نسبة تضيق مناسبة للنفاثة، والانتظام يتطلب أن تكون أشعة السرعة لها نفس القيمة والاتجاه على كامل المقطع العرضي لقسم الاختبار الشكل *(2-a1)*. لكن في الواقع فإن تأثيرات الجدران تؤدي إلى تناقص قيمة السرعة في الطبقة الحدية بالقرب من الجدران، وبشكل عام هذا التأثير يبقى محدوداً ويمكن اعتبار أن حقل الجريان منتظماً شكل *(b1.2)*، ولكن هناك عدة أنواع من الانحراف عن الجريان المنتظم، النوعان الأساسيان هما: التشوه ***skewness*** والتزاوي ***angularity***، حيث يعتبر الجريان مشوهاً إذا كانت مركبات شعاع السرعة الوسطية ليست موزعة بانتظام على عرض قسم الاختبار باتجاه الجريان شكل *(c1.2)*، أما التزاوي فهو يشير إلى أن أشعة السرعة الوسطية تميل بزاوية عن محور قسم الاختبار شكل *(e-d1.2)*. يوجد نوعان من التزاوي، في النوع الأول تكون أشعة السرعة الوسطية متوازية مع بعضها البعض ولكن ليست موازية لمحور قسم الاختبار أي شعاع السرعة الوسطية يملك مركبة منحرفة أفقياً، إذا كان هناك مركبة منحرفة أفقياً فيطلق على الجريان اسم الجريان العرضي *(cross-flow)* الشكل *(d1.2)*. وبوجود مركبة عمودية يتولد الجريان العمودي للأعلى أو الأسفل ***up-flow*** أو

down-flow حسب اتجاه الجريان. في النوع الثاني خطوط التيار ليست متوازية مع بعضها ومنحرفة بشكل متماثل عن الخط المركزي لقسم الاختبار، وبالتالي يكون الجريان متباعداً أو متقارباً، الشكل *(e1.2) [23].*

المسافة بين جدران قسم الاختبار والنموذج المختبر سوف تؤثر بشكل عملي على ظروف الجريان ونتائج الاختبارات في القناة الهوائية. وهذا يؤدي إلى تأثيرات على التجربة المنفذة، يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار للحصول على نتائج دقيقة، لأنه في الواقع لا توجد عادة جدران أو حدود تحد الجسم من جوانبه، وجود هذه الحدود للجريان ولمسافة محدودة في قسم الاختبار على الجسم الموضوع تحت الاختبار ينتج عنه تأثيرات متعددة ومتداخلة ولكن كتقريب أولي يمكن دراسة كل تأثير على حده دون تداخله مع التأثيرات الأخرى *[1].* أهم تأثيرات جدران القناة على الجريان حول نموذج في قسم الاختبار هي:



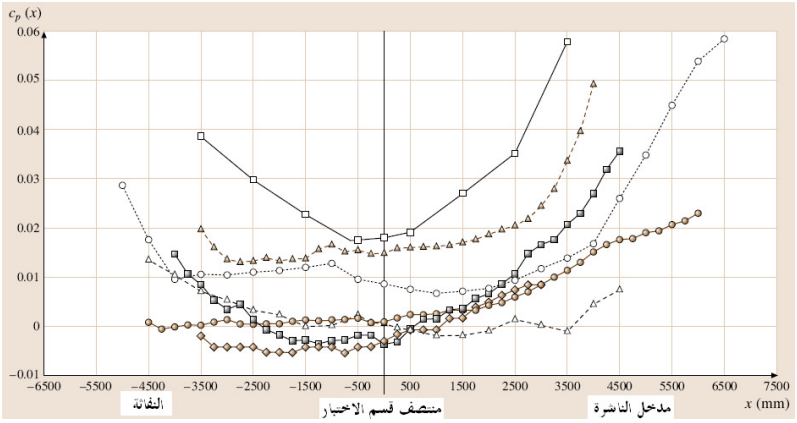
الشكل *(1.2)*: تعريف الأنواع المختلفة للجريان: *(a)* جريان منتظم مثالي ، *(b)* جريان متماثل ناتج عن الاحتكاك الجداري ، *(c)* جريان مشوه ، *(d)* تزاوي (جريان عرضي أو عمودي للأعلى) ، *(e)* تزاوي (جريان متقارب أو متباعد).
الحالات *(c),(d),(e)* يجب تجنبها *[23].*

1) الطفو الأفقي *Horizontal Buoyancy*:

باتجاه الجريان على طول قسم الاختبار تزداد سماكة الطبقة الحدية على الجدران، مما يقلل المساحة الفعالة لمقطع الجريان مقارنة مع أبعاد المقطع الهندسي ويسبب زيادة في سرعة الجريان خارج حدود الطبقة الحدية على الجدار، إذا كانت مساحة المقطع الهندسي لقسم الاختبار ثابتة فإن زيادة السرعة تولد انخفاضاً في الضغط الستاتيكي *[26]* تنتج عنه قوة تحاول سحب النموذج باتجاه الجريان، وهذا ما يسمى الطفو الأفقي لأن تأثيره مشابه للطفو الناتج عن تدرج الضغط العمودي في الهواء أو في الماء *[1]*. هذا التأثير يسبب عدم انتظام الجريان باتجاه التيار وتحرضه جدران قسم الاختبار.

الشكل *(2.2)* يوضح توزع معامل الضغط الستاتيكي في أقنية هوائية مختلفة لاختبار السيارات ذات قسم اختبار مفتوح حيث نلاحظ أن معامل الضغط يكون سالباً عند مخرج النفاثة إلى أن يصل لقيمة مساوية للصفر تقريباً عند مركز قسم الاختبار ثم يتزايد حتى يصل إلى مدخل الناشرة. تدرج الضغط هذا يؤدي إلى نشوء قوة جر باتجاه الجريان مشابهة لقوة الرفع الهيدروستاتيكية على الأجسام في السوائل الساكنة، وهي تظهر عادة في أقسام الاختبار القصيرة نسبياً.

معظم الأقنية الهوائية التي لها قسم اختبار مغلق يكون فيها الضغط الستاتيكي في قسم الاختبار متغيراً وذلك نتيجة لتزايد سماكة الطبقة الحدية باتجاه الجريان، بعض الأقنية يكون فيها قسم الاختبار متوسع قليلاً لتقليل هذا التأثير *[1]*.



الشكل *(2.2)*: معامل الضغط الستاتيكي $C_p(x)$ على طول المحور x في أقنية هوائية متعددة لاختبار السيارات ذات قسم اختبار مفتوح *[42]*.

1) الانسداد الصلب *Solid Blockage*:

تسمى النسبة بين المساحة الجبهية للنموذج ومساحة المقطع العرضي للجريان في قسم الاختبار بنسبة الانسداد الصلب وهي ذات قيمة صغيرة جداً في الواقع *[42,1]*، أما في التجارب المجراة في القناة الهوائية فإنها تؤخذ عادة في المجال *-0.01 0.1* وبشكل عام *0.05 [1]*، لأن القيم الأكبر لهذا العامل سوف تظهر تأثيرات الحجم المحدود لقسم الاختبار على نتائج القياس مثل الطفو الأفقي وتقوس خطوط التيار.

لكي نؤمن التشابه الحركي للجريان في قسم الاختبار مع الجريان الأصلي فإن نسبة الانسداد يجب أن تكون صغيرة قدر الإمكان *[42,15,13,1]*، لكن هذا سوف يؤدي إلى زيادة كلفة بناء وتشغيل القناة بشكل ملحوظ لذا يجب أن يتم اختيار نسبة الانسداد بحيث تؤمن مواصفات الجريان المطلوبة ضمن الميزانية المتاحة *[42]*.

شكل الجريان حول الجسم المختبر المعرض لتيار نافوري ذو أبعاد محددة ليس مشابه تماماً للجريان الأصلي وطبيعة الاختلاف تعتمد على الحدود المحيطة بالتيار النافوري أي جدران قسم الاختبار. الشكل *(3.2)* يوضح الفرق بين شكل الجريان في قسم الاختبار المغلق والمفتوح، حيث أنه سواء في قسم الاختبار المفتوح أو المغلق فإن تأثير حدود التيار النافوري يصبح أكثر وضوحاً كلما قلت المسافة بين هذه الحدود والنموذج المختبر أو بعبارة أخرى كلما كانت نسبة الانسداد أكبر لذا يجب اختيار قيمة مناسبة لنسبة الانسداد للتقليل من تأثير الحجم المحدود لقسم الاختبار *[42]*.

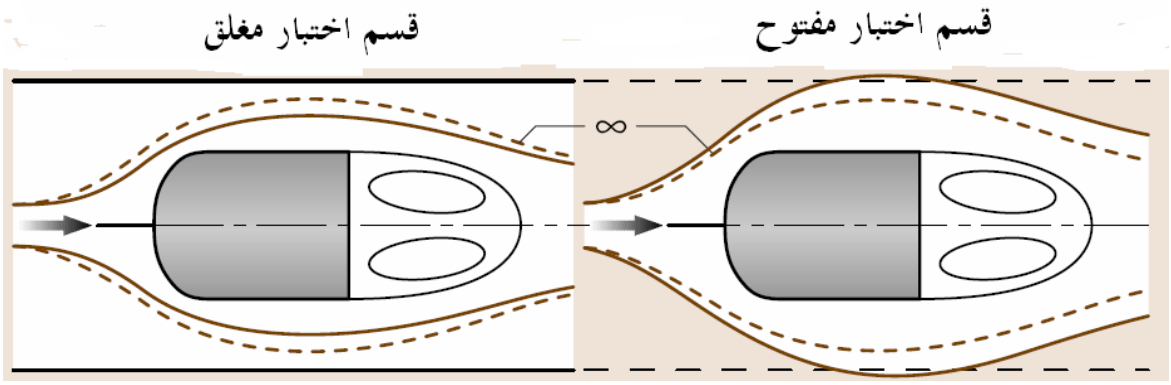
2) انسداد أثر المخر *Wake Blockage*:

هذا التأثير هو نتيجة للحجم المحدود لأثر مخر الجسم وهو إلى حد ما مشابه للانسداد الصلب، إلا أنه أكثر تعقيداً لأن حجم أثر المخر تابع لشكل الجسم ونسبة مساحة أثر المخر لمساحة المقطع *[1]*.

في قسم الاختبار المغلق يزيد انسداد أثر المخر المقاومة المقاسة، ويعتبر مهملاً في قسم الاختبار المفتوح لأن جريان الهواء حر التمدد في قسم الاختبار.

3) تقوس خطوط التيار *Streamline Curvature*:

بسبب وجود جدران قسم الاختبار سوف يحصل تشوه لخطوط التيار وسيكون لها تقوس أكثر مما تملك في الواقع، فعلى سبيل المثال بسبب هذا التأثير فإن الجناح الحامل في القناة يملك أداء أفضل وقوة رفع أكبر بنسبة $c/4$ من قيمته الفعلية *[53,27]* عند زاوية ورود معطاة. حيث c هي طول وتر الجناح.



الشكل *(3.2)*: تأثير حدود التيار النافوري على الجريان الذي يمر على الجسم بالمقارنة مع الجريان الحر في الواقع، على اليسار: قسم اختبار مغلق حيث خطوط التيار مقيدة ، على اليمين: قسم اختبار مفتوح حيث خطوط التيار غير مقيدة *[42]*.

1.1.1.2 معامل درجة الاضطراب

تم إدراك تأثير الاضطراب على التجارب المنفذة في الأقنية الهوائية في عام *1911* عندما قام إيفيل *Eiffel* بقياس معامل المقاومة لكرة في قناته الهوائية ووجد أن هذه القيمة هي *0.18 [7]*، وبعد سنة وجد فوبل *Foeppl* من معهد الأيروديناميك في جوتنجن بأن هذه القيمة كانت خاطئة وأن القيمة الصحيحة هي *0.44 [7]*.

لشرح هذا الاختلاف أوضح فيسلسبيرغ *Wieslsberg* أنه من الممكن الحصول على نتائج في قناة جوتنجن الهوائية شبيهة بالنتائج التي حصل عليها إيفيل وذلك للحالة التي يكون فيها الجريان أمام الكرة مضطرباً.

وبذلك تم التوصل إلى أن معامل مقاومة الكرة المحسوب في القناة الهوائية لا يعتمد فقط على قطر الكرة، السرعة، الكثافة، ولزوجة الهواء وإنما أيضاً على طبيعة الجريان بكونه صفائحياً أو مضطرباً *[7]*.

إن إحدى أهم المواصفات الفنية للأقنية الهوائية المستخدمة لقياسات دقيقة تتطلب معامل درجة اضطراب صغير جداً، خاصة في الجريان غير المشوش. يعطى معامل درجة الاضطراب بالعلاقة *[3]*:

$$Tu = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right)}}{\overline{V}} \qquad (1.2)$$

حيث u' ، v' ، w' تذبذبات السرعة ، $\overline{V}$ السرعة الوسطية زمنياً.

و بما أن الاضطراب في القناة الهوائية وعلى مسافة محددة بعد المناخل قبل قسم الاختبار هو اضطراب من النوع الإيزوتروبي، أي موحد الخواص في كافة الاتجاهات *[3]*، وبالتالي فإن تذبذبات السرعة الوسطية في الاتجاهات الثلاثة متساوية:

$$\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$$

فإن العلاقة *(1.2)* تصبح:

$$Tu = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\overline{V}}$$

توجد أقنية هوائية تعمل عند معامل درجة اضطراب 0.0005 وتحقق ذلك باستخدام عدد مناسب من خلايا عش النحل والمناخل ذي فتحات صغيرة قدر الإمكان *[21,11]*، حيث أن إضافة منخل تخفض شدة الاضطراب بنسبة $\frac{1}{\sqrt{1+\zeta_{sc}}}$

حيث: ζ_{sc} معامل فقد المنخل، كما يمكن تخفيض شدة الاضطراب بتكبير نسبة تضيق النفاثة *[4]*.

وقد أكدت التجارب المجراة على كرة أن عدد رينولدز الحرج للكرة، يتناسب عكساً مع معامل درجة الاضطراب في القناة الهوائية *[21]*، وهذه الحقيقة العملية تستند على أرضية فيزيائية حيث أن القيم الكبيرة لمعامل درجة الاضطراب في الجريان تؤدي إلى حدوث الانتقال الصفائحي المضطرب عند أعداد رينولدز صغيرة نسبياً، بالإضافة لأن معامل درجة الاضطراب هو معيار هام لمقارنة دقة القياسات المأخوذة من قناة ما مع القياسات المأخوذة من قناة أخرى *[22]*.

2.1.2 مقارنة بين قسم الاختبار المفتوح والمغلق

1.2.1.2 قسم الاختبار المفتوح

ميزات قسم الاختبار المفتوح:

1. تأثير الطفو الأفقي يبقى صغيراً طالما أن تدرج الضغط على طول محور القناة صغير ويمكن إهماله.
2. صورة خطوط التيار قريبة جداً من صورة خطوط التيار في الهواء الجوي، وهذا يعني أن التصحيحات اللازمة للجريان صغيرة مقارنة مع قسم الاختبار المغلق *[42,28,13]*.
3. استهلاك الطاقة أقل من الأقنية ذات قسم الاختبار المغلق بسبب تشكل مناطق ركود في الهواء القادم من النفاثة.
4. سهولة الوصول للنموذج كما أن عملية ترئية الجريان ومراقبته واستخدام أجهزة تحريك وتوضيع النموذج والتحكم به تكون أسهل.

مساوئ قسم الاختبار المفتوح:

1. اختلاط الهواء الخارج من النفاثة مع الهواء الجوي المحيط الساكن حول القناة سوف يؤدي لتخفيض سرعة الجريان وهذا يحد من طول قسم الاختبار *[42]*. لذا يجب حساب طول قسم الاختبار بدقة بحيث تبقى السرعة ضمنه مناسبة لعملية الاختبار وعادة من أجل قسم اختبار مفتوح يؤخذ الطول أكبر من القطر الهيدروليكي لمخرج النفاثة بـ *1.5* حتى *2.5* مرة *[13]*.
2. فواقد الجريان فيه أكبر مقارنة مع قسم الاختبار المغلق *[11]*، لذلك فإن الطاقة المطلوبة لقسم اختبار مفتوح هي أعلى من تلك لقسم اختبار مغلق. كما أن مستوى الضجيج الصادر عنه أعلى*[42,13]*.
3. عند استخدام قسم اختبار مفتوح غالباً ما تكون الاهتزازات عالية.

2.2.1.2 قسم الاختبار المغلق

ميزات قسم الاختبار المغلق:

1. يمكن اعتماد طول قسم الاختبار المغلق أكبر من مثيله المفتوح لأن الجريان داخله لا يختلط مع الهواء المحيط وبذلك فإن سرعة الجريان التي يمكن الوصول إليها في قسم الاختبار المغلق أكبر منها في قسم الاختبار المفتوح عند نفس الشروط *[42,13]*.
2. أبعاد وحدود قسم الاختبار المغلق معرفة بشكل دقيق *[28]*.
3. الضجيج و الاهتزازات الصادرة عنه أقل.

مساوئ قسم الاختبار المغلق:

1. فقد الاحتكاك على الجدران سوف يؤدي إلى زيادة انخفاض الضغط على طول محور الجريان.

2. تأثير نسبة الانسداد عليه يظهر بشكل أكبر من قسم الاختبار المفتوح *[42,13,1]* وهذا يتسبب بجريان حول النموذج في القناة مختلف عن الجريان في الواقع ويجعل قيم مقاومة الهواء أكبر إذا لم يتم تعويض ذلك باستخدام معاملات تصحيح علماً أن معامل تصحيح الانسداد لقسم اختبار مغلق أكبر بمرتين منه لقسم اختبار مفتوح *[42,13]* وعموماً فإن معامل التصحيح اللازم لقسم الاختبار المغلق أكبر من المفتوح *[28]*.
3. في قسم الاختبار المغلق انسداد أثر المخر يزيد من المقاومة بينما يهمل غالباً في قسم الاختبار المفتوح *[1]*.

من المهم عند تصميم قسم الاختبار أن نضمن عدم حدوث انفصام للطبقة الحدية على الجدران لأن ذلك سوف يؤدي إلى تذبذبات عنيفة *[11]*. والاختيار المناسب يتعلق بالدراسة الأيروديناميكية للنماذج المراد اختبارها وأبعاد هذه النماذج. وقد تم بناء قسم الاختبار الذي يمكن استخدامه في الحالتين مغلقاً ومفتوحاً من قبل شركات السيارات خصوصاً وشركات وجامعات أخرى مختصة مما أعطى مرونة أكبر في الاستفادة من الأقنية الهوائية *[43,1]*.

3.1.2 حساب معامل الفقد في قسم الاختبار

نميز بين حالتين:

- **حالة قسم الاختبار المفتوح:**

الفواقد الاحتكاكية في قسم الاختبار المفتوح تعزى بشكل رئيسي إلى الطبقة الاحتكاكية للتيار النافوري الخارج من النفاثة *[30]*. ويعطى معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار بالعلاقة *[30,20,12,11,6,1]*:

$$\zeta_{TS} = \lambda_{TS} \cdot \frac{L_{TS}}{D_{TS}} \qquad (2.2)$$

حيث: L_{TS} ، D_{TS} : الطول والقطر الهيدروليكي لقسم الاختبار.

λ_{TS} : معامل الاحتكاك في قسم الاختبار، بالنسبة لقسم اختبار مفتوح تؤخذ قيمة معامل الاحتكاك عادة $\lambda_{TS} = 0.08$ حسب *[30,11, 1]*.

أو يمكن حساب معامل الفقد لقسم اختبار مفتوح منسوباً للسرعة فيه من العلاقة *[20]*:

$$\zeta_{TS} = 0.0845 \cdot \frac{L_{TS}}{D_{TS}} - 0.0053 \cdot \left(\frac{L_{TS}}{D_{TS}}\right)^2 \qquad (3.2)$$

- **حالة قسم الاختبار المغلق:**

يمكن استخدام العلاقة *(2.2)* لحساب معامل الفقد في قسم الاختبار المغلق منسوباً للسرعة فيه أما معامل الاحتكاك فيحسب من قانون براندل للجريان الأملس هيدروليكياً *[20,11,1]*:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{TS}}} = 2.1\lg(\mathrm{Re}\cdot\sqrt{\lambda_{TS}}) - 0.8 \qquad (4.2)$$

حيث Re هو عدد رينولدز المحسوب استناداً للقطر الهيدروليكي لقسم الاختبار.

وقد تم حساب معامل الفقد في قسم الاختبار حسب *[1]* و*[6]* و*[30]* والجدول *(1.2)* يبين نتائج الحسابات.

الجدول *(1.2)*: معامل الفقد في قسم الاختبار في حالة كونه مفتوحاً ومغلقاً.

العنصر	معامل الفقد ζ منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
قسم الاختبار *(1)*	*0.206*	*0.0293*	*0.182*	*0.0293*	*0.206*	*0.0766*

2.2 الناشرات *(2)*

تعمل الناشرة على تخفيض السرعة، وبالتالي تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة ضغط *[51,1]* لأن الطاقة المهدورة عن طريق الاحتكاك تتناسب مع مكعب السرعة حسب العلاقة *[1]*:

$$\Delta E = \zeta \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \right) \tag{5.2}$$

حيث: ζ معامل الفقد.

أو من الممكن القول أنه في الناشرة تتم عملية استرجاع انخفاض الضغط، ففي الناشرة الأولى *(2.1)* مثلاً يتم استرجاع انخفاض الضغط الذي يحدث من مدخل النفاثة وحتى مخرج قسم الاختبار. مساحة مقطع الناشرة يجب أن تزداد بشكل تدريجي على طول المحور وبمعدلات تمنع أو تحد حدوث انفصام الجريان. وبشكل عام فإنه من المحبذ تخفيض السرعة بأقصر مسافة ممكنة دون حصول انفصام مما يرفع كفاءة القناة ويساهم في تخفيض تكاليف البناء ويجعل حجم القناة الكلي أصغر. زيادة طول الناشرة يقود إلى فقد أكبر في الضغط الستاتيكي بسبب فواقد الاحتكاك على الجدران *[30,1]*، الوصول إلى أداء جيد في الناشرة يحسن أداء القناة بشكل عام مع الانتباه إلى أن أي خطأ تصميمي في الناشرة سوف يسبب انفصام الجريان، الذي يتسبب في حدوث اهتزازات في القناة وتذبذب السرعة في قسم الاختبار إضافة إلى زيادة الفواقد في القناة *[20]*.

حقل الجريان ضمن الناشرة يتأثر بشكل كبير بطبيعة الجريان الخارج من قسم الاختبار، تدرج الضغط المحوري داخل الناشرة يمكن حسابه باستخدام معادلة الاستمرار ومعادلة أويلر الحركية مع إهمال اللزوجة والانضغاطية *[30]*:

$$A_D \cdot V = const \tag{6.2}$$

باشتقاق طرفي المعادلة *(6.2)* مع مراعاة اتجاه الجريان x سوف نحصل على:

$$A_D \cdot \frac{dv}{dx} + v \cdot \frac{dA_D}{dx} = 0 \tag{7.2}$$

يمكن كتابة معادلة أويلر للحالة المستقرة على الشكل التالي:

$$\rho \cdot v \frac{dv}{dx} = \frac{-dp}{dx} \tag{8.2}$$

حيث ρ كثافة السائل و $p(x)$ الضغط الستاتيكي عند أي نقطة x على طول محور الناشرة، من المعادلتين *(7.2)* و *(8.2)* نحصل على معادلة من أجل تدرج الضغط المحوري:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\dot{m}^2}{\rho . A_D^3} \cdot \frac{dA_D}{dx} \qquad (9.2)$$

حيث أن التدفق الكتلي $\dot{m}$ يعطى بالعلاقة:

$$\dot{m} = \rho \cdot V_{TS} \cdot A_{TS} \qquad (10.2)$$

حيث: V_{TS} و A_{TS} السرعة في قسم الاختبار ومساحة مقطع قسم الاختبار على الترتيب.
استرجاع الضغط الكلي على طول الناشرة يحسب بتكامل المعادلة *(9.2)*:

$$\Delta P_D = \int_0^L \left(\frac{dp}{dx} \right) \cdot dx = \int_0^L \left[\frac{\dot{m}^2}{\rho \cdot A_D^3} . \frac{dA_D}{dx} \right] \cdot dx \qquad (11.2)$$

و بالتالي:

$$\Delta P_D = \frac{\dot{m}^2}{2\rho} \cdot \left\{ \frac{1}{A_{Din}^2} - \frac{1}{A_{Dout}^2} \right\} \qquad (12.2)$$

وبذلك فإن استرجاع الضغط في الناشرة يحسب بدلالة التدفق الكتلي، الكثافة ومساحة مقطع الدخول والخروج للناشرة ولا يتعلق بشكل مقطع الناشرة، والضغط الكلي المسترجع للقناة هو مجموع الضغوط المسترجعة من جميع الناشـــرات في دارة القناة *[30]*.

يحدث نوعان من الفواقد في الناشرة: الفقد الناتج عن الاحتكاك والفقد الناتج عن التوسع في المقطـــع، مـــع العلـــم أن الحسابات الأيروديناميكية في الناشرة معقدة وذلك لأن بروفيل الجريان القادم إلى الناشرة يؤثر على حساب الجريان فيهـــا والذي بدوره يتغير بتغير نموذج الاختبار المركب في القناة الهوائية *[1]*. ولتسهيل الحساب سوف نفترض أن معامل الفقد الكلي في الناشرة منسوباً لسرعة المدخل هو مجموع معامل الفقد الاحتكاكي ومعامل الفقد الناتج عن التوسع *[20,1]*:

$$\zeta_D = \zeta_f + \zeta_{ex} \qquad (13.2)$$

و باعتبار أن معامل الاحتكاك الجداري والكثافة ثابتان على طول الناشرة لجريان أحادي البعد نحصل حسب *[1]* علـــى علاقة بين معامل الفقد الاحتكاكي ونسبة توسع الناشرة $AR = \frac{A_{out}}{A_{in}}$ بالصيغة:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{AR^2}) . \frac{\lambda_D}{8 . \sin\theta} \qquad (14.2)$$

حيث أن معامل الاحتكاك λ_D يمكن حسابه من العلاقة *(4.2)* باستخدام عدد رينولدز عند المدخل، و θ نصف زاويـــة انفراج الناشرة وتعرف بالعلاقة:

$$\theta = arc\tan\left(\frac{R_{out} - R_{in}}{L} \right) \qquad (a14.2)$$

باعتبار R_{in} نصف القطر الهيدروليكي لمدخل الناشرة و R_{out} نصف القطر الهيدروليكي لمخرجها و L طولها.
أما حساب الفقد الناتج عن التوسع في المقطع فهو أصعب وتوجد علاقات تجريبية لحسابه *[1]*، حيث يتكون هذا المعامل من حدين: الأول هو تابع لزاوية الانفراج المكافئة والثاني تابع لنسبة توسع الناشرة، و وذلك وفق العلاقة:

$$\zeta_{ex} = \zeta_e(\theta).\left(\frac{AR-1}{AR}\right)^2 \qquad (15.2)$$

المعامل $\zeta_e(\theta)$ يتعلق بزاوية انفراج الناشرة وتعطى قيمته استناداً لشكل المقطع العرضي للناشرة، والعلاقتان *(16.2)* و*(17.2)* تعطيان قيمة هذا المعامل بالنسبة لمقطع دائري ولمقطع مربع *[20,1]*:

$$\zeta_{e(circle)} = \begin{cases} 0.1033 - 0.02389 \cdot \theta & 0 \langle \theta \langle 1.5^\circ \\ 0.1709 - 0.1170 \cdot \theta + 0.03260 \cdot \theta^2 + 0.001078 \cdot \theta^3 \\ -0.0009076 \cdot \theta^4 - 0.00001331 \cdot \theta^5 + 0.00001345 \cdot \theta^6 & 1.5^\circ \le \theta \le 5^\circ \\ -0.09661 + 0.04672 \cdot \theta & \theta \rangle 5^\circ \end{cases} \qquad (16.2)$$

$$\zeta_{e(square)} = \begin{cases} 0.09632 - 0.004152 \cdot \theta & 0 \langle \theta \langle 1.5 \\ 0.1222 - 0.04590 \cdot \theta + 0.02203 \cdot \theta^2 + 0.003269 \cdot \theta^3 \\ -0.0006145 \cdot \theta^4 - 0.00002800 \cdot \theta^5 + 0.00002337 \cdot \theta^6 & 1.5^\circ \le \theta \le 5^\circ \\ -0.01322 + 0.05866 \cdot \theta & \theta \rangle 5^\circ \end{cases} \qquad (17.2)$$

θ : نصف زاوية انفراج الناشرة مقاسة بالدرجة.

عدد الناشرات في القناة المدروسة أربع: *(2.4-2.1)* بأبعاد و مواقع مختلفة، الناشرات *(2.1 و 2.2)* تعمل على زيادة المقطع وصولاً إلى مساحة المقطع المطلوب لقسم المروحة، علماً أن الناشرة *(2.2)* لها وظيفة التحويل من مقطع مستطيل لمقطع دائري لأن القسم الذي يليها هو قسم المروحة ويجب أن يكون دائرياً، الناشرة *(2.3)* تعمل على تخفيض سرعة الجريان الذي سيمر على الكوعين *(3.3 و 3.4)* لتقليل الضياعات في الدارة، الناشرة القصيرة *(2.4)* تعمل على زيادة المقطع بأقصر طول ممكن لمنع الانفصام وصولاً لمساحة مقطع الدخول للنفاثة *(9)*.

كما يمكن حساب معامل الفقد في الناشرة بطرق أخرى:

- يعطى معامل الفقد في الناشرة حسب *[30]* منسوباً للسرعة في قسم الاختبار بالعلاقة:

$$\zeta_D = \left[\frac{\lambda_D}{8 \cdot \tan(\theta)} + 0.6 \cdot \tan(\theta)\right] \cdot \left[1 - \frac{D_{in}^4}{D_{out}^4}\right] \cdot \frac{D_{TS}^4}{D_{in}^4} \qquad (18.2)$$

حيث: λ_D : معامل الاحتكاك الوسطي كمتوسط لمعاملي الاحتكاك عند مدخل ومخرج الناشرة.

D_{in} ، D_{out} : الأقطار الهيدروليكية عند مدخل ومخرج الناشرة. $D = 4A/U$ حيث A مساحة المقطع، U المحيط.

معامل الاحتكاك يحسب حسب *[30]* باستخدام عدد رينولدز المحسوب استناداً للقطر الهيدروليكي والسرعة في المقطع المراد حساب معامل الاحتكاك فيه باستخدام معادلة هالند ***Haaland*** وافتراض أن الجريان مضطرب أملس – خشن هيدروليكياً:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_D}} = -1.8 \cdot \log\left[\frac{6.9}{\mathrm{Re}_D} + \left(\frac{\Delta/D}{3.7}\right)^{1.11} \right] \qquad (19.2)$$

حيث Δ الخشونة المطلقة، وقد اعتمدنا القيمة $\Delta = 0.0016m$ في الحسابات.

وللتأكد من نتائج هذه العلاقة طبقنا لحساب λ_D قانون كوليبروك – وايت *[3]* بالصيغة:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_D}} = -2 \cdot \log\left[\frac{2.51}{\mathrm{Re}_D \cdot \sqrt{\lambda_D}} + \frac{\Delta/D}{3.7} \right] \qquad (a19.2)$$

ووجدنا أن قيم λ_D متقاربة. لذلك اعتمدنا في حساباتنا علاقة هالند لسهولة تطبيقها.

- وحسب *[6]* نجد:

معامل الفقد الناتج عن التوسع:

$$\zeta_{ex} = \varphi_{ex} \cdot k \cdot \left(1 - \frac{A_{in}}{A_{out}}\right)^2 \qquad (20.2)$$

حيث: φ_{ex} معامل الفقد الصدمي، k معامل تصحيح لعدم انتظام توزع السرعة عند مدخل الناشرة ويحدد من الشكل *(4.2)*

من أجل ناشرة ذات مقطع دائري وزاوية انفراج الناشرة $0 \langle 2\theta \langle 40^\circ$ يعطى φ_{ex} بالعلاقة:

$$\varphi_{ex} = 3.2 \cdot (tg\,\theta)^{5/4} \qquad (21.2)$$

من أجل ناشرة ذات مقطع مستطيل أو مربع وزاوية انفراج الناشرة $0 \langle 2\theta \langle 25^\circ$ يعطى φ_{ex} بالعلاقة:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg\,\theta)^{5/4} \qquad (21.2)$$

معامل الفقد الاحتكاكي:

$$\zeta_f = \frac{\lambda}{16} \cdot e.(f + f') \qquad (23.2)$$

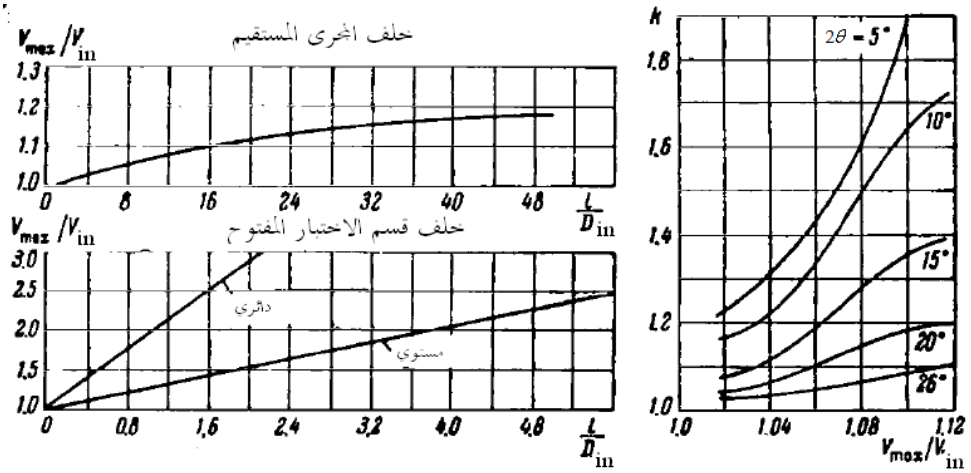
حيث: e ، f ، f' معاملات تحسب من العلاقات التالية:

$$f = \frac{1}{\sin\theta} \quad , \qquad f' = \frac{1}{\sin\alpha} \quad , \quad e = 1 - \left(\frac{A_{in}}{A_{out}}\right)^2 \qquad (24.2)$$

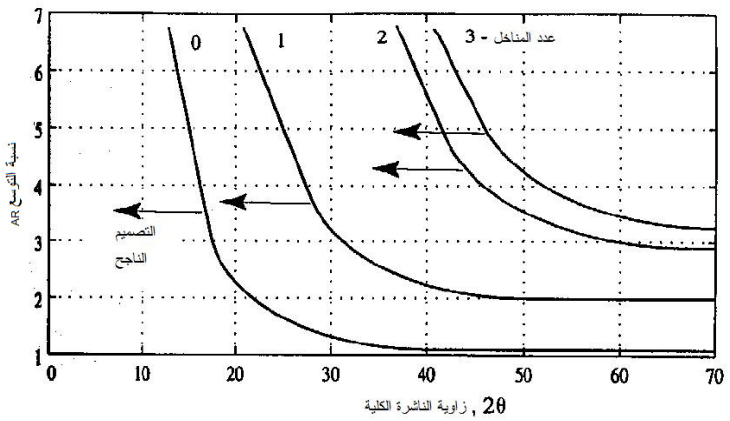
كما يتم إضافة قسم مجمع بشكل فوهة جرسية *(2.1.1)* قبل الناشرة الأول *(2.1)* والذي يكتسب أهمية خاصة في حالة قسم الاختبار المفتوح *[42]*، حيث يعمل على تجميع الهواء القادم وتوجيهه إلى الناشرة الأولى. تبلغ قيمة معامل الفقد لقسم المجمع منسوبة للسرعة في قسم الاختبار في حالة قسم الاختبار المفتوح حسب [6,1] *0.008* وحسب *[30] 0.0763*، وفي حالة قسم الاختبار المغلق حسب *[6,1] 0.004* وحسب *[30] 0.011*.

1.2.2 الناشرة القصيرة *(2.4)*

الناشرة القصيرة يتم تركيبها بين الكوع الرابع وحجرة استقرار الجريان، وقد سمي هذا النوع من الناشرات بهذا الاسم نظراً لأنها تعمل على زيادة المقطع بأقصر طول ممكن لمنع الانفصام وصولاً لمساحة مقطع الدخول للنفاثة، وفي بعض الحالات يتم تركيب مناخل داخل هذه الناشرة من أجل إزالة التأثيرات المباشرة لنمو الطبقة الحدية والانفصام، حيث أنه في ناشرة قصيرة يمكن استخدام عدة مناخل ذات معامل فقد ζ منخفض نسبياً (أقل من *1.5*) *[36]*، وعند تصميم الناشرة يجب تحديد ζ وعدد المناخل المركبة فيها إن كان هناك ضرورة لتركيب عدد من المناخل داخل هذه الناشرة، والجريان الخارج من الناشرة يجب أن يكون منتظماً وذا مستوى اضطراب منخفض. في الشكل *(5.2)* مثلت نسبة توسع الناشرة *AR* كتابع لزاوية انفراج الناشرة مع وبدون استخدام مناخل. في القناة المدروسة لن نستخدم مناخل في الناشرة القصيرة. وسيتم حساب معامل الفقد لهذه الناشرة وفق العلاقات الموضحة سابقاً للناشرات.



الشكل *(4.2)*: تأثير عدم انتظام السرعة عند مدخل الناشرة $\left(V_{\max}/V_{in}\right)$ على مقاومة الناشرة (المعامل k) *[6]*. حيث L طول الناشرة، D_{in} القطر الهيدروليكي عند المدخل، $V_{\max}$ السرعة الأعظمية في مدخل الناشرة، V_{in} السرعة الوسطية عند مدخل الناشرة، k معامل تصحيح عدم انتظام توزع السرعة حسب *[6]*.



الشكل *(5.2)*: توضيح العلاقة بين زاوية انفراج الناشرة القصيرة ونسبة التوسع وعدد المناخل *[36,1]*.

وقد تم حساب معامل الفقد في الناشرات حسب *[1]* و*[6]* و*[30]* والجدول *(2.2)* يتضمن نتائج الحسابات.

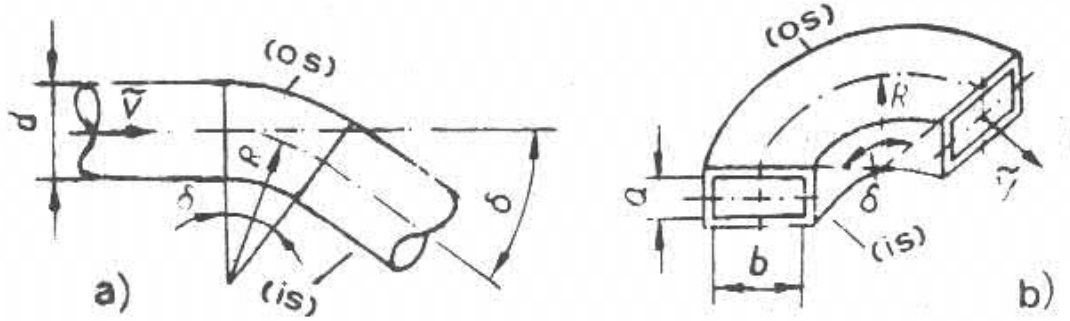
الجدول *(2.2)*: معامل الفقد في الناشرات في حالة كون قسم الاختبار مفتوحاً ومغلقاً.

العنصر	معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
الناشرة *(2.1)*	*0.089*	*0.089*	*0.086*	*0.086*	*0.072*	*0.072*
الناشرة *(2.2)*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.009*	*0.009*
الناشرة *(2.3)*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.0026*	*0.0026*
الناشرة القصيرة *(2.4)*	*0.002*	*0.002*	*0.004*	*0.004*	*0.009*	*0.008*
مقطع انتقالي *(7)*	*0.004*	*0.004*	*0.006*	*0.006*	*0.005*	*0.005*

3.2 الأكواع وريش التوجيه *(3)*

الفواقد في الأكواع أكبر بكثير من الفواقد في أنبوب له نفس المواصفات وطوله يعادل طول قوس الكوع *[3]*. من معادلة أويلر باتجاه الناظم على خطوط التيار المقوسة، وبسبب تعرض جزيئات السائل لقوى نابذة، فإن الضغط يتناقص باتجاه مركز انحناء الكوع: $\partial p/\partial n = -\rho V^2/R$، حيث R نصف قطر انحناء الكوع الشكل *(6.2)*، هذا يعني أن الضغط على الجدار الخارجي للكوع أكبر من الضغط على جداره الداخلي، بينما يعتبر الضغط الستاتيكي ثابتاً على مقطع الأنبوب المستقيم *[3]*.

يبدو واضحاً من الشكل *(7.2)* أن الضغط يتزايد على الجدار الخارجي للكوع اعتباراً من نقطة بدء انحناء الجدار A وحتى نهاية انحنائه B تقريباً، بينما يتناقص الضغط على الجدار الداخلي للكوع اعتباراً من مقطع دخول الجريان للكوع C وحتى ذروة انحناء الجدار تقريباً، ثم يعود فيتزايد حتى مقطع الخروج من الكوع، وعليه فإن جزيئات السائل في الطبقة الحدية ذات القدرة الحركية الضعيفة نسبياً ستتحرك في المجالين $B\text{-}A$ و $C\text{-}D$ ضد ضغط متزايد، مما يؤدي لحدوث ظاهرة الانفصام عن الجدار وتشكل الأعاصير، وتنجم عن ذلك خسارة في الضغط تكون أكبر كلما كانت حدة انحناء الكوع أكبر، أي زاوية الانحناء δ أصغر *[3]*.

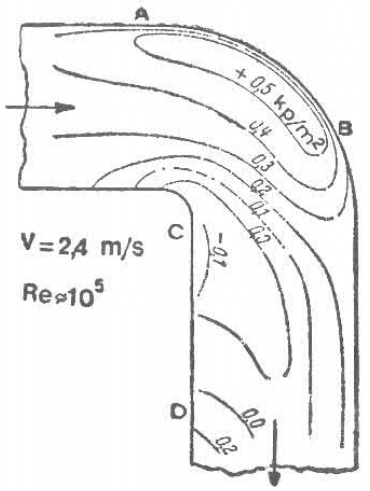


الشكل *(6.2)*: تعريف هندسة الكوع المحني بشكل قوس دائري:

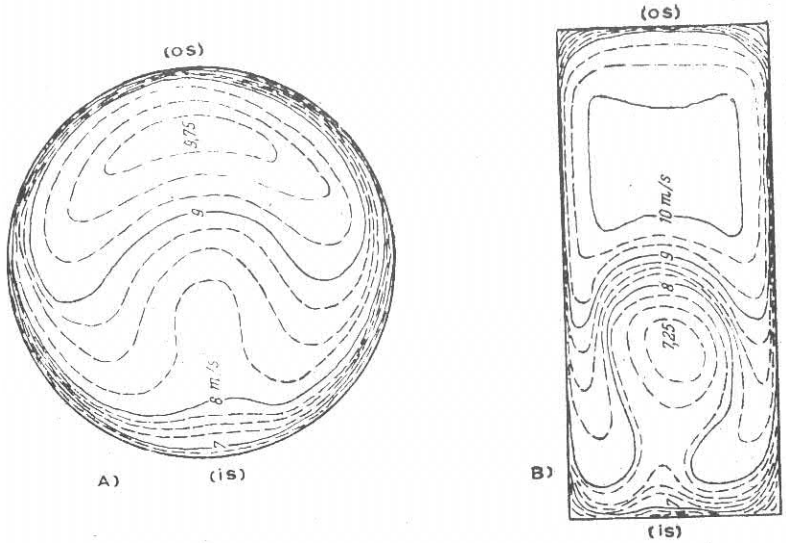
a) مقطع دائري بقطر d، b) مقطع مستطيل بارتفاع a و عرض b، R نصف قطر الانحناء،

δ زاوية الانحراف، *(os)* الجدار الخارجي، *(is)* الجدار الداخلي *[3]*.

تغيير اتجاه الجريان في الكوع سيؤدي لنشوء جريانات ثانوية تتراكب مع الجريان الرئيسي في الكوع وتؤثر بشكل حاسم على بروفيل توزع السرعة على مقطع الكوع *[3]*، وكما هو واضح من الشكل *(8.2)* فإن السرعة الأعظمية في المقطع النهائي للكوع تسود على مقربة من جداره الخارجي وفي منطقة مغلقة وذلك سواءً كان مقطع الكوع دائرياً أو مستطيلاً. يعزى سبب تكون الجريانات الثانوية إلى تناقص الضغط باتجاه مركز الانحناء، وبالتالي فإن جزئيات السائل القريبة من الجدار العلوي والسفلي للكوع ذات القدرة الحركية الضعيفة لتأثرها الشديد بقوى الاحتكاك الناتجة عن اللزوجة تتحرك باتجاه تناقص الضغط، أي من الجدار الخارجي باتجاه الجدار الداخلي للكوع، في الوقت الذي تتحرك فيه جزيئات السائل في منطقة نواة الجريان، بحكم شرط الاستمرار ومن على طرفي خط التيار المركزي للكوع، باتجاه الخارج، وهكذا تنشأ حركة عرضانية على محور الكوع تأخذ شكل إعصار مضاعف، ولا تختلف الحالة إذا كان المقطع دائرياً أو مستطيلاً، ونتيجة لتراكب الجريانات الثانوية مع الجريان الرئيسي، فإن خطوط التيار للجريان الإجمالي في الكوع تصبح حلزونية، ويسبب ذلك كله فواقد إضافية *[3]*.



الشكل *(7.2)*: توزع الضغط داخل كوع ، $\delta = 90^\circ$ مثلاً،بخطوط الضغط الثابت ، حسب قياسات كوردير، (+) ضغط زائد ، (−) ضغط ناقص *[3]*.



الشكل *(8.2)*: توزع السرعة على مقطع كوع ممثلاً بخطوط السرعة الثابتة على المقطع النهائي للكوع ، حسب قياسات نيبرت ، A) كوع ذو مقطع دائري ، B) كوع ذو مقطع مستطيل ، *(os)* الجدار الخارجي ، *(is)* الجدار الداخلي *[3]*.

تتحدد مصادر الفواقد في الأكواع بثلاثة *[3]*:

1. الفواقد الناتجة بسبب الاحتكاك على جدران الكوع، هذه الفواقد يمكن التعبير عنها بمعامل فقد:

$$\zeta_f = \psi \frac{L}{D_h} \qquad (25.2)$$

حيث ψ معامل المقاومة الذي يمكن تحديده من مخطط المقاومة العام *[3]*، مثلاً، D_h القطر الهيدروليكي ويكون في حالة كوع بشكل ربع دائري وذي مقطع دائري: $L = 2\pi R/4$ ، و بالتالي $\zeta_f = \psi \cdot \pi R/2D$ ، حيث R نصف قطر الانحناء.

2. الفواقد الناتجة عن انفصام الطبقة الحدية وتشكل الأعاصير.
3. الفواقد الناتجة عن الجريانات الثانوية، التي تدمج غالباً مع فواقد الانفصام لتشكل مجتمعة فواقد الانعطاف أو الانحناء، ويعبر عنها معامل فقد الانعطاف ζ_d.

إن خسارة الضغط الإجمالية (الفقد الإجمالي) لكوع $\Delta p_{v_{ot}}$ تقاس بوصل مانومتر تفاضلي بين نقطتين من الأنبوب المستقيم على مسافة كافية قبل مدخل وبعد مخرج الكوع نفسه، كما يمكن قياس (أو حساب) خسارة الضغط الناتجة عن الاحتكاك Δp_{v_w} بعد تحديد الطول l المعادل لطول قوس الكوع، و تكون عندئذ:

$$\Delta p_{v_{tot}} = \Delta p_{v_w} + \Delta p_{v_d} = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} V^2 = (\zeta_w + \zeta_d) \cdot \frac{\rho}{2} V^2 \qquad (26.2)$$

حيث ζ معامل الفقد الإجمالي للكوع، وتتعلق قيم معاملي الفقد ζ و ζ_d بعدد رينولدز، بنسبة الانحناء R/D، بزاوية الانعطاف δ وكذلك بخشونة الجدار، إضافة لذلك يؤثر شكل مقطع الكوع وكذلك نسبة مقطع الدخول إلى مقطع الخروج على قيمة ζ *[3]*.

فواقد الأكواع في الأقنية الهوائية المغلقة عادة ما تشكل نسبة عالية من قيمة الفواقد الإجمالية، ولتقليلها تركب ريش توجيه للحد من تأثير انحراف الجريان. ريش التوجيه ممكن أن تكون شفرات منحنية رقيقة تصنع عادة من الصفائح المعدنية أو تكون بشكل بروفيل وتركب في أكواع القناة الهوائية الأربعة، وظيفتها توجيه الجريان وتقليل الفواقد وتجنب انفصام الطبقة الحدية في الكوع *[31]*، والفواقد الناتجة عن ريش التوجيه في الكوع يمكن تقليلها بطريقتين *[20,1]*:

1. باختيار شكل فعال للمقطع العرضي للريشة.
2. باختيار نسبة مناسبة بين طول الوتر والفراغ الفاصل بين ريشتي توجيه متتاليتين.

عادة ما تكون الأكواع ذات مساحة مقطع ثابتة، والكوعان الأكثر أهمية هما اللذان يسبقان المروحة لأن الجريان الذي يدخل المروحة يجب أن يكون منتظماً ولأن السرعة فيهما أكبر من السرعة في الكوعين الآخرين *[1]*. الشكل *(9.2)* يبين بروفيلات مختلفة لريش التوجيه.

في التجارب المبكرة التي أجريت في جوتنجن بألمانيا كانت قيمة معامل الفقد في الأكواع من مرتبة *0.15* مع ريش توجيه *[1]* عند عدد رينولدز *500,000* ، وقد توصلوا إلى أن الاحتكاك الجداري على ريش التوجيه يشكل تقريباً ثلث الفقد المكاني الحاصل في الكوع والثلثين الباقيين سببها الأعاصير المتشكلة على طول الكوع أو الأعاصير الناشئة عن تحول اتجاه الجريان ثلاثي البعد داخل الكوع.

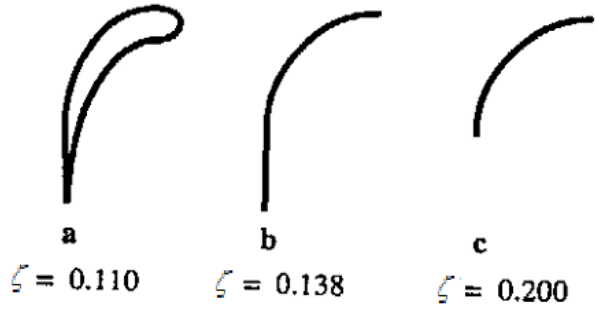
واتندورف *Wattendorf* اعتبر أن معامل الفقد المكاني في الكوع مكون من جزئين ζ_f الناتج عن الاحتكاك الجداري و ζ_r الناتج عن الدوران *[1]*. الجزء الناتج عن الاحتكاك الجداري اعتبره تابعاً لعدد رينولدز بطريقة مماثلة للاحتكاك

الجداري على صفيحة مستوية، واستناداً إلى ما سبق يمكن استخدام العلاقة *(27.2)* لحساب معامل الفقد المكاني في الأكواع المركب فيها ريش توجيه من النوع المبين في الشكل *(9.2)*، حيث يحسب عدد رينولدز الوارد في العلاقة بالاعتماد على طول وتر الريشة:

$$\zeta_c = 0.1 + \frac{4.55}{(\lg \mathrm{Re}_c)^{2.58}} \qquad (27.2)$$

$$\mathrm{Re}_c = \frac{V \cdot c}{\upsilon}$$

حيث: c طول وتر ريشة التوجيه.



الشكل *(9.2)*: بروفيلات ريش التوجيه *[1]*

تتضمن المراجع العلمية الاختصاصية علاقات مختلفة وجداول لحساب معامل الفقد لكوع مجهز بريش توجيه. فحسب *[30]* مثلاً يحسب معامل الفقد الإجمالي منسوباً للسرعة في قسم الاختبار المؤلف من فواقد احتكاك وفواقد انعطاف من العلاقة:

$$\zeta_c = \left[0.1 + \frac{4.55}{(\log \mathrm{Re}_c)^{2.58}}\right] \cdot \left(\frac{D_{TS}}{D_c}\right)^4 \qquad (28.2)$$

حيث: Re_c : عدد رينولدز المحسوب استناداً لطول وتر الريشة، D_c : القطر الهيدروليكي للكوع.

وحسب *[6]* يمكن تحديد معامل الفقد في الأكواع من الجدول *(3.2)*.

أسس تحديد عدد ريش التوجيه وأنواعها واختيار ريش التوجيه للقناة المدروسة موجودة في الفصل الثالث (انظر ص*48*).

وقد تم حساب معامل الفقد في الأكواع حسب *[1]* و*[6]* و*[30]* والجدول *(4.2)* يبين نتائج الحسابات.

الجدول *(4.2)*: معامل الفقد في الأكواع في حالة كون قسم الاختبار مفتوحاً ومغلقاً.

العنصر	معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
الكوع *(3.1)*	*0.0317*	*0.032*	*0.043*	*0.043*	*0.0317*	*0.032*
الكوع *(3.2)*	*0.0317*	*0.032*	*0.043*	*0.043*	*0.0317*	*0.032*
الكوع *(3.3)*	*0.009*	*0.009*	*0.017*	*0.017*	*0.009*	*0.009*
الكوع *(3.4)*	*0.009*	*0.009*	*0.017*	*0.017*	*0.009*	*0.009*

الجدول (3.2): معاملات الفقد لأكواع بزاوية 90° ذات أنواع مختلفة مع وبدون ريش توجيه [6].

شكل المقطع العرضي	نوع ريش التوجيه	عدد ريش التوجيه	نصف قطر تقوس الكوع	قيمة معامل الفقد					
				r/b=0	r/b=1	r/b=2	r/b=3	r/b=4	r/b=5	r/b=6
مربع			متغير	1.3	0.8	0.5	0.36	0.3	0.27	0.25
مستطيل	حاج حامل	2.12*(b/r)-1	متغير	0.33	0.23	0.17	0.16	0.17	0.22	0.31
مستطيل	حاج حامل	1.4*(b/r)	متغير	0.33	0.23	0.15	0.11	0.13	0.19	0.3
مستطيل	صفائح	7.5	متغير			0.15				
دائري	حاج حامل	(3D/t) - 1	r/D = 0.18			0.26				
دائري	حاج حامل		0			0.33				

D القطر الهيدروليكي لمقطع المدخول للكوع، r نصف قطر تقوس الكوع، b عرض مدخل الكوع

4.2 قسم المروحة (6)

هذا القسم يضم كلاً من الغلاف المعدني الذي تتوضع فيه المروحة والمحرك وريش التوجيه قبلها و/أو بعدها كقسم كامل الشكل (10.2). الغرض من هذا الترتيب هو أن يتم تقديم جريان منتظم قدر الإمكان قبل المروحة وبعدها.

نسبة مساحة المقطع بين المروحة وقسم الاختبار هي عادة بين *2:1* أو *3:1 [1]*. إذا كانت هذه النسبة أكبر من ذلك فهناك احتمال أن يؤثر ذلك على توزع وبروفيل السرعة في الجريان القادم إلى المروحة كما سيؤدي ذلك لزيادة في الكلفة بسبب زيادة أبعاد المروحة، أما إذا كانت نسبة المساحة أصغر فإن سرعة الجريان القادم للمروحة ستكون أكبر وسرعة دوران المروحة ستكون أكبر *[1]*.

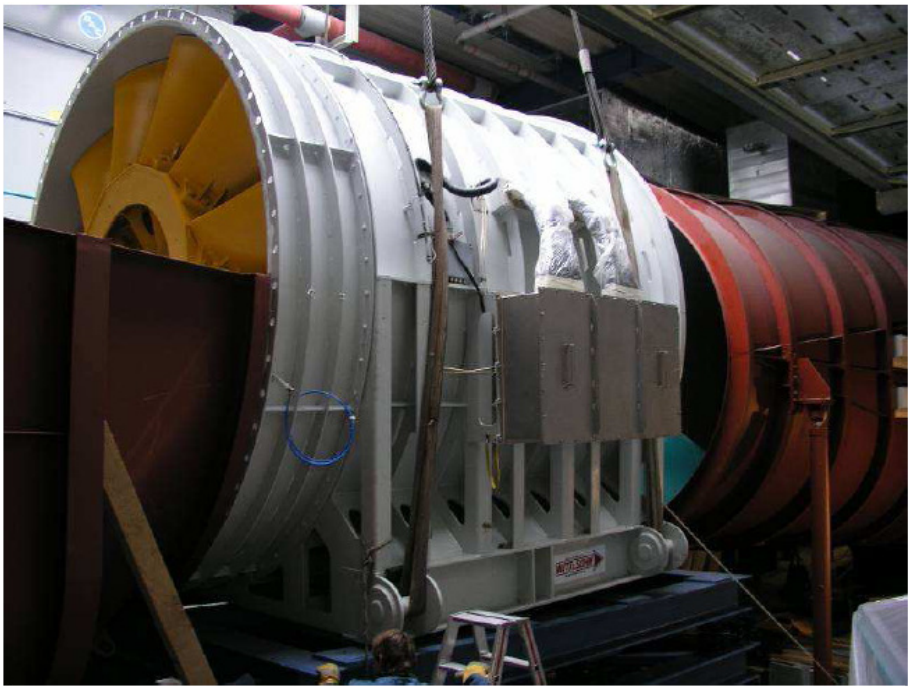
يتم تركيب المروحة عادة بعد الكوع الثاني في دارة القناة الهوائية المغلقة، أحياناً يتم تركيبها بين الكوع الأول والثاني ونادراً ما يتم تركيبها بين قسم الاختبار والكوع الأول. يرتفع أداء المروحة إذا تم تركيبها في مكان عالي السرعة نسبياً وكلفتها تتناسب مع أبعادها. من الأفضل أن تكون المروحة بعيدة ما أمكن عن قسم الاختبار لكي لا تؤثر على التجارب المنفذة فيه من حيث الضجيج والاهتزاز اللذين تصدرهما، بعد الناشرة الثانية تكون المساحة وسرعة الجريان مناسبتين لتركيب المروحة لذا فإن هذا المكان يبقى الأكثر ملاءمة لتركيب المروحة فيه *[1]*.

إذا تم استخدام جهاز للتحكم بسرعة دوران المروحة فإن ميزة توجيه الريش تعطي تحكماً أكبر بالسرعة من نظام التحكم بسرعة دوران المروحة لكن تكلفتها أعلى.

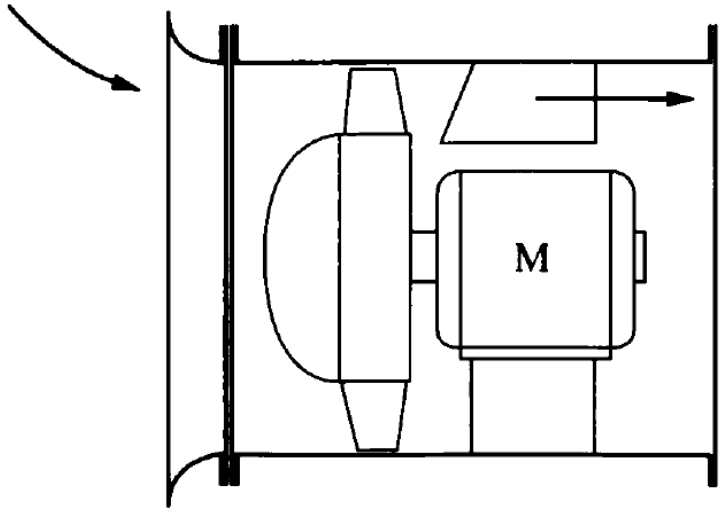
الزيادة في الضغط الكلي الذي تولده المروحة يجب أن تطابق خسارة الضغط الكلية لجميع مكونات القناة الهوائية، مع العلم أن حساب استطاعة المروحة المطلوبة للقناة تم إدراجه في الملحق *(A)* (الفقرة *1.11* ص*147*).

من أجل الحصول على أداء جيد في المراوح المحورية فإن جريان الهواء يجب أن يكون موزعاً بانتظام على كامل المقطع العرضي لقسم المروحة وسرعة جريان الهواء يجب أن تكون لها قيمة ثابتة من الصرة وحتى رأس الريشة. لكن في الحالات العملية سرعة الجريان تكون منخفضة بالقرب من المركز وتزداد باتجاه رأس الريشة، لذلك يتم فتل الريشة بحيث تكون زاوية الورود أكبر بالقرب من المركز وأصغر باتجاه رأس الريشة *[75]*.

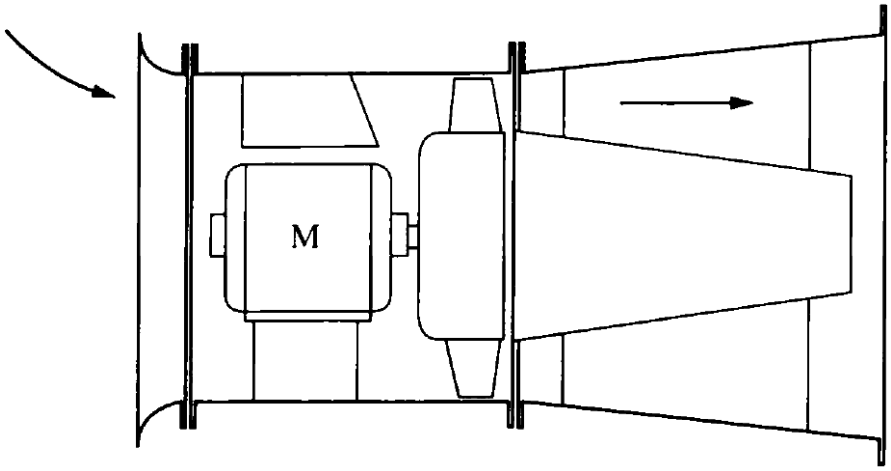
الشكلان *(11.2)* و*(12.2)* يوضحان مروحة مركبة داخل مجرى هوائي أسطواني كما يوضحان المحرك ودعائمه ومجموعة من شفرات التوجيه المركبة حول المحرك. المحرك وريش التوجيه يمكن أن تركب خلف دولاب المروحة أو قبله.



الشكل *(10.2)*: قسم المروحة وكيفية تركيبه في القناة الهوائية *[83]*.



الشكل *(11.2)*: مروحة مركبة داخل مجرى هواء ومزودة بشفرات توجيه خلفها حول المحرك *[75]*.



الشكل *(12.2)*: مروحة مركبة داخل مجرى هوائي وشفرات توجيه قبلها مركبة حول المحرك *[75]*.

1.4.2 شفرات التوجيه بعد وقبل المروحة

الجريان الذي يسبق المروحة له شكل حلزوني. وظيفة شفرات التوجيه هي إزالة أو على الأقل تقليل الحركة الدورانية للجريان الذي يمر على ريش المروحة، توجد طريقتان لتركيب شفرات التوجيه لتقوم بعملها بتقليل الضياعات، حيث يمكن تركيبها على جانب المخرج أو على جانب المدخل بالنسبة لريش المروحة، في حال تركيبها من جهة المخرج فإن الضغط الستاتيكي الذي يتم توليده يكون جزء منه عن طريق ريش المروحة وجزء آخر عن طريق شفرات التوجيه، أما في حال تركيبها على المدخل فإنها لا تساهم في توليد الضغط ولكن تقوم فقط بتحضير الجريان القادم للمروحة.

لدراسة نوعي شفرات التوجيه يتم دراسة الجريان عبر شبك بروفيلات مستقيم للحالتين أي تركيب شفرات التوجيه قبل المروحة وبعدها، كما في الشكل *(13.2)* لشفرات التوجيه المركبة بعد المروحة والشكل *(14.2)* لشفرات التوجيه المركبة قبل المروحة، هذان الشكلان يوضحان ريش المروحة وشفرات التوجيه بالإضافة لأشعة السرعة لجريان الهواء عبر ريش المروحة وشفرات التوجيه.

الشكل *(13.2)* يوضح كيف يعبر جريان الهواء أولاً ريش المروحة الدائرة ثم شفرات التوجيه. يكتسب جريان الهواء الذي يمر على ريش المروحة حركة دورانية ويترك ريش المروحة بسرعة V_1 هذه السرعة لها مركبة محورية V_0 ومركبة دورانية V_r يمكن حساب V_0 التي تساوي V_2 من معادلة الاستمرار، أما V_1 فتحسب من العلاقة:

$$V_1 = \sqrt{V_0^2 + V_r^2} \qquad (29.2)$$

إن V_1 أكبر من V_0 بحوالي $20 - 30\ \%$ عند الصرة وعند الرأس بحوالي $10 - 15\ \%$، المركبة الدورانية للسرعة تحسب من المعادلة التالية *[75]*:

$$V_r = \frac{23672}{n} \cdot \frac{\Delta P}{r} \qquad (30.2)$$

حيث: V_r المركبة الدورانية للجريان الحلزوني *[m/s]*، r نصف قطر المروحة *[m]*، ΔP الضغط الذي تولده المروحة *[pa]*، n سرعة دوران المروحة *[rpm]*.

بعد ذلك يعبر الجريان شفرات التوجيه التي تعمل على تخليصه من المركبة الدورانية وإرجاعه للاتجاه المحوري، ثم يترك شفرات التوجيه بسرعة V_2 مساوية لـ V_0 حسب شرط الاستمرار، وبالتالي في قسم شفرات التوجيه يتم كبح الجريان من السرعة V_1 إلى V_0، جزء من الفرق بين السرعتين يتم تحويله إلى ضغط ستاتيكي.

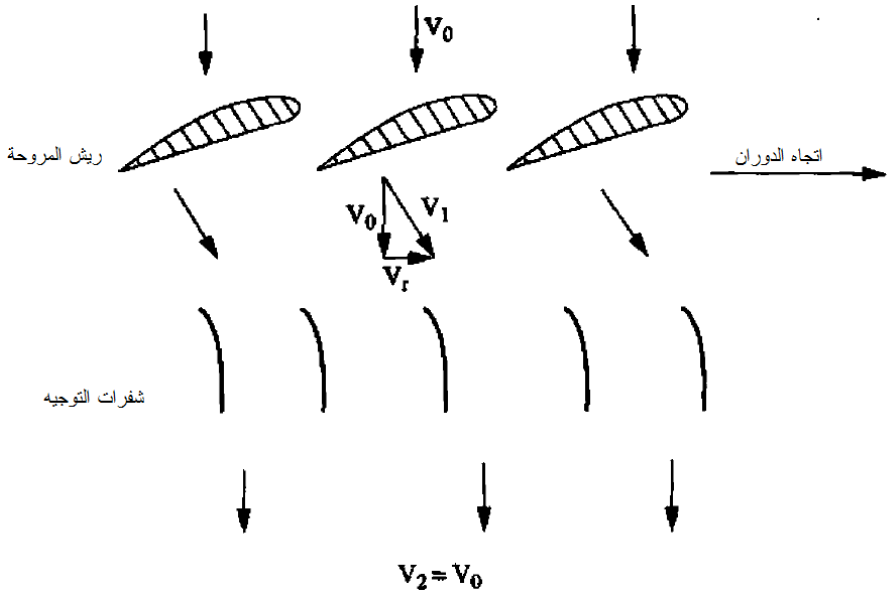
إن وظيفة شفرات التوجيه التي تركب قبل المروحة الموضحة في الشكل *(14.2)* مختلفة، هنا يتم سحب الهواء أولاً عبر قسم شفرات التوجيه الثابتة، هذه الشفرات تكون مقوسة بطريقة تمكنها من أن تعطي جريان الهواء حركة حلزونية مركبتها الدورانية معاكسة لجهة دوران المروحة، هذه المركبة الدورانية يجب أن تكون كافية لإزالة المركبة الدورانية التي ستعطيها ريش المروحة للجريان لاحقاً، نتيجة لذلك فإن الهواء يجب أن يترك ريش المروحة باتجاه محوري تقريباً، سرعة الجريان بالقرب من شفرات التوجيه تحسب من معادلة الاستمرار.

أيضاً هنا V_1 أكبر من V_0، عندما يمر الهواء خلال ريش المروحة الدائرة يتم حرفه مرة أخرى للاتجاه المحوري تقريباً ويتم كبح السرعة ويتحول جزء من الفرق بين السرعتين V_0 و V_1 إلى ضغط ستاتيكي.

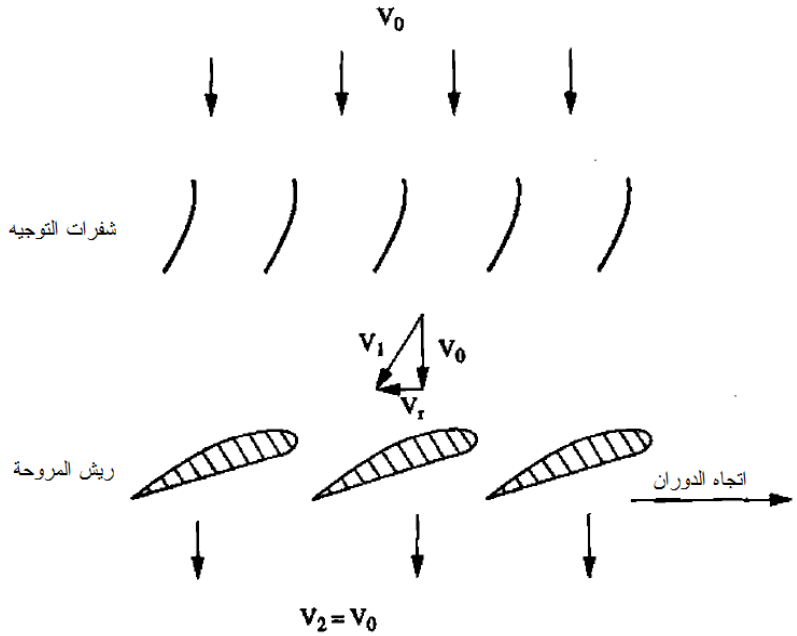
إن تركيب شفرات التوجيه عند مخرج المروحة هي المفضلة في معظم الحالات، لكن في بعض الحالات يتم استخدام الريش المركبة قبل المروحة تكون، مثلاً عندما يجب أن يكون المحرك على جانب المدخل لكي يكون الوصول إليه أكثر سهولة وشفرات التوجيه يجب أن تكون حول المحرك لتوفير المساحة، أو إذا كان من المتوقع وجود اضطراب قوي عند المدخل بهذا فإن شفرات التوجيه عند المدخل ستعطي جريان الهواء فرصة لكي يصبح أقل اضطراباً قبل أن يصل لريش المروحة الدائرة، لكن شفرات التوجيه المركبة قبل المروحة لها المساوئ التالية:

1. شكل شفرات التوجيه التي تسبق المروحة له تأثير على ريش المروحة ويجب إيلاؤه اهتماماً أكبر من شفرات التوجيه التي تركب بعد المروحة.
2. ترفع مستوى الضجيج الصادر عن المروحة.
3. الكبح من V_1 إلى V_2 مع التحويل الجزئي المترافق للطاقة الحركية أو ضغط السرعة إلى طاقة كامنة أو ضغط ستاتيكي لجريان الهواء يتم عمله عن طريق ريش المروحة الدائرة في حالة شفرات التوجيه التي تسبق المروحة لكن بواسطة شفرات التوجيه في حال تركيبها بعد المروحة، وبالتالي شفرات التوجيه المركبة بعد المروحة ستقدم استرجاع ضغط أكبر من تلك المركبة قبل المروحة.

بهذا يمكن القول بأن شفرات التوجيه المركبة بعد المروحة ستكون الأكثر تفضيلاً في معظم التطبيقات وسوف نختار ذلك في القناة المدروسة.



الشكل *(13.2)*: توضيح وظيفة شفرات التوجيه المركبة بعد ريش المروحة، حيث تعمل على تقويم الجريان الحلزوني الذي تولده المروحة وتعيده إلى الاتجاه المحوري، نتيجة لذلك فهي تكبح الجريان من السرعة V_1 إلى V_2 *[75]*.



الشكل *(14.2)*: توضيح عمل شفرات التوجيه المركبة قبل المروحة، التي تعمل على إعطاء حركة حلزونية للجريان القادم بمركبة دورانية بجهة معاكسة لجهة دوران المروحة، ثم تقوم ريش المروحة بإعطاء الجريان حركة دورانية معاكسة، نتيجة لذلك يتم كبح السرعة من V_1 إلى V_2 *[75]*.

5.2 حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*

في حجرة استقرار الجريان تجري عملية تقويم الجريان لجعله منتظماً، وتضم حجرة استقرار الجريان خلايا عش النحل والمناخل. هذه العناصر تساعد على زيادة جودة الجريان تمهيداً لدخوله إلى قسم الاختبار، حجرة استقرار الجريان يجب أن تكون بطول كافٍ من أجل تحطيم عناصر الاضطراب المتبقية في الجريان الخارج من المناخل وخلايا عش النحل ولكن مع مراعاة عدم جعلها أطول من اللازم لكي لا نسمح بزيادة سماكة الطبقة الحدية في نهاية قسم حجرة استقرار الجريان *[30]*.

تركب حجرة استقرار الجريان بين الناشرة القصيرة والنفاثة والسرعة الوسطية في حجرة استقرار الجريان تبلغ تقريباً *1/9* من السرعة في قسم الاختبار *[12]*، عادة يتم تركيب خلايا عش النحل قبل المناخل، عدد هذه العناصر وقيمة معامل الفقد تعتمد على مستوى الاضطراب المطلوب في قسم الاختبار، إذا كان من المتوقع أن يكون هناك أعاصير في الجريان القادم من الناشرة القصيرة فإنه ينصح بتركيب منخل قبل خلايا عش النحل، خلايا عش النحل يجب أن تركب بعيدة قليلاً عن مخرج الناشرة القصيرة وبذلك فإن الجريان يملك فرصة ليصبح أكثر انتظاماً. المنخل الأخير يجب أن يكون بعيداً كفاية عن النفاثة وبذلك فإن سرعة الجريان تبقى ثابتة على كامل المقطع العرضي قرب مدخل النفاثة حيث الجريان يبدأ بالتباطؤ بالقرب من الجدران ويتسارع بالقرب من المحور *[52]*.

الفواقد في حجرة التهدئة تتألف من:

- فواقد احتكاك الجدران.
- الفقد في المناخل.
- الفقد في خلايا عش النحل.

الفواقد التي تحدث في هذه الحجرة تعزى بشكل رئيسي إلى الاحتكاك على جدران الحجرة *[30]* ومعامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار يعطى بالعلاقة:

$$\zeta_{SD} = \frac{\lambda_{SD} \cdot L_{SD}}{D_{SD}} \cdot \left(\frac{D_{TS}}{D_{SD}}\right)^4 \qquad (31.2)$$

حيث: λ_{SD} : معامل الاحتكاك.

L_{SD} : الطول الكلي لحجرة التهدئة.

D_{SD} : القطر الهيدروليكي لحجرة التهدئة.

D_{TS} : القطر الهيدروليكي لقسم الاختبار.

وحيث أن معامل الاحتكاك للجريان المضطرب يعطى بمعادلة هالاند *[30]*:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{SD}}} = -1.8 \cdot \log\left[\frac{6.9}{\mathrm{Re}_{SD}} + \left(\frac{\Delta / D_{SD}}{3.7}\right)^{1.11}\right] \qquad (32.2)$$

حيث: Δ : ارتفاع الخشونة السطحية. (غالباً يؤخذ 0.0016 m)

Re_D : عدد رينولدز المحسوب بالاعتماد على القطر الهيدروليكي لحجرة استقرار الجريان.

وقد تم حساب معامل الفقد في حجرة تهدئة واستقرار الجريان حسب *[1]* و*[6]* و*[30]* حيث أن حساب معامل الاحتكاك حسب *[1]* يحسب باستخدام العلاقة *(3.2)* وحسب *[6]* باستخدام العلاقة *(A.3)* في الملحق *A* والجدول *(5.2)* يبين نتائج الحسابات.

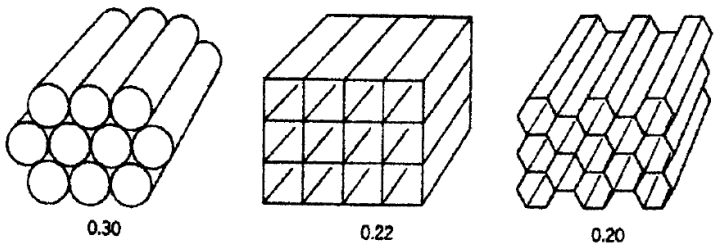
الجدول *(5.2)*: معامل الفقد في حجرة تهدئة واستقرار الجريان في حالة كون قسم الاختبار مفتوحاً ومغلقاً.

العنصر	معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
حجرة استقرار الجريان *(8)*	*0.0002*	*0.0003*	*0.0003*	*0.0003*	*0.0004*	*0.0004*

1.5.2 خلايا عش النحل *(8.1)*

تستخدم خلايا عش النحل لتقويم الجريان وجعله أكثر انتظاماً، حيث تساعد على تحطيم الأعاصير والدوامات ذات القياس الكبير *[36,12]* التي قد تصل إلى النفاثة إذا لم تتم معالجتها، كما أن لها دور في تخفيف الضجيج الذي قد يصل إلى النفاثة *[30, 11]*.

تركب خلايا عش النحل في حجرة استقرار الجريان وتكون متبوعة عادة بمنخل أو أكثر وبذلك فإن أعاصير الاضطراب ذات القياس المتوسط المتولدة عن خلايا عش النحل سوف تتحطم إلى أعاصير أصغر بمقاسات من مرتبة قياس شبكة المنخل، هذه الأعاصير ذات القياس الصغير تمتلك معدل انتشار عالي فتضمحل بسرعة بعد المناخل، والفواقد الناتجة عن خلايا عش النحل هي عادة أقل من % 5 من الفواقد الكلية في القناة ويمكن ملاحظة ذلك في القناة المدروسة في الجدول *(A.1)* ص *196* والشكل *(15.2)* يعطي بعض معاملات الفقد القياسية لخلايا عش النحل *[12]*.



الشكل *(15.2)*: معاملات الفقد لخلايا عش النحل *[12]*.

خلايا عش النحل لها أشكال مختلفة فمن الممكن أن تكون دائرية أو مربعة أو سداسية، ويعتبر الشكل السداسي هو الأكثر شيوعاً لأن معامل انخفاض الضغط له أصغر من البقية. نسبة طول فتحة الخلية للقطر الهيدروليكي لها المثالية هي في المجال من *7* إلى *10 [30,8]* وحسب *[52,36,32]* من *6* إلى *8*. إذا كان طول خلايا عش النحل أكبر من اللازم فإن ذلك سوف يقود إلى نمو أكبر للطبقة الحدية ونتيجة لذلك سوف تكون الفواقد أكبر *[30]*.

خلايا عش النحل هي نفسها سوف تتسبب في بعض الاضطراب صغير المقاس له نفس قياس قطر الفتحة *[52]*، وقد وجد أن مستوى الاضطراب الناتج عنها يكون أكبر عندما يكون الجريان عبر الفتحات صفائحي منه عندما يكون مضطرباً، وهذا يعزى إلى عدم الاستقرار للجريان الصفائحي قرب آثر المخر، مع ملاحظة أن الجريان عبر الفتحة في أغلب خلايا عش النحل للأقنية الهوائية يكون صفائحياً. في حالة الجريان الصفائحي في فتحات خلايا عش النحل فإن التخفيض الصافي للأعاصير والدوامات يكون أكبر ما يمكن عندما تكون خلايا عش النحل أقصر ما يمكن *[36]*.

يعطى معامل الفقد منسوباً للسرعة في حجرة تهدئة واستقرار الجريان في خلايا عش النحل بالعلاقة *[20,1]*:

$$\zeta_h = \lambda_h \cdot \left(\frac{L_h}{D_h} + 3\right) \cdot \left(\frac{1}{\beta_h}\right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1\right)^2 \qquad (33.2)$$

حيث من أجل $\mathrm{Re}_\Delta \le 275$:

$$\lambda_h = 0.375 \cdot \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} \cdot \mathrm{Re}_\Delta^{-0.1} \qquad (34.2)$$

و من أجل $\mathrm{Re}_{\Delta}\rangle 275$:

$$\lambda_h = 0.214 \cdot \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} \qquad (35.2)$$

D_h : القطر الهيدروليكي لخلية واحدة.

Re_{Δ} : عدد رينولدز المحسوب استناداً إلى سرعة الجريان في حجرة التهدئة وارتفاع خشونة سطح المعدن المصنوعة منه خلايا عش النحل.

β_h : مسامية خلايا عش النحل.

L_h : سماكة خلايا عش النحل.

حساب معامل الفقد في خلايا عش النحل منسوباً للسرعة في قسم الاختبار حسب *[30,1]* ينتج من العلاقة:

$$\zeta_h = 0.2 \cdot (\frac{D_{TS}}{D_n})^4 \qquad (36.2)$$

حيث: D_n القطر الهيدروليكي عند مدخل النفاثة.

هذه العلاقة صالحة لخلايا عش النحل ذات الشكل السداسي، كما يجب أن تكون نسبة سماكة الخلية إلى قطرها على الأقل *6*.

حسب *[6]* يعطى معامل الفقد في خلايا عش النحل منسوباً للسرعة في حجرة تهدئة واستقرار الجريان بالعلاقة:

$$\zeta_h = \lambda_h \cdot \left(\frac{L_h}{D_h} + 0.3\right) \cdot (\beta_h)^2 + (\beta_h - 1)^2 \qquad (37.2)$$

$$\lambda_h = 0.214 \cdot \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} \qquad (38.2)$$

D_h : القطر الهيدروليكي لخلية واحدة.

β_h : مسامية خلايا عش النحل.

L_h : سماكة خلايا عش النحل.

وقد تم حساب معامل الفقد في خلايا عش النحل حسب *[1]* و*[6]* و*[30]* والجدول *(6.2)* يبين نتائج الحسابات.

الجدول *(6.2)*: معامل الفقد في خلايا عش النحل في حالة كون قسم الاختبار مفتوحاً ومغلقاً.

العنصر	معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
خلايا عش النحل *(8.1)*	*0.005*	*0.005*	*0.009*	*0.009*	*0.005*	*0.005*

2.5.2 المناخل *(8.2)*

استخدمت المناخل لتحسين جودة الجريان في الأقنية الهوائية منذ الثلاثينيات من قبل براندل *[31,19]*، حيث يتطلب تحقيق مستوى اضطراب منخفض في قسم الاختبار استخدام مناخل ذات شبك دقيق في حجرة استقرار الجريان ذات السرعة

المنخفضة نسبياً قبل النفاثة. كما أن المناخل تعمل على جعل الجريان أكثر انتظاماً *[36,32,31,19]* ومنع أو تأخير حدوث انفصام للطبقة الحدية *[36,32,19]*. المناخل تزيل الأعاصير والدوامات وجزيئات الاضطراب وتقسمها إلى عدد من الأعاصير والجزيئات الصغيرة التي لا تلبث أن تضمحل *[31,30,11]*. لذلك يجب الانتباه إلى ترك مسافة كافية بعد المنخل لاضمحلال هذه الأعاصير المتبقية *[33]*، أيضاً فإن المناخل تقلل من مركبات الجريان العرضي ولكن بفعالية أقل من خلايا عش النحل *[31]*، لذلك فإن استخدام المناخل وخلايا عش النحل معاً سوف يؤدي إلى تحسين جودة الجريان بشكل عام.

حسب براندل فإن المناخل تستخدم للحصول على توزيع أكثر انتظاماً للسرعة عبر المقطع. تخفيض الاضطراب الكلي لسلسلة مكونة من N منخلاً كل منخل له معامل فقد ζ_{sci} يساوي ناتج جمع كل معاملات التخفيض الإفرادية أي *[11,8]*:

$$f_t = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_{sci}}} \qquad (39.2)$$

وكما هو واضح من العلاقة السابقة فإنه بتركيب عدد كافٍ من المناخل سوف نحصل على مستوى منخفض من الاضطراب في حجرة استقرار الجريان.

المناخل لها ثلاثة تأثيرات أساسية على الجريان الذي يعبرها *[8]*:

1. تخفيض تذبذب السرعة الوسطية مما يقود إلى منع أو تأخير انفصام الطبقة الحدية.
2. تخفيض تذبذبات الاضطراب.
3. إعادة تصحيح مسار الجريان المائل نحو الأمام.

هناك مؤشران أساسيان يستخدمان لتوصيف المناخل هما: المسامية أو نسبة المساحة المفتوحة β وعدد رينولدز لسلك المنخل، وهناك مؤشر ثالث هو معامل الشبكة ζ_{mesh} يستخدم لتمييز السلك الأملس من الخشن لمعرفة المادة المصنوع منها المنخل *[1]*.

تم اشتقاق عدة علاقات تعطي معامل الفقد للمنخل كتابع لـ β المسامية أو نسبة المساحة المفتوحة للمنخل و Re_d عدد رينولدز المحسوب استناداً إلى قطر سلك شبكة المنخل. في حالة المناخل المصنوعة من أسلاك ذات مقطع دائري لتشكل شبكاً مربعاً فإن المسامية هي *[32,31,8]*:

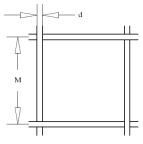
$$\beta = (1 - d/M)^2 \qquad (40.2)$$

حيث d قطر السلك و M طول ضلع فتحة المنخل الشكل *(16.2)*.

أو حسب *[1]*:

$$\beta = (1 - d \cdot \rho_m)^2 \qquad (41.2)$$

باعتبار أن d قطر السلك وكثافة الشبكة $\rho_m = \frac{1}{M}$.



الشكل *(16.2)*: توضيح أبعاد فتحة المنخل *[31]*.

يستخدم أحياناً ما يسمى بصلادة المنخل $\sigma = 1 - \beta$ ، وبهذا فالمسامية تكون صفر عندما تكون حياكة المخل كثيفة جداً وتأخذ القيمة *1* عندما تكون ثقوب المنخل كبيرة. عادة للمناخل المستخدمة في الأقنية الهوائية فإنها تكون في المجال *0.5*- *0.8*.

عدد رينولدز للسلك يكون نسبياً صغيراً جداً مقارنة بأعداد رينولدز المحسوبة في أجزاء القناة الهوائية، حيث أنه في الشروط القياسية للهواء يكون عدد رينولدز من أجل قطر *1 mm* للسلك عند سرعة *1 m/s* مساوياً *69.1 [1]*.

حساب معامل الفقد في المناخل:

العلاقات التقريبية لحساب معامل الفقد المكاني في المناخل منسوباً للسرعة في حجرة تهدئة واستقرار الجريان *[20,1]*:

$$\zeta_{sc} = \zeta_{mesh} \cdot \zeta_{Rn} \cdot \sigma + \frac{\sigma^2}{\beta^2} \qquad (42.2)$$

حيث ζ_{Rn} معامل يتعلق بعدد رينولدز Re_w المحسوب استناداً لقطر سلك المنخل. وحسب *[1]* ومن أجل $0 \le \mathrm{Re}_w \le 400$ ينتج:

$$\zeta_{Rn} = \left[0.785 \cdot \left(1 - \frac{\mathrm{Re}_w}{354} \right) + 1.01 \right] \qquad (43.2)$$

و من أجل $\mathrm{Re}_w \ge 400$ يكون $\zeta_{Rn} = 1$

إيدلشيك حسب قيم معامل الشبكة ζ_{mesh} فوجد قيمته لحالة سلك معدني جديد تساوي *1* و لسلك معدني دائري *1.3* و لسلك حريري *2.1 [1]*.

يحسب معامل الفقد في المناخل منسوباً للسرعة في قسم الاختبار حسب *[30]* من العلاقة:

$$\zeta_{SC} = 6.5 \cdot \frac{(1-\beta)}{\beta^{5/3}} \cdot \left(\frac{V_{SC} \cdot d_{SC}}{\nu}\right)^{-1/3} \cdot \left(\frac{D_{TS}}{D_n}\right)^4 \ per\ screen \qquad (44.2)$$

حيث: β : نسبة المساحة المفتوحة.

V_{SC} : السرعة عند المنخل.

d_{SC} : قطر سلك المنخل.

D_n : القطر الهيدروليكي عند مدخل النفاثة(والذي هو نفس قطر حجرة استقرار الجريان).

ν : اللزوجة الحركية للهواء.

مع الانتباه إلى أن هذه العلاقة صالحة فقط تحت الشروط التالية:

1) $60 < \frac{V_{SC} \cdot d_{SC}}{\beta \cdot \nu} < 600$

2) $1.2 < V_{SC} < 12 \quad m \setminus s$

V_{SC} تعطى بالعلاقة:

$$V_{SC} = V_{TS} / CR \qquad (45.2)$$

حيث: V_{TS} : السرعة في قسم الاختبار و CR : نسبة التضيق للنفاثة.

العلاقة التي صاغها فيكهاردت *Wieghardt [36,19]* عندما تكون سرعة الجريان في حجرة التهدئة في المجال $0\langle V\langle 20m/s$:

$$\zeta_{sc} = 6.5\left[\frac{1-\beta}{\beta^2}\right]\cdot\left[\frac{V\cdot d}{\beta\cdot\nu}\right]^{-1/3} \qquad (46.2)$$

في هذه العلاقة ζ_{sc} ينقص بازدياد السرعة حتى تصبح قيمة $\frac{V\cdot d}{\beta\cdot\nu}$ حوالي *600* و بعدها سيصبح ζ_{sc} مستقلاً عن عدد رينولدز و في هذه الحالة نستخدم علاقة كولار *Collar* التي صاغها عام *1939 [36]*:

$$\zeta_{sc} = 0.9\left(1-\beta/\beta^2\right) \qquad (47.2)$$

حسب *[6]* يعطى معامل الفقد في المناخل منسوباً للسرعة في حجرة تهدئة واستقرار الجريان بالعلاقة:

$$\zeta_{sc} = 1.3\cdot(1-\beta)+\left(\frac{1}{\beta}-1\right)^2 \qquad (48.2)$$

وقد تم حساب معامل الفقد في المناخل حسب *[1]* و*[6]* و*[30]* والجدول *(7.2)* يبين نتائج الحسابات.

الجدول *(7.2)*: معامل الفقد في المناخل في حالة كون قسم الاختبار مفتوحاً ومغلقاً.

العنصر	معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
المناخل *(8.2)*	*0.014*	*0.01*	*0.038*	*0.038*	*0.052*	*0.052*

6.2 النفاثة *(9)*

قسم النفاثة يشكل جزءاً جوهرياً في كل الأقنية الهوائية سواء كانت مصممة لاختبار الجسم الأصلي أو النماذج، والتأثيرات الأساسية للنفاثة هي تخفيض تذبذبات السرعة وبالتالي تخفيض مستوى الاضطراب وزيادة السرعة الوسطية وتقديم جريان منتظم *[38,24,16]* عند مدخل قسم الاختبار مما يسمح بتركيب خلايا عش النحل والمناخل في منطقة ذات سرعة منخفضة ويخفض الفواقد الناتجة عن المناخل وخلايا عش النحل فيما لو تم تركيبها في منطقة مرتفعة السرعة *[36]*. البارامتر الأكثر أهمية في تحديد هذه التأثيرات هو نسبة التضيق *CR*، المساحة المطلوبة للقناة والكلفة يجب أخذها بعين الاعتبار عند تحديد نسبة التضيق. نسب التضيق التي تقع ضمن المجال من *6* إلى *10* وجد بأنها مناسبة لمعظم الأقنية الهوائية الصغيرة ذات السرعات تحت الصوتية *[32,14,10]*.

بالإضافة إلى نسبة التضيق هناك بارامتر آخر يجب اختياره مسبقاً وهو شكل المقطع العرضي، الجريان عند الزوايا في النفاثة أكبر عرضة لكي ينفصم بسبب السرعات المنخفضة الموجودة في هذه المنطقة، أيضاً من الممكن ظهور جريانات عرضية وجريانات ثانوية في الزوايا، لكي نتجنب هذه التأثيرات غير المرغوب بها ينصح بأن يكون شكل المقطع العرضي للنفاثة دائرياً *[14,10]*، لهذا فإن العديد من التصاميم المبكرة كانت إما دائرية أو مثمنة وهذه الأخيرة تم اختيارها كمحاولة

لجعلها حالة وسط بين المستطيل والدائري. لكن الأبحاث التي أجريت حديثاً أظهرت أنه حتى من أجل المقاطع العرضية المستطيلة أو المربعة فإن الجريانات الثانوية في الزوايا تبقى مكانية بدون أي تأثير كبير على جودة الجريان في قسم الاختبار ولذلك يمكن اختيار شكل المقطع العرضي ليطابق باقي مكونات القناة وبشكل خاص قسم الاختبار الذي غالباً ما يكون مربعاً أو مستطيلاً *[14,10]*، البارامترات الأساسية المتبقية الواجب اختيارها هي شكل جدار النفاثة والطول. يجب أن نضمن عند تصميم النفاثة إنتاج جريان منتظم ومستقر عند المخرج بدون حدوث انفصام. الميزة الأخرى المطلوبة في الجريان هي أن تكون سماكة الطبقة الحدية أقل ما يمكن عند مخرج النفاثة، وهذا يبين أن طول النفاثة يجب أن يخفض لكي نحد من تنامي الطبقة الحدية، النفاثات القصيرة مرغوبة بسبب توفيرها في الكلفة وفي المساحة المطلوبة للقناة، لكن سوف يزداد خطر انفصام الطبقة الحدية كلما قصر طول النفاثة، انفصام الطبقة الحدية في النفاثة يقود إلى مساهمة غير مرغوب بها في عدم الانتظام وعدم الاستقرار في الجريان الخارج بالإضافة إلى تخفيض نسبة التضيق الفعالة، خطر انفصام الطبقة الحدية ينتج عن وجود مناطق لتدرج الضغط المعاكس على الجدران بالقرب من كل من نهايتي النفاثة والذي يصبح أكبر كلما قصر طول النفاثة.

في النفاثة يتم استهلاك جزء قليل من الطاقة المقدمة من المروحة، وبما أن الفواقد في النفاثة هي فواقد احتكاكية فإن انخفاض الضغط يحسب بمكاملة قانون الاحتكاك الأساسي في الأنابيب:

$$\Delta P_f = \int_0^{L_n} \lambda \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{V_n^2}{D_n} \cdot dx \qquad (49.2)$$

حيث:

L_n : طول النفاثة.

$D_n = D_n(x)$: القطر الهيدروليكي الموضعي للنفاثة.

V_n : السرعة الوسطية الموضعية للمقطع.

من معادلة الاستمرار:

$$V_n^2 = V_{sc}^2 \cdot \left(\frac{D_{sc}}{D_n} \right)^4 \qquad (50.2)$$

V_{sc} : السرعة في حجرة استقرار الجريان و التي تساوي السرعة عند مدخل النفاثة.

مع الأخذ بعين الاعتبار أن معامل الفقد اصطلاحاً هو:

$$\zeta_n = \frac{\Delta P_f}{q_{sc}} \qquad (51.2)$$

حيث q_{sc} الضغط الديناميكي في حجرة التهدئة. وبالتبديل بالعلاقة *(50.2)*:

$$\zeta_n = \lambda_{av} \cdot \left(\frac{L_n}{D_{sc}} \right) \cdot \int_0^l \frac{D_{sc}^5}{D_n^5} \cdot d\left(\frac{x}{L_n} \right) \qquad (52.2)$$

حيث λ_{av} المتوسط الحسابي لمعاملي الاحتكاك عند مدخل النفاثة ومخرجها، L_n طول النفاثة، D_{sc} القطر الهيدروليكي لحجرة التهدئة.

ولكن معامل الفقد منسوباً إلى الضغط الديناميكي في قسم الاختبار يعطى بالعلاقة:

$$\zeta'_n = \zeta_n \frac{q_{sc}}{q_{TS}} \qquad (53.2)$$

حيث q_{ts} الضغط الديناميكي في قسم الاختبار، وبالتالي:

$$\zeta'_n = \lambda_n \cdot \frac{L_n}{D_{TS}} \cdot \int_0^l \frac{D_{TS}^5}{D_n^5} \cdot d\left(\frac{x}{L_n}\right) \qquad (54.2)$$

حيث x إحداثي المكان.

بما أن قيمة التكامل في العلاقة السابقة أقل من الواحد دائماً فإن قيمة معامل الفقد في النفاثة المنسوبة للضغط الديناميكي في قسم الاختبار أقل من قيمة معامل الفقد في قسم الاختبار عندما تكون نسبة الطول إلى القطر الهيدروليكي في كل من النفاثة وقسم الاختبار متساوية، ومن أجل الأشكال المعروفة للنفاثة فقد وجد أن قيمة التكامل هي 0.32، أما معامل الاحتكاك الوسطي λ_n فيمكن حسابه كمتوسط حسابي لمعاملي الاحتكاك عند مدخل ومخرج النفاثة المحسوبين استناداً لقيم أعداد رينولدز عند المدخل والمخرج من علاقة براندل للأنابيب الملساء، وبتقريب مقبول فإن معامل الفقد في النفاثة منسوباً للسرعة في قسم الاختبار يعطى بالعلاقة *[30,20,11,1]*:

$$\zeta_n = 0.32 \cdot \lambda_n \cdot \frac{L_n}{D_{TS}} \qquad (55.2)$$

بما أن الفواقد في النفاثة تشكل عادة نسبة % 3 من قيمة الفواقد الكلية في الدارة فإن الخطأ المحتمل في حساب معامل الفقد في النفاثة يمكن إهماله نسبة للخطأ الحسابي الذي قد يحدث عند حساب الفواقد في الأجزاء ذات السرعات العالية في الدارة.

حسب *[6]* يعطى معامل الفقد في النفاثة منسوباً للسرعة عند المدخل أو المخرج بالعلاقة:

$$\zeta_n = \frac{4}{9} \cdot \lambda_n \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{CR^{9/2} - 1}{CR^{5/2} \cdot (CR - 1)} \qquad (56.2)$$

CR نسبة التضيق.

وقد تم حساب معامل الفقد في النفاثة حسب *[1]* و*[6]* و*[30]* والجدول *(8.2)* يبين نتائج الحسابات.

الجدول *(8.2)*: معامل الفقد في النفاثة في حالة كون قسم الاختبار مفتوحاً ومغلقاً.

العنصر	معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
النفاثة *(9)*	*0.009*	*0.009*	*0.005*	*0.005*	*0.0186*	*0.0186*

7.2 الخلاصة والاستنتاجات

يعالج هذا الفصل الدراسة الأيروديناميكية التفصيلية للقناة الهوائية من النوع المغلق طراز جوتنجن بمكوناتها المختلفة بداية بقسم الاختبار ووصولاً إلى النفاثة وذلك لفهم الوظيفة الأيروديناميكية لكل قسم من أقسام القناة الهوائية، حيث درسنا أهم التأثيرات الناجمة عن الحيز المحدود لقسم الاختبار بالمقارنة مع الجريان في الحالة الواقعية، كما قمنا بمقارنة حالة قسم الاختبار المفتوح مع المغلق لتوضيح أهم الميزات والمساوئ لكلتي الحالتين، فيما يتعلق بالناشرات فقد بينا أهمية وجود الناشرات في دارة القناة الهوائية التي من أهم وظائفها تخفيض استطاعة المروحة اللازمة للقناة، كذلك تم شرح فائدة تركيب ريش التوجيه في الأكواع لتخفيض الفواقد في الدارة وعدم نشوء أعاصير في الأكواع، أما النفاثة وحجرة استقرار الجريان التي تحوي بداخلها المناخل وخلايا عش النحل فقد أبرزنا أهميتهما الفائقة في الدارة للحصول على جريان انسحابي منتظم بمعامل درجة اضطراب بالقيمة المحددة.

كما تم استخلاص وتوضيح القوانين والعلاقات اللازمة لحساب معامل الفقد لكل عنصر من عناصر دارة القناة حسب ثلاثة مراجع مختلفة *[30,6,1]* بغرض حساب الفواقد الإجمالية للجريان في القناة واستطاعة المروحة المطلوبة للقناة. هذه المراجع تعد من أهم المرجعيات المتوفرة لدراسة وحساب الأقنية الهوائية، وقد أوردنا في الملحق *A*. الحسابات الأيروديناميكية التفصيلية لحساب فواقد الجريان لعناصر القناة واستطاعة المروحة حسب المراجع الثلاثة المذكورة. وقد تبين وجود فروقات بين نتائج الحسابات حسب المراجع الثلاثة يمكن ملاحظتها بالاطلاع على الملحق *A* (الفقرة *1.11*، ص *147*) وتطلب ذلك أن نحدد ونختار القيم المناسبة لحساب الاستطاعة الإجمالية للمروحة. وسنكرس الفصل الثالث لشرح الأسس التصميمية لأجزاء القناة الهوائية.

الفصل الثالث

تصميم مكونات القناة وإعداد المخططات التنفيذية

استناداً إلى نتائج الدراسة الأيروديناميكية في الفصل السابق سنعالج في هذا الفصل التفاصيل التصميمية للمكونات الأساسية للقناة والتي تضم قسم الاختبار، الناشرات، الأكواع وريش التوجيه والنفاثة. المخططات التنفيذية لمكونات القناة موجودة في الملحق *(B)* (الفقرة *2.11* ص*201*).

1.3 قسم الاختبار *(1)*

1.1.3 اختيار شكل قسم الاختبار

خلال عملية تطور الأقنية الهوائية تم استخدام أشكال عديدة لقسم الاختبار مثل الدائري، المربع، المستطيل، السداسي، الثماني. الكلفة والاستطاعة اللازمة لتشغيل القناة يرتبطان بشكل مباشر مع مساحة المقطع العرضي لقسم الاختبار وطوله، تأثير شكل قسم الاختبار على الفواقد في دارة القناة يمكن إهماله *[1]*، لذلك فإن اختيار شكل قسم الاختبار يستند على طبيعة التجارب المراد إجراؤها في القناة وعلى الاعتبارات الأيروديناميكية للنماذج التي سوف يتم اختبارها *[1]*.

من أجل السهولة في تركيب وتبديل النماذج فإن الخيار الأفضل هو تصميم قسم الاختبار بجدران مستوية، وهذا يسهل استخدام التجهيزات التي تستعمل لتثبيت النماذج وأجهزة القياس. أيضاً يعد تصميم قسم الاختبار بأرضية مستوية ميزة هامة عند اختبار المركبات، والجدران المستوية تسمح بسهولة تركيب نوافذ لمشاهدة وتصوير النموذج عند ترئية الجريان. أغلب أقسام الاختبار هي ذات مقطع مستطيل *[52,42]*. لذا فقد اخترنا أن يكون شكل مقطع قسم الاختبار مستطيلاً.

2.1.3 أبعاد قسم الاختبار

أبعاد قسم الاختبار تعد أحد أهم الميزات التي تصف القناة الهوائية، واختيار أبعاد قسم الاختبار هو غالباً ما يكون نقطة البداية عند تصميم قناة هوائية ما *[1]*، والاختيار يتبع لاعتبارات عديدة أهمها:

1. استخدامات القناة والتجارب المراد إجراؤها فيها ومقاسات النماذج المختبرة *[52,36,32,1]*.
2. الميزانية المرصودة لبناء القناة وتكاليف تشغيل القناة.
3. عدد رينولدز و عدد ماخ المطلوب تحقيقهما.
4. الفراغ المتاح في مكان تركيب القناة *[31]*.
5. نسبة الانسداد ، فمثلاً عند اختبار السيارات تؤخذ هذه النسبة عادة *0.05* أو على الأكثر *0.1* *[13,1]*.
6. استطاعة محرك المروحة.

عرض قسم الاختبار ذي الشكل المستطيل يحدد أبعاد النموذج. على سبيل المثال إذا كان مطلوباً اختبار جناح حامل سماكته *12.7 mm* وطول وتره *101.6 mm* وباعتبار أن النسبة المميزة (الامتداد / الوتر) هي *8*، بالتالي امتداد الجناح هو *812.8 mm*، وباعتبار أن الامتداد الأعظمي يجب أن يكون *0.8* من عرض قسم الاختبار فإن عرض قسم الاختبار المطلوب سوف يكون *1016 mm*، وباعتبار أن نسبة عرض قسم الاختبار إلى ارتفاعه هي *1.5* حسب *[1]* وحسب *[52,36]* هي $\sqrt{2}$ وحسب *[42]* هي *1.66* فإن ارتفاع قسم الاختبار سوف يكون *678 mm*، وبهذا فإن مساحة المقطع العرضي لقسم الاختبار اللازم لاختبار الجناح ذي الأبعاد المذكورة سوف يكون حوالي $0.7\ m^2$ *[1]*.

الأقنية الهوائية المستخدمة من أجل ترئية الجريان والمعايرة عادة تكون مساحة قسم الاختبار فيها بحدود $0.093\ m^2$ أو أقل. هذه الأقنية تستخدم من أجل ملاحظة ظواهر الجريان الأساسية و معايرة مسابير أجهزة القياس، وتستخدم أحياناً من أجل الدراسات المجراة على المركبات في الحالات التي تكون فيها أعداد رينولدز صغيرة نسبياً *[1]*.

طول قسم الاختبار في الأقنية المصممة لاختبارات الطيران يكون أكبر من القطر الهيدروليكي لقسم الاختبار بمرتين أو ثلاث مرات *[51,1]*.

تأخذ السرعة أعلى قيمة لها في قسم الاختبار مما ينتج عنه مساهمة كبيرة في قيمة الفواقد الناتجة عن الاحتكاك الجداري هذه الفواقد يمكن أن تخفض بجعل قسم الاختبار قصيراً ولكن بالمقابل فإن الجريان القادم من النفاثة ليس منتظماً بشكل تام عند بداية قسم الاختبار، لذا فإن قسم الاختبار يجب أن يصمم بطولٍ كافٍ بحيث أن تشويشات الجريان الخارج من النفاثة يجب أن تتلاشى قبل أن تصل إلى النموذج، علماً أن الجريان الخارج من النفاثة يأخذ مسافة مكافئة لحوالي نصف القطر الهيدروليكي لمقطع الخروج من النفاثة قبل أن يصبح منتظماً بشكل كافٍ *[52,36]*، إضافة لأن الاضطرابات الناتجة عن النماذج المتوضعة في قسم الاختبار سوف تساهم في زيادة الفواقد، لكن زيادة طول قسم الاختبار سوف تؤدي إلى نمو الطبقة الحدية بشكل مفرط مما يسبب حدوث انفصام في الناشرة ويزيد الفواقد *[52,32,30,17,12]*.

لهذا من الضروري أخذ هذه المسائل بعين الاعتبار عند اختيار طول قسم الاختبار والملحقات التي سوف تتوضع في قسم الاختبار مثل نظام القيادة والتوجيه.

أبعاد قسم الاختبار في القناة الهوائية التي نريد تصميمها سوف تأخذ القيم التالية وذلك بناءً على المساحة المتاحة في مخبر ميكانيك السوائل القديم في بناء الورشات وعلى كلفة التصنيع وأيضاً على التجارب المراد إجراؤها في القناة وبعد الاطلاع على أقنية مماثلة موجودة في مخابر ميكانيك السوائل تستخدم لنفس الأغراض:

- العرض: $B = 60\,cm$
- الارتفاع: $H = 50\ cm$
- القطر الهيدروليكي: $D_{TS} = \frac{4A}{u} = \frac{4 \cdot 60 \cdot 50}{2(60+50)} = 54.545\,cm$
- الطول في حال قسم مفتوح: $L_{TS} = 140\ cm$
- الطول في حال قسم اختبار مغلق: $L_{TS} = 160\ cm$

حيث: A مساحة قسم الاختبار ، u محيط قسم الاختبار.

قسم الاختبار يمكن استخدامه مغلقاً أو مفتوحاً، السرعة القصوى للجريان في قسم الاختبار المغلق هي $60\ m\backslash s$ وفي المفتوح $55\ m/s$.

3.1.3 بعض الإجراءات التصميمية لتحسين أداء قسم الاختبار

لا يوجد طريقة تصميمية دقيقة تراعي ظاهرة الطفو الأفقي في قسم الاختبار بشكل تام، ولكن بشكل مبدئي فإنه من الممكن تصميم جدران قسم الاختبار المغلق بحيث تكون متباعدة حوالي 0.5° درجة من كل جانب، هذه التعديلات ستكون ضرورية بعد بناء القناة وقياس الضغط الستاتيكي على طول قسم الاختبار *[1]*.

لتقليل المشاكل الناتجة عن الجريانات الثانوية عند الزوايا يمكن تصميم زوايا قسم الاختبار بشكل منحني أي جعلها ملفوفة وليست بشكل زاوية قائمة لمنع نمو الطبقة الحدية في زوايا قسم الاختبار وصولاً إلى الناشرة *[52,1]* وهذا يمكن مناقشته بعد بناء القناة الهوائية أيضاً.

ينصح بتركيب نوافذ بعدد ومساحة كافية لمشاهدة النموذج، حيث أنه خلال عملية الاختبار من الضروري رؤية كافة أجزاء النموذج: القسم الأعلى، الجوانب، القسم الأسفل ومقدمة النموذج *[51,1]*. وقد تم وضع نوافذ للجدران الجانبية والقسم الأعلى لقسم الاختبار للقناة المدروسة.

خلال عملية الاختبار سوف نحتاج أيضاً لإضاءة ملائمة من أجل العمل على النموذج ومن أجل عمليات التصوير *[51,1]*.

أيضاً فقد تم تصميم عربة خاصة لقسم الاختبار مجهزة بدواليب لسهولة استخدامه في الحالة المغلقة والمفتوحة ويتم ربطه مع بقية عناصر القناة بواسطة فلانجات (انظر الملحق *B* الفقرة *4.2.11* ص*208*)

2.3 الناشرات *(2.1,2,3,4)*

مساحة المقطع العرضي للناشرة يجب أن تزداد بشكل تدريجي على طول محورها وبمعدلات تمنع حدوث انفصام الجريان. زيادة طول الناشرة سيؤدي إلى زيادة التكاليف وسيزيد مساحة الغرفة المطلوبة للقناة، كما أنه سيزيد الفواقد وبالتالي ستزيد استطاعة المروحة المطلوبة *[30]*.

يعتمد الجريان في الناشرة على شكلها الهندسي المعرف من خلال نسبة التوسع ***AR*** وزاوية انفراج الناشرة وشكل الجدار وشكل المقطع العرضي للناشرة *[36]*.

لتجنب الانفصام في الناشرات فإن زاوية ميل جدار الناشرة عن محورها يجب أن لا تتجاوز 4° حسب *[2]* و 5° حسب *[36]*. لكن في الناشرات القصيرة يمكن تجاوز هذه القيمة. ونسبة التوسع يجب أن لا تتجاوز *2.5* حسب *[36]*.

بشكل عام من الأفضل تخفيض السرعة في الناشرة بأقصر طول ممكن وبدون حدوث انفصام، مما يؤدي للحصول على مردود عالٍ ويساعد على تخفيض تكاليف التصنيع بتخفيض الحجم الكلي لهيكل القناة، علماً أن الناشرات حساسة للأخطاء التصميمية التي تسبب الانفصام، الذي يولد اهتزازات عالية، تذبذبات في حمل المروحة، وتذبذبات في السرعة داخل قسم الاختبار ويزيد الضياعات الإجمالية في القناة *[1]*، وبالتالي يجب تجنب حدوثه.

الأشكال الأكثر شيوعاً لمقطع الناشرة هي المستطيلة لأسباب مشابهة لتلك المعطاة لاختيار شكل قسم الاختبار بجدران مستوية.

في القناة التي نريد تصميمها يوجد ثلاث ناشرات وناشرة قصيرة ومقطع انتقالي، الناشرة الأولى هي الناشرة التي تلي قسم الاختبار وفي بدايتها يوجد مجمع لتجميع الهواء الخارج من قسم الاختبار بعد اجتياز النموذج، الناشرة الثانية تأتي بعد الكوع الثاني وتسبق قسم المروحة وفيها يتم تحويل شكل المقطع من مستطيل إلى دائري من أجل تركيب المروحة حيث يليها قسم المروحة الذي يجب أن يكون دائرياً، الناشرة الثالثة تركب بعد قسم المروحة ويأتي بعدها المقطع الانتقالي الذي تتم العودة فيه إلى المقطع المستطيل، والناشرة القصيرة تركب بعد الكوع الرابع وقبل النفاثة وفيها يتم تكبير المقطع للوصول إلى مساحة المقطع المطلوبة عند مدخل النفاثة من أجل الحصول على نسبة التضيق المطلوبة. الجدول *(1.3)* يوضح أبعاد الناشرات المستخدمة في القناة.

الجدول *(1.3)*: توضيح أبعاد ومميزات الناشرات في القناة:

الناشرة	شكل المقطع	أبعاد مقطع الدخول [mm]	أبعاد مقطع الخروج [mm]	زاوية انفراج الناشرة بالدرجة	نسبة التوسع	الطول [mm]
الناشرة الأولى (**1.2**)	مستطيل	500 X 600	740 X 910	من أجل البعد الصغير 3 من أجل البعد الكبير 3	2.2	2580
الناشرة الثانية (**2.2**)	مستطيل – دائري	740 X 910	1000	من أجل البعد الصغير 4 من أجل البعد الكبير 1	1.16	1760
الناشرة الثالثة (**3.2**)	دائري	1000	1050	1	1.05	1850
مقطع انتقالي	دائري – مستطيل	1050	1050 X 1250	من أجل البعد الصغير 0 من أجل البعد الكبير 2	1.5	2300
الناشرة القصيرة (**4.2**)	مستطيل	1050 X 1250	1250 X 1500	من أجل البعد الصغير 8 من أجل البعد الكبير 9	1.4	750

لتحقيق نسب تضيق أكبر في النفاثة يتم استخدام ناشرة قصيرة تركب قبل حجرة استقرار الجريان حيث تقوم بتكبير مساحة المقطع لأنه من الممكن أن تصل نسبة المساحة في هذه الناشرة إلى *4* وزاوية انفراج الناشرة القصيرة يمكن أن تأخذ قيم أكبر من القيم المعروفة للناشرات حيث كما هو واضح من الشكل *(5.2)* ص *47* أنه من الممكن أن تصل قيمة الزاوية إلى 20° *[36,1]* وذلك بدون استخدام مناخل.

سوف نتأكد لاحقاً من خلال نمذجة ومحاكاة الجريان (الفصل الرابع) من أن التصميم المعتمد لناشرات القناة المدروسة يحقق شروط الجريان المطلوبة.

3.3 الأكواع وريش التوجيه *(3.1,2,3,4)*

تركب ريش التوجيه في الأكواع من أجل توجيه الجريان ومنع الانفصام وتخفيض الفواقد والضجيج *[31,30]*. يمكن تصميم ريش التوجيه على شكل بروفيل جناح حامل بسماكة مناسبة وذلك لجعلها ذات متانة أعلى بالإضافة للميزات الأيروديناميكية لهذا التصميم. السمات الأساسية المتعلقة بتصميم ريش التوجيه:

- النسبة بين المسافة الفاصلة بين ريشتين متتاليتين h المقاسة من الحافة الأمامية للريشة للحافة الأمامية للريشة المجاورة إلى وتر الريشة c *0.52[37]*. زيادة هذه النسبة تقود إلى جريانات عرضية وفواقد كبيرة.
- نسبة سماكة الريشة إلى طول وترها: *0.196 [37,30]*.
- كل ريش التوجيه متماثلة من حيث طول الوتر وشكل البروفيل.

تم تصميم شكل بروفيل ريش التوجيه للقناة المدروسة بالاعتماد على *[37,30]*. أبعاد ريش التوجيه في القناة المدروسة تم اختيارها استناداً إلى القطر الهيدروليكي للكوع الذي يحويها. الشكل *(1.3)* يوضح شكل بروفيل ريش التوجيه المستخدمة في الكوعين الأول والثاني *(3.1* و *3.2)*، هذا النوع من الريش يمتلك معامل فقد منخفض جداً، الانحناء الداخلي والخارجي للكوع سيتم تصميمه ليطابق السطح العلوي والسفلي للريشة (انظر مخططات الأكواع في الملحق *B*).

1.3.3 تحديد بروفيل وأبعاد ريش التوجيه في الأكواع

سوف يتم تحديد طول وتر بروفيل ريشة التوجيه في كل كوع من الأكواع الأربعة للقناة بالاعتماد على طريقة حساب ريش التوجيه في أكواع القناة الهوائية في جامعة فلوريدا *[30]*.

<u>الكوع الأول والثاني *(3.1)* و *(3.2)*</u>

أبعاد مقطع الكوع: *910 X 740 mm*

حساب عدد رينولدز المعرف بالعلاقة *(1.3)* لكوع القناة الهوائية في جامعة فلوريدا *[30]* حيث سرعة الجريان في الكوع *33.031 m/s* وقياس مقطع الكوع *1.2 X 1.49 m*، و بالتالي القطر الهيدروليكي للكوع *1.329 m*:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \qquad (1.3)$$

حيث: Re عدد رينولدز، V السرعة، ν اللزوجة الحركية.

$$\mathrm{Re}' = \frac{33.031 \cdot 1.329}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 2.907 \cdot 10^{6}$$

حساب عدد رينولدز للكوع *(3.1)* حيث سرعة الجريان *26.73 m/s* وقد تم حسابها استناداً للغزارة والقطر الهيدروليكي للكوع الذي تبلغ قيمته *0.816 m*:

$$\mathrm{Re} = \frac{26.73 \cdot 0.816}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.444 \cdot 10^{6}$$

النسبة بين عددي رينولدز المحسوبين بدلالة الأقطار الهيدروليكية:

$$\frac{\mathrm{Re}'}{\mathrm{Re}} = \frac{2.907 \cdot 10^{6}}{1.444 \cdot 10^{6}} = 2.013$$

عدد رينولدز المحسوب بدلالة طول وتر الريشة في جامعة فلوريدا *[30]* حيث طول وتر الريشة المستخدمة *0.16 m*:

$$\mathrm{Re}_c' = 0.35 \cdot 10^{6}$$

بأخذ نفس النسبة بين عدد رينولدز المحسوبين بدلالة الأقطار الهيدروليكية لحساب عدد رينولدز بدلالة طول وتر الريشة يكون:

$$\mathrm{Re}_{c1} = \frac{0.35 \cdot 10^{6}}{2.013} = 0.173 \cdot 10^{6}$$

وبالتالي يكون طول وتر الريشة:

$$c_1 = \frac{\mathrm{Re}_{c1} \cdot \upsilon}{V} = \frac{0.173 \cdot 10^{6} \cdot 15.1 \cdot 10^{-6}}{26.73} = 0.097\, m = 97\, mm$$

النسبة بين المسافة الفاصلة بين ريشتين متتاليتين h إلى وتر الريشة c *0.52*.

$$\frac{h}{c} = 0.52 \qquad (2.3)$$

$$\frac{h}{97} = 0.52 \Rightarrow h = 0.52 \cdot 97 = 50.44\, mm$$

نسبة سماكة الريشة إلى طول وترها *0.196 [37,30]*:

$$\frac{t}{c} = 0.196 \qquad (3.3)$$

وبالتالي فإن سماكة الريشة:

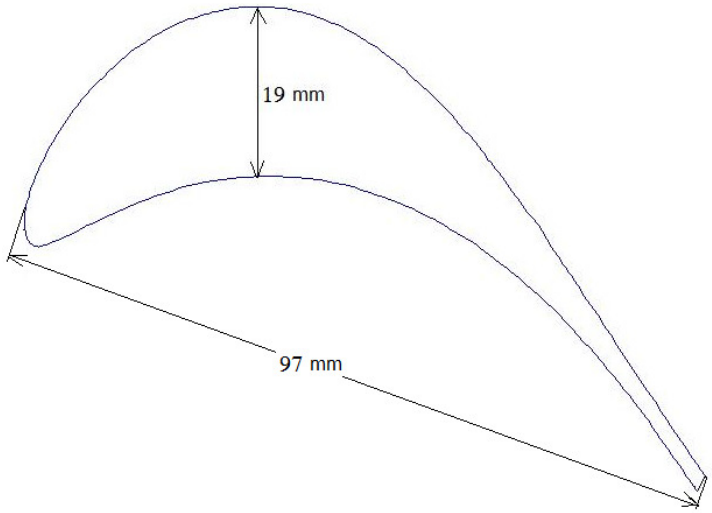
$$\frac{t}{97} = 0.196 \rightarrow t = 0.196 \cdot 97 = 19.012\, mm$$

<u>الكوع *(3.3)* و *(3.4)*</u>

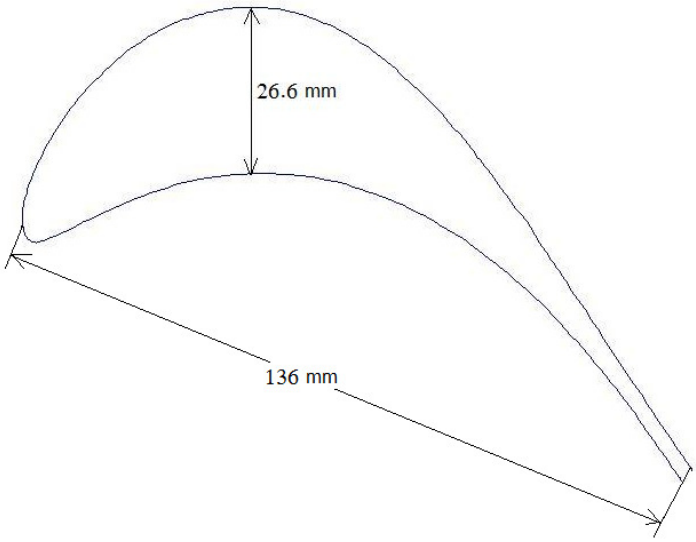
قياس مقطع الكوع: *1250 X 1050 mm*

حساب عدد رينولدز للكوع *(3.3)* حيث سرعة الجريان *13.7 m/s* المحسوبة استناداً للغزارة والقطر الهيدروليكي الذي تبلغ قيمته *1.141 m*:

$$\mathrm{Re} = \frac{13.7 \cdot 1.141}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.035 \cdot 10^{6}$$



الشكل *(1.3)*: شكل بروفيل ريش التوجيه المستخدمة في الكوعين الأول والثاني *[37,30]*.



الشكل *(2.3)*: شكل بروفيل ريش التوجيه المستخدمة في الكوعين الثالث والرابع *[37,30]*.

النسبة بين عددي رينولدز المحسوبين بدلالة الأقطار الهيدروليكية:

$$\frac{\mathrm{Re}'}{\mathrm{Re}} = \frac{2.907 \cdot 10^{6}}{1.035 \cdot 10^{6}} = 2.808$$

$$\mathrm{Re}_{c2} = \frac{0.35 \cdot 10^{6}}{2.808} = 0.124 \cdot 10^{6}$$

وبالتالي يكون طول وتر الريشة:

$$c_2 = \frac{\mathrm{Re}_{c2} \cdot \upsilon}{V} = \frac{0.124 \cdot 10^6 \cdot 15.1 \cdot 10^{-6}}{13.7} = 0.136\,m = 136\,mm$$

من *(2.3)*:

$$\frac{h}{136} = 0.52 \Rightarrow h = 0.52 \cdot 136 = 70.72\,mm$$

وبالتالي فإن سماكة الريشة حسب *(3.3)*:

$$\frac{t}{136} = 0.196 \rightarrow t = 0.196 \cdot 136 = 26.656\,mm$$

والشكل *(2.3)* يوضح شكل وأبعاد الريشة المستخدمة في الكوعين الثالث والرابع. عدد الريش اللازم تركيبها في كل كوع من الكوعين الأول والثاني *19* ريشة، وعدد الريش اللازم تركيبها في كل كوع من الكوعين الثالث والرابع *20* ريشة، وهذه الريش يجب أن يتم استيرادها من شركات مختصة لأنه لا توجد إمكانية لتصنيعها محلياً.

4.3 قسم المروحة *(6)*

يحوي قسم المروحة بالإضافة إلى المروحة وريش التوجيه الثابتة على المحرك ودعائمه، المحرك يمكن تركيبه قبل أو بعد المروحة، عند تركيب المحرك قبل المروحة فإن جريان الهواء يملك فرصة لكي يصبح أكثر انتظاماً قبل أن يصل لريش المروحة، لكن من جهة أخرى سيتم توليد بعض الاضطراب من دعائم المحرك باتجاه دولاب المروحة، وهذا ممكن أن يؤثر على المردود وسينتج عنه مستويات عالية من الضجيج، لأن ريش المروحة لن تعمل بشكل فعال إذا كان الجريان القادم إليها مضطرباً مما يؤدي لزيادة المقاومة، وبالتالي الاستطاعة المطلوبة المروحة.

1.4.3 تحديد قطر الصرة

يتراوح قطر الصرة عادة بين *50* و *80 %* من قطر المروحة، ويمكن حسب *[75]* حساب قطر الصرة من العلاقة:

$$d_{\min} = (19000/n)\sqrt{\Delta P} \qquad (4.3)$$

حيث: $d_{\min}$ قطر الصرة الأصغري *[in] (0.0254 m)*، n عدد الدورات *[rpm]*، ΔP فرق الضغط الستاتيكي *[inwc] (249.174 Pa)*.

كما يمكن حساب قطر الصرة من الشكل *(3.3)*. إذا كان قطر الصرة أكبر من القيمة الناتجة بقليل فإن ذلك مقبولاً، هذا سيؤدي إلى تخفيض قليل في المساحة الدائرية وبالتالي في الغزارة الحجمية الأمر الممكن تعويضه عن طريق زيادة قليلة في زوايا الريشة، لكن إذا كان قطر الصرة أقل من القيمة الناتجة فإن ذلك سيؤدي إلى أداء سيء للريشة أي اضطراب في الجريان كما سينتج عنه جريان هواء معاكس بالقرب من الصرة، هذا الأداء السيء يسمى الانهيار *stalling*.

الضغط الستاتيكي الذي يتم توليده عبر المروحة يمكن حسابه من العلاقة:

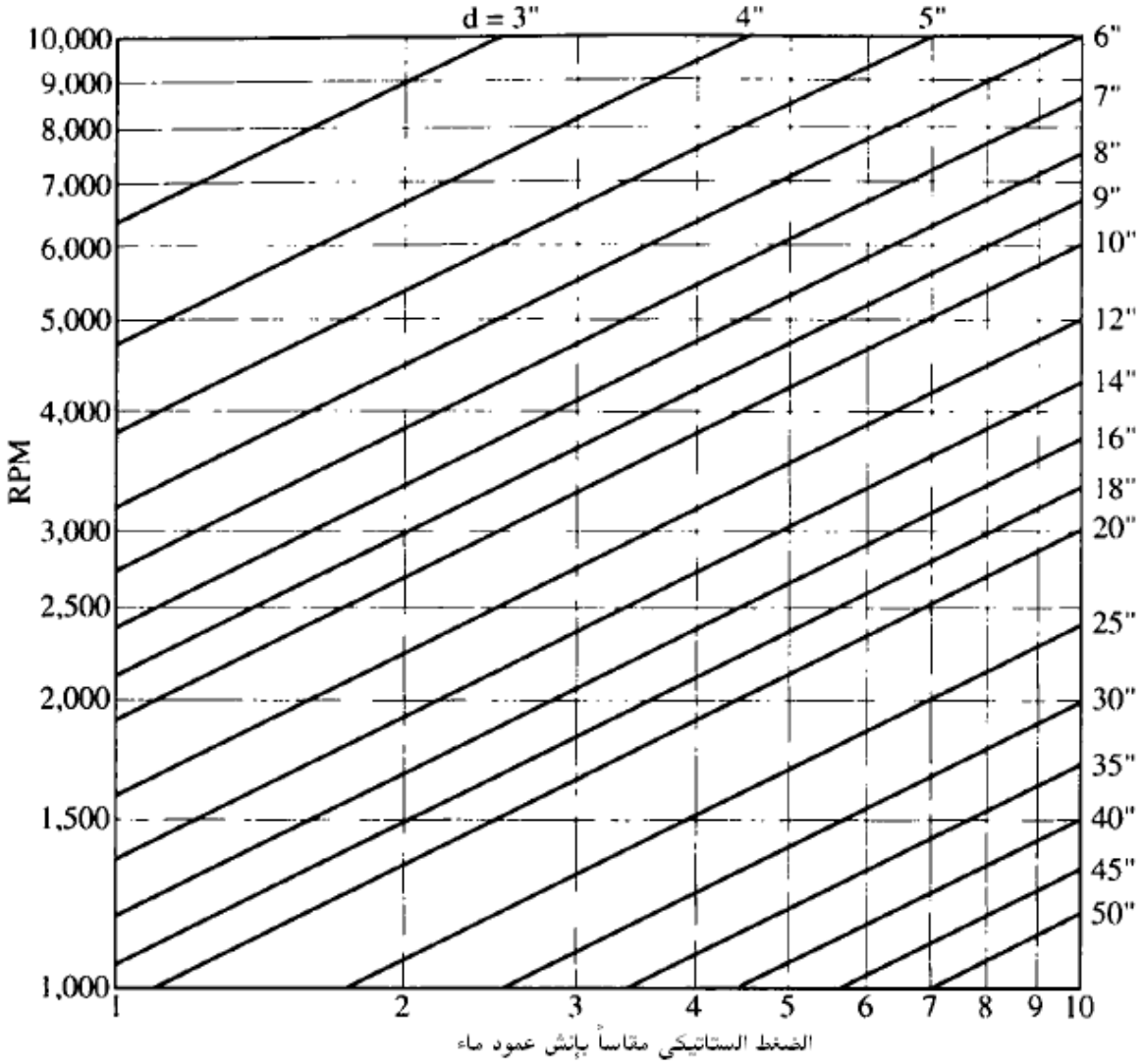
$$\Delta P = 3.43 \cdot 10^{-9} \cdot n \cdot z_B \cdot C_L \cdot l \cdot W \qquad (5.3)$$

حيث: ΔP تزايد الضغط الستاتيكي *[inwc] (249.174 Pa)*، z_B عدد ريش المروحة، C_L معامل الرفع لبروفيل الجناح الحامل المستخدم في تصميم الريشة، l عرض الريشة *[in] (0.0254 m)*، W سرعة الهواء نسبة لسرعة دوران الريشة *[fpm] (0.0051 m/s)*.

تزايد الضغط الستاتيكي يتناسب طرداً مع قطر الصرة لأنه من أجل قطر صرة أكبر *[75]*:

1. إمكانية زيادة سرعة الدوران مما يؤدي لزيادة السرعة النسبية W.
2. سيكون هناك مساحة أكبر من أجل ريش أعرض.

من أجل الحصول على مردود عالٍ للمروحة فإن تزايد الضغط الستاتيكي الذي تولده يجب أن يكون ثابتاً من أجل أي نصف قطر. بما أن سرعة الهواء النسبية تأخذ قيمتها الصغرى عند الصرة فيجب تعويض ذلك بتكبير كل من معامل قوة الرفع وعرض الريشة. لكن كلا العاملين ممكن زيادتهما فقط إلى حد معين، عرض الريشة يمكن زيادته إلى الحد الذي ستتشابك عنده الريش وتتراكب على بعضها، ومعامل قوة الرفع يمكن زيادته إلى القيمة العظمى لمعامل قوة الرفع الذي يمكن توليده من بروفيل الجناح الحامل للريشة، وهذا سبب أن قطر الصرة يمكن أن يكون أكبر وليس أصغر من القيمة المحسوبة، لأنه إذا كان قطر الصرة صغيراً فإنه من غير الممكن مهما كبرنا $l \times C_L$ أن نعوض السرعة النسبية الصغيرة عند الصرة وستحدث حالة الانهيار *stalling* بالقرب من الصرة.



الشكل *(3.3)*: قطر الصرة الأصغري d للمروحة كتابع لعدد الدورات والضغط الستاتيكي *[75]*.

علماً أن *1 in = 25.4 mm*، *inwc = 249.174 Pa*

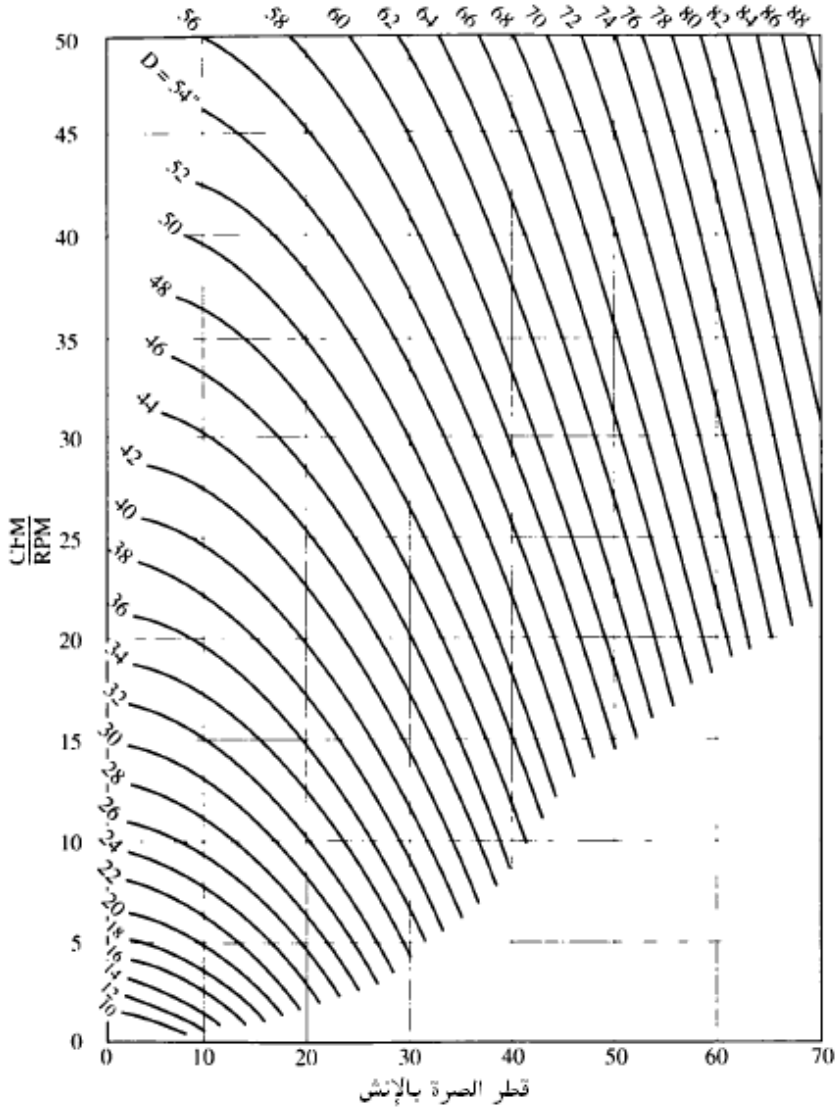
2.4.3 تحديد قطر المروحة

بعد تحديد قطر صرة المروحة فإن الخطوة التالية هي تحديد قطر المروحة، يمكن حساب قطر المروحة المطلوب من العلاقة التالية *[75]*:

$$D_{\min} = \sqrt{d^2 + 61(\dot{V}/n)} \qquad (6.3)$$

حيث $\dot{V}$ الغزارة الحجمية *[cfm] (0.00047 m^3/s)*.

أو من الشكل *(4.3)*.



الشكل *(4.3)*: قطر الصرة تابع للضغط الستاتيكي والسرعة وقطر دولاب المروحة تابع لقطر الصرة والنسبة *cfm/rpm*

حسب *[75]* علماً أن *1 cfm = 0.00047 m^3/s* و *1 in = 25.4 mm*.

3.4.3 عدد ريش المروحة

من العلاقة *(3.3)* نلاحظ أن الضغط الذي تولده المروحة يتناسب طرداً مع كل من عدد ريش المروحة وعرضها، هذا يعني أنه من أجل تصميم ما يمكن مضاعفة عدد ريش المروحة وتقليل عرضها للنصف بدون أن يطرأ أي تغيير على أدائها على الأقل بالنسبة للغزارة والضغط الذي تقدمه المروحة، لكن الاضطراب والضجيج يتم توليدهما من الحواف الأمامية والخلفية

للريشة وليس من سطح الريش، لذلك فإن عدد أقل من الريش العريضة سينتج عنه مردود أفضل للمروحة ومستوى أقل من الضجيج، ومن جهة أخرى عندما يصبح عدد الريش قليلاً وبالتالي عرض الريشة كبيراً فإن صرة المروحة تصبح كبيرة جداً، وبالتالي ثقيلة وضخمة وغالية الثمن وصعبة التوازن، بهذا نحن نواجه مطلبين متعارضين ريش أقل من أجل مـــردود أعلى وضجيج أقل لكن ريش أكثر من أجل وزن أقل.

من وجهة نظر أيروديناميكية فإن عدد ريش المروحة المثالي سيكون ريشة واحدة عريضة جداً مثبتة على الصرة لأن هـــذا سيضمن أن تكون فواقد الاضطراب أقل ما يمكن، وبالتالي فإن ريشة واحدة عريضة سينتج عنها المردود الأفضل ومستوى ضجيج أقل ولكن دولاب مروحة غير عملي ومكلف، التجارب العملية أكدت أنه للحصول على مردود جيد وبكلفـــة معقولة فإن عدد الريش يجب أن يكون في المجال من $5-12$ ريشة *[75]*.

إن تصميم ريش المروحة على شكل بروفيل جناح حامل يؤدي إلى زيادة مردود المروحة لأن هذا التصميم يؤدي إلى زيادة الضغط الذي تولده المروحة بسبب قوة الرفع الذي يولدها الجناح واستهلاك الطاقة سيكون أقل بسبب المقاومة المنخفضة للجناح مما يؤدي لزيادة المردود. تصنع ريش المروحة عادة من الألمنيوم وأحياناً من الفولاذ وأيضاً من البلاستيك القاسي.

4.4.3 عرض ريش المروحة

كما ذكرنا سابقاً فإن الضغط الذي تولده المروحة يتناسب طرداً مع $l \cdot z_B$. بعد تحديد عدد الريش يجب تحديد عرضها، عند الصرة يجب أن تكون الريش غير متراكبة على بعضها لأن الريش المتراكبة ممكن أن تخنق أو تمنع مرور الهواء، وعادة ما يتم تجنب ذلك بجعل عرض الريشة l أصغر أو يساوي $3.4 \cdot d/z_B$ حيث d قطر الصرة، هذا ينطبق على عرض الريشة عند الصرة. في بعض التصاميم يكون عرض الريشة ثابتاً من الصرة حتى الرأس *[75]*.

تصمم ريش المروحة بحيث تكون متضيقة من الصرة وحتى الرأس، أحياناً يتم استخدام ريش عريضة عند الرأس وهذا لـــه ميزات محددة مثل مستوى الضجيج المنخفض والضغط الأعظمي العالي الذي نحصل عليه من المروحة، الريش ذات الرأس الضيق من جهة أخرى يكون منحني الضغط الخاص بها أكثر استقراراً وتعطي غزارة أكبر.

5.4.3 شكل شفرات التوجيه قبل وبعد المروحة

يمكن تحديد شكل شفرات التوجيه من مواصفات الجريان المطلوبة عند الحافة الأمامية لشفرات التوجيه المركبة بعد المروحة والحافة الخلفية لشفرات التوجيه التي تسبق المروحة، بعض العوامل مثل عرض شفرات التوجيه والمسافة بينها تكون مشابهة عموماً لتلك المستخدمة في تصميم ريش التوجيه في الأكواع مع بعض الاختلاف لأن الجريان في الأكواع عادة لا يغـــير سرعته وإنما يغير اتجاهه فقط بينما شفرات التوجيه التي تلي المروحة تعمل عند جريان مكبوح وشفرات التوجيه التي تسبق المروحة تعمل عند جريان متسارع.

شكل شفرات التوجيه التي تسبق المروحة أكثر أهمية من شكل شفرات التوجيه المركبة بعد المروحة بسبب التـــأثير غـــير المباشر على ريش المروحة التي تليها، إذا كانت حركة الهواء الحلزونية الداخلة لريش المروحة غير متطابقة مع الحساب فإن ريش المروحة لن تعمل تحت الظروف المحسوبة وبشكل طبيعي لن تؤدي كما هو متوقع منها، وهذا أحد مساوئ شفرات التوجيه التي تسبق المروحة وميزة بالنسبة لشفرات التوجيه التي تلي المروحة.

كما في ريش المروحة فإن شكل المقطع العرضي لشفرات التوجيه يمكن أن يكون إما بشكل جناح حامـــل أو صـــفيحة مقوسة بشكل مناسب، الشفرات التي لها شكل جناح حامل تصنع عادة من الألمنيوم المصمت أو المفرغ بينما الشـــفرات الصفائحية المقوسة تصنع عادة من الفولاذ، الشفرات الصفائحية المقوسة المصنعة من الفولاذ هي الأكثر شيوعاً.

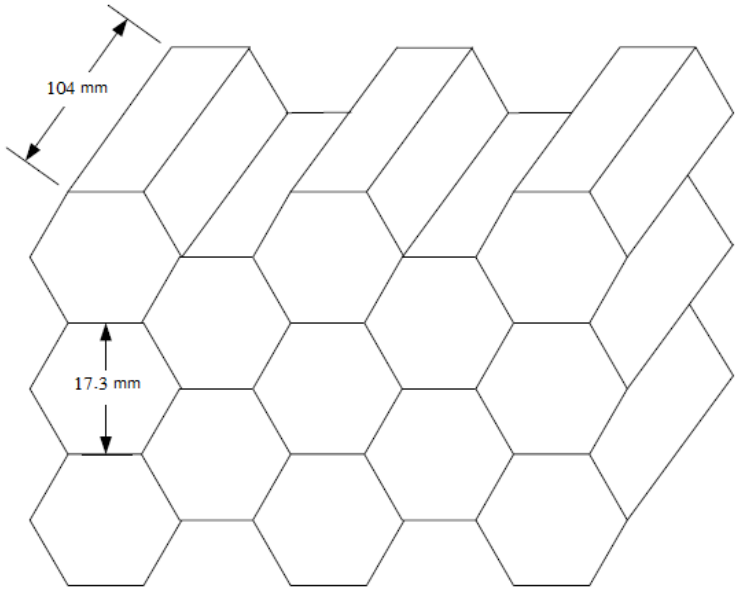
بالنسبة للقناة المدروسة فقد اخترنا أن تكون المروحة ذات ريش قابلة للتوجيه ومزودة بجهاز تحكم بسرعة الدوران، قطر غلاف قسم المروحة *1000 mm*.

5.3 المقطع الانتقالي *(7)*

يعمل هذا القسم على تغيير شكل المقطع من الشكل الدائري عند مخرج الناشرة الثالثة *(2.3)* بقطر *1050 mm* إلى الشكل المستطيل عند مدخل الكوع الثالث *(3.3)* الذي أبعاده *1050 X 1500 mm*. وقد تم تصميم المقطع الانتقالي من جزئين. الجزء الأول يحول المقطع من الشكل الدائري إلى شكل مثمن ويبلغ طوله *300 mm*، والجزء الثاني يؤمن التحول من الشكل المثمن إلى المستطيل ويبلغ طوله *2000 mm*، كما هو موضح في المخطط رقم *(8)* في الملحق *B* (الفقرة *2.11* ص *201*) وبذلك يصبح الطول الكلي للمقطع الانتقالي *2300 mm*.

6.3 حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*

يبلغ طول هذا القسم *1266 mm* ويضم خلايا عش النحل ومنخلين، وقد تم توزيع هذه العناصر بشكل متساوي على طول القسم كما في المخطط *(11)* في الملحق *B* ص *244*. الشكل *(5.3)* يوضح أبعاد خلايا عش النحل التي تم اختيارها، علماً أنه يمكن تصنيعها من الألمنيوم أو من صفائح معدنية أو أنواع خاصة من البلاستيك. وقد تم اختيار نوع وعدد المناخل وخلايا عش النحل بالاستفادة من *[36,30,1]*. وتم التأكد من أننا حصلنا على معامل درجة الاضطراب المطلوب في قسم الاختبار من نتائج النمذجة والمحاكاة (انظر الفصل الرابع).



الشكل *(5.3)*: توضيح أبعاد خلايا عش النحل.

7.3 النفاثة *(9)*

تعتبر النفاثة من أهم مكونات القناة الهوائية وأكثرها تأثيراً على مواصفات الجريان في قسم الاختبار نظراً لأنها القسم الذي يسبق قسم الاختبار مباشرة ولا يوجد أي قسم آخر بينهما *[34,31]*، وبالتالي فإن أي خطأ في تصميمها سوف ينعكس بشكل مباشر على الجريان في قسم الاختبار حيث لا توجد إمكانية تقنية لتصحيحه. من هنا تأتي أهمية تصميم النفاثة بشكل جيد والحرص على الحصول على جريان بجودة عالية عند مخرجها أي عند مدخل قسم الاختبار، وذلك يعني بشكل

أساسي الحصول على جريان منتظم ذي معامل درجة اضطراب صغير تحدد قيمته حسب طبيعة التجارب التي نريد إجراءها في القناة وبالسرعة المطلوبة. يشمل تصميم النفاثة تحديد طولها ونسبة التضيق والمنحني الذي يمثل شكل الجدار.
ممكن تجنب الانفصام في النفاثة بزيادة طولها بمقدار كافٍ لعدم حدوث الانفصام شريطة أن يكون شكل جدار النفاثة مناسباً لعدم نمو الطبقة الحدية بشكل زائد بالقرب من المخرج، لكن زيادة طول النفاثة يؤدي إلى زيادة نمو الطبقة الحدية ناهيك عن زيادة الكلفة والمساحة المطلوبة للقناة، ومن جهة أخرى فإن النفاثة القصيرة جداً لها سيئات لا يمكن تجاهلها مثل مشكلة انفصام الطبقة الحدية، على سبيل المثال عندما يتم تقصير النفاثة بمقدار ΔL فإن المسافة ما قبل النفاثة والمسافة التي تليها سوف يتشوه فيها بروفيل السرعة بسبب تقوس خطوط التيار بشكل زائد نسبياً *[10]*. ونسبة التضيق التي تستخدم عادة في الأقنية الصغيرة تكون في المجال *6 – 9* حسب *[36]* وفي المجال *6 – 10* حسب *[10]*. وبناءً على ذلك وبالاستفادة من *[43]* فقد اخترنا أن تكون نسبة التضيق *6.25*.
عند تصميم النفاثة يجب أن نضمن ما يلي *[30,15,14,10]*:

1. عدم حدوث انفصام للطبقة الحدية في النفاثة.
2. الحصول على جريان منتظم بمستوى الاضطراب المطلوب و بالسرعة المطلوبة عند مخرج النفاثة.

بعد البحث عن مراجع مختلفة لتحديد شكل جدار النفاثة *[69,68,67,30]* وصلنا إلى ثلاثة تصاميم مختلفة لشكل الجدار، ولاختيار الشكل الأكثر ملاءمة قمنا بتصميم ثلاثة نفاثات باستخدام برنامج الأوتوكاد ***Autocad*** كل واحدة لها شكل جدار مختلف عن الأخرى بحسب الطريقة المتبعة في كل مرجع، ثم قمنا بإجراء نمذجة باستخدام برنامج جامبيت ***Gambit*** ومحاكاة باستخدام برنامج ***Fluent*** للنفاثات الثلاثة لاختيار التصميم الأفضل حسب المعايير التالية:

- معامل درجة الاضطراب.
- توزع السرعة.
- عدم حصول انفصام للطبقة الحدية على الجدار.
- الوصول للسرعة المطلوبة عند مخرج النفاثة.
- مراعاة سماكة الطبقة الحدية.
- انخفاض الضغط عبر النفاثة.

1.7.3 تصميم النفاثة حسب بورجر *Boerger*

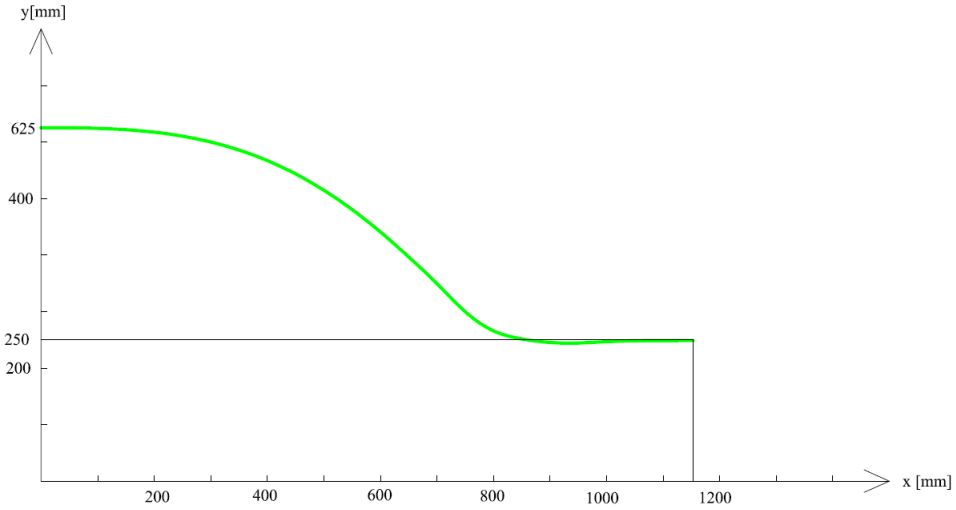
يعتبر تصميم بورجر *[67]* من أهم وأشهر التصاميم المعروفة لنفاثات الأقنية الهوائية تحت الصوتية، حيث أن هذا التصميم حائز على براءة اختراع في عام *1976*، وقد تم استخدام هذا التصميم في عدة أقنية معروفة في جامعات مختلفة مثل جامعة براونشفايغ ***Braunschweig*** وجامعة روستوك ***Rostock*** في ألمانيا، كما أنه يوجد برنامج حاسوبي معمول بلغة الفورتران للمساعدة بتصميم النفاثة حسب الطريقة التي اقترحها بورجر. من أجل استخدام هذا البرنامج يجب معرفة كل من ارتفاع مدخل النفاثة ومخرجها، ومن ثم يطلب البرنامج عدد من المدخلات الخاصة بعملية المعالجة ضمن البرنامج يتم حسابها من المخططات الملحقة به لتنفيذ البرنامج استناداً لارتفاع المدخل والمخرج، وبعد تنفيذه وإجراء المعالجة اللازمة نحصل على قيم الإحداثيات الممثلة لجدار النفاثة كما يعطينا أيضاً الطول المناسب للنفاثة. وفي هذا السياق لابد من تقديم

الشكر الجزيل لمعهد ميكانيك السوائل في جامعة روستوك الذي زودنا عن طريق المشرف العلمي بالبرنامج التنفيذي لطريقة بورجر وتم استخدامه في حساباتنا.

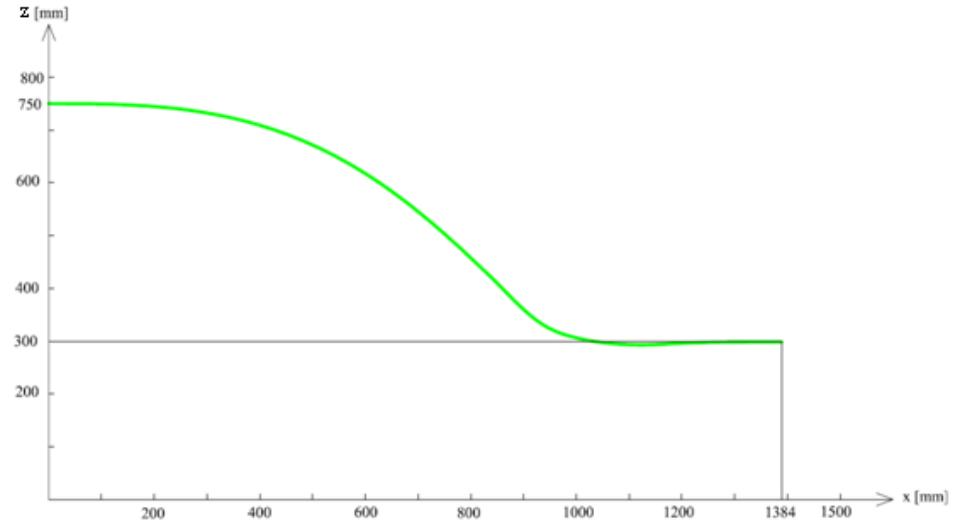
بما أن النفاثة التي نريد تصميمها ذات مقطع عرضي بشكل مستطيل فقد توجب علينا تصميم كل من المنحني الممثل للوجه الجانبي للنفاثة والمنحني الممثل للوجه العلوي لها. من أجل تصميم الوجه الجانبي قمنا بإدخال ارتفاع المدخل $H_i = 1250\,mm$ وارتفاع المخرج $H_e = 500\,mm$ ، ومن أجل تصميم الوجه العلوي قمنا بإدخال ارتفاع المدخل $H_i = 1500\,mm$ وارتفاع المخرج $H_e = 600\,mm$ وبقية المدخلات الخاصة بالبرنامج، وبنتيجة الحساب حصلنا على إحداثيات المنحني الممثل للنفاثة والموضحة في الجدول *(2.3)*. ثم قمنا بتمثيل هذه الإحداثيات بيانياً كما هو موضح في الشكلين *(6.3)* و *(7.3)*، والشكل *(8.3)* يوضح شكل النفاثة المصممة حسب بورجر.

الجدول *(2.3)*: إحداثيات المنحنيات الممثلة لجدران النفاثة حسب الطرق الثلاثة المعتمدة:

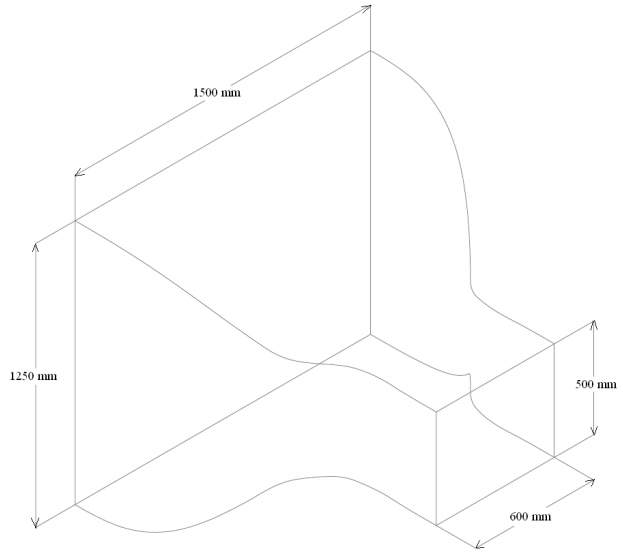
طريقة جامعة روستوك			طريقة بورجر			طريقة كثيري الحدود المتلاقيين		
z [mm]	***y [mm]***	***x [mm]***	***z [mm]***	***y [mm]***	***x [mm]***	***z [mm]***	***y [mm]***	***x [mm]***
750	*625*	*0*	*750*	*625*	*0*	*750*	*625*	*0*
745.1	*620.9*	*50*	*749.9*	*624.9*	*50*	*749.9*	*624.9*	*50*
731.7	*609.8*	*100*	*749.3*	*624*	*100*	*749.3*	*624.4*	*100*
711.8	*593.2*	*150*	*747.6*	*621.6*	*150*	*747.5*	*622.9*	*150*
687.1	*572.6*	*200*	*744.5*	*617.2*	*200*	*744.2*	*620.1*	*200*
658.9	*549.1*	*250*	*739.5*	*610.1*	*250*	*738.6*	*615.5*	*250*
628.5	*523.8*	*300*	*732.1*	*599.7*	*300*	*730.3*	*608.5*	*300*
597.1	*497.5*	*350*	*722*	*585.4*	*350*	*718.6*	*598.9*	*350*
565.3	*471.1*	*400*	*708.7*	*566.6*	*400*	*703.2*	*586*	*400*
534.1	*445.1*	*450*	*691.9*	*542.9*	*450*	*683.4*	*569.5*	*450*
504	*420*	*500*	*671.1*	*513.8*	*500*	*658.6*	*548.8*	*500*
475.4	*396.2*	*550*	*646.1*	*479.4*	*550*	*628.3*	*523.6*	*550*
448.7	*373.9*	*600*	*616.6*	*439.7*	*600*	*592.1*	*493.4*	*600*
424.2	*353.5*	*650*	*582.6*	*395.4*	*650*	*549.2*	*457.6*	*650*
402.1	*335.1*	*700*	*544.1*	*347.8*	*700*	*507.7*	*423.1*	*692*
382.4	*318.6*	*750*	*501.7*	*298.6*	*750*	*499.4*	*416*	*700*
365.1	*304.2*	*800*	*455.8*	*265.9*	*800*	*445.7*	*371.3*	*750*
350.2	*291.8*	*850*	*407.6*	*252.4*	*850*	*398*	*331.6*	*800*
337.7	*281.4*	*900*	*358.3*	*246.5*	*900*	*360.9*	*300.7*	*850*
327.3	*272.8*	*950*	*323.4*	*245.8*	*950*	*334.9*	*279.1*	*900*
319	*265.8*	*1000*	*307*	*248.3*	*1000*	*318.3*	*265.2*	*950*
312.6	*260.5*	*1050*	*298.5*	*249.6*	*1050*	*308.6*	*257.2*	*1000*
307.7	*256.5*	*1100*	*294.9*	*249.9*	*1100*	*303.6*	*253*	*1050*
304.3	*253.6*	*1150*	*295.4*	*250*	*1150*	*301.2*	*251*	*1100*
302.1	*251.8*	*1200*	*298*	*250*	*1200*	*300.3*	*250.3*	*1150*
300.8	*250.7*	*1250*	*299.4*	*250*	*1250*	*300.1*	*250.1*	*1200*
300.2	*250.2*	*1300*	*299.9*	*250*	*1300*	*300*	*250*	*1250*
300	*250*	*1350*	*300*	*250*	*1350*	*300*	*250*	*1300*
300	*250*	*1384*	*300*	*250*	*1384*	*300*	*250*	*1350*
						300	*250*	*1384*



الشكل *(6.3)*: شكل المنحني الممثل للوجه الجانبي للنفاثة حسب بورجر.



الشكل *(7.3)*: شكل المنحني الممثل للوجه العلوي للنفاثة حسب بورجر.



الشكل *(8.3)*: النفاثة المصممة حسب بورجر بطول *1384 mm*.

2.7.3 تصميم النفاثة بطريقة كثيري الحدود المتلاقيين في نقطة

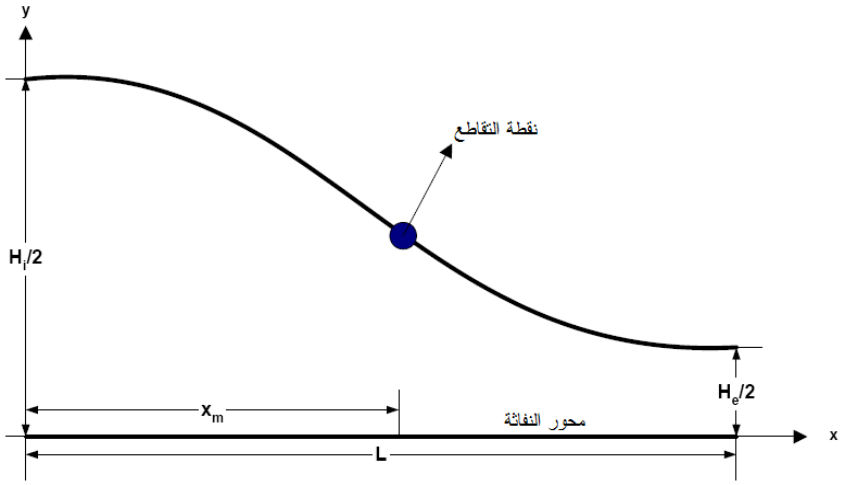
لتصميم النفاثة اقترح العالم مورل *Morel* في عام *1975 [68,30]* أن يتم تشكيل المنحني الممثل لجدار النفاثة من منحنيين ممثلين بمعادلتين من الدرجة الثالثة، والشكل *(9.3)* يوضح شكل النفاثة التي نحصل عليها بهذه الطريقة حيث H_i هو ارتفاع مدخل النفاثة و H_e ارتفاع مخرج النفاثة والطول الكلي للنفاثة هو L وكثيرا الحدود الممثلان لشكل جدار النفاثة يلتقيان في نقطة معينة على بعد $x = x_m$ من بداية مقطع الدخول للنفاثة.

العالم سو *Su* في عام *1991 [69,30]* اقترح أن يكون منحني الدخول من الدرجة الثالثة وأن يتم تقاطعه مع منحني من درجة أعلى عند المخرج، وقد تم استخدام هذه الطريقة في تصميم النفاثة في القناة الهوائية الخاصة بالقياسات الصوتية *Anechoic wind tunnel facility* في جامعة فلوريدا *[30]*، حيث تم استخدام كثير حدود من الدرجة الثالثة عند المدخل، المعادلة *(7.3)*، وكثير حدود من الدرجة الثامنة عند المخرج، المعادلة *(8.3)*.

$$y = \frac{a_{31}}{H_e^2} \cdot x^3 + H_e \cdot \sqrt{CR} \qquad (7.3)$$

$$y = H_e \cdot a_{82} \cdot \left(\frac{L-x}{H_e}\right)^8 + H_e \cdot a_{72} \cdot \left(\frac{L-x}{H_e}\right)^7 + H_e \qquad (8.3)$$

حيث a_{31} ، a_{72} ، a_{82} هي ثوابت رياضية يتم حسابها من المعادلات *(9.3)*، *(10.3)*، *(11.3)* ولحسابها يجب إعطاء نقطة تلاقي المنحنيين X_m و CR نسبة التضيق.



الشكل *(9.3)*: تمثيل كثيري الحدود من الدرجة الثالثة اللذين يشكلان جدار النفاثة *[68,30]*.

$$\left(X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^3 \cdot a_{31} - \left(\frac{L}{H_e} - X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^8 \cdot a_{82} - \left(\frac{L}{H_e} - X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^7 \cdot a_{72} = 1 - \sqrt{CR} \qquad (9.3)$$

$$3 \cdot \left(X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^2 \cdot a_{31} + 8 \cdot \left(\frac{L}{H_e} - X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^7 \cdot a_{82} + 7 \cdot \left(\frac{L}{H_e} - X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^6 \cdot a_{72} = 0 \qquad (10.3)$$

$$6 \cdot X \cdot \frac{L}{H_e} \cdot a_{31} - 56 \cdot \left(\frac{L}{H_e} - X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^6 \cdot a_{82} - 42 \cdot \left(\frac{L}{H_e} - X \cdot \frac{L}{H_e}\right)^5 \cdot a_{72} = 0 \qquad (11.3)$$

لذا يجب تعويض بعض القيم الضرورية لإيجاد المعادلتين الممثلتين لجدار النفاثة، وهنا أيضاً يجب أن يتم الحساب مرتين الأولى من أجل الوجه الجانبي للنفاثة و الثانية من أجل الوجه العلوي ، القيم المطلوبة هي الطول والذي اعتمدنا قيمته الناتجة من الحسابات وفق طريقة بورجر والبالغة $L=1.384m$ ، نسبة التضيق $CR=6.25$ ، ارتفاع المخرج والذي يساوي في حالة حساب الوجه العلوي $H_e=0.6m$ وفي حالة حساب الوجه الجانبي $H_e=0.5m$ ، نقطة تلاقي المنحنيين $X=0.5$ ، بتعويض هذه القيم في المعادلات *(9.3)*، *(10.3)*، *(11.3)* يمكن إيجاد الثوابت الرياضية a_{31} ، a_{72} ، a_{82} ، ثم بتعويض قيم هذه الثوابت في المعادلتين *(7.3)* و *(8.3)* نصل للمعادلتين الممثلتين لجدار النفاثة.

من أجل الوجه الجانبي:

$$\left(0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^3\cdot a_{31}-\left(\frac{1.384}{0.5}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^8\cdot a_{82}-\left(\frac{1.384}{0.5}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^7\cdot a_{72}=1-\sqrt{6.25} \qquad (9.3)$$

$$6\cdot 0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\cdot a_{31}-56\cdot\left(\frac{1.384}{0.5}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^6\cdot a_{82}-42\cdot\left(\frac{1.384}{0.5}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^5\cdot a_{72}=0 \qquad (10.3)$$

$$3\cdot\left(0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^2\cdot a_{31}+8\cdot\left(\frac{1.384}{0.5}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^7\cdot a_{82}+7\cdot\left(\frac{1.384}{0.5}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.5}\right)^6\cdot a_{72}=0 \qquad (11.3)$$

بحل المعادلات الثلاثة حلاً مشتركاً باستخدام برنامج خاص لحل المعادلات نحصل على قيم الثوابت الرياضية:

$$a_{72}=0.3203\ ،\ a_{82}=-0.18\ ،\ a_{31}=-0.3047$$

بتعويض هذه القيم في المعادلتين *(7.3)* و *(8.3)* نحصل على المعادلتين الممثلتين لمنحني النفاثة على الوجه الجانبي حيث الأولى تمثل شكل الجدار من بداية النفاثة حيث مساحة المقطع الكبيرة وحتى المنتصف، والثانية من المنتصف وحتى مساحة المقطع الصغيرة:

$$y=-0.2188\cdot x^3+1.25 \qquad (7.3)$$

$$y=-0.09\cdot\left(\frac{1.384-x}{0.5}\right)^8+0.16015\cdot\left(\frac{1.384-x}{0.5}\right)^7+0.5 \qquad (8.3)$$

من أجل الوجه العلوي:

$$\left(0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^3\cdot a_{31}-\left(\frac{1.384}{0.6}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^8\cdot a_{82}-\left(\frac{1.384}{0.6}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^7\cdot a_{72}=1-\sqrt{6.25} \qquad (9.3")$$

$$3\cdot\left(0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^2\cdot a_{31}+8\cdot\left(\frac{1.384}{0.6}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^7\cdot a_{82}+7\cdot\left(\frac{1.384}{0.6}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^6\cdot a_{72}=0 \qquad (10.3")$$

$$6\cdot 0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\cdot a_{31}-56\cdot\left(\frac{1.384}{0.6}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^{6}\cdot a_{82}-42\cdot\left(\frac{1.384}{0.6}-0.5\cdot\frac{1.384}{0.6}\right)^{5}\cdot a_{72}=0 \qquad (''11.3)$$

بحل المعادلات الثلاثة حلاً مشتركاً نحصل على قيم الثوابت الرياضية:

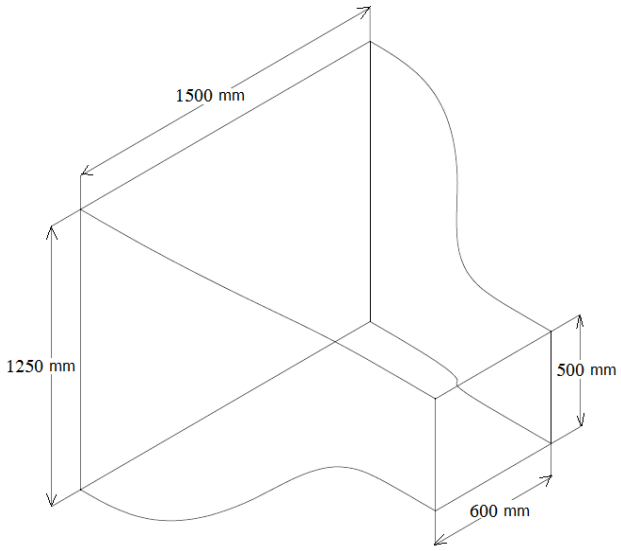
$$a_{72}=1.148\ ،\ a_{82}=-0.774\ ،\ a_{31}=-0.5265$$

بتعويض هذه القيم في المعادلتين *(7.3)* و *(8.3)* نحصل على المعادلتين الممثلتين لمنحني النفاثة على الوجه العلوي:

$$z=-1.4625\cdot x^{3}+1.5 \qquad (''7.3)$$

$$z=-0.4644\cdot\left(\frac{1.384-x}{0.6}\right)^{8}+0.6888\cdot\left(\frac{1.384-x}{0.6}\right)^{7}+0.6 \qquad (''8.3)$$

الجدول *(2.3)* يبين إحداثيات المنحني الممثل لجدار النفاثة حسب هذه الطريقة، والشكل *(10.3)* يوضح النفاثة التي تم تصميمها استناداً لهذه الطريقة.



الشكل *(10.3)*: النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقية بنقطة بطول *1384 mm*.

3.7.3 تصميم النفاثة حسب معادلة جامعة روستوك

كما تم تصميم النفاثة حسب معادلة من الدرجة الثالثة التي حصل عليها المشرف العلمي من معهد ميكانيك السوائل بجامعة روستوك *[71]* بالصيغة:

$$y=(H_i-H_e)\left(\frac{L-x}{L}\right)^{3}\left[2-\left(\frac{L-x}{L}\right)^{3}\right]+H_e \qquad (12.3)$$

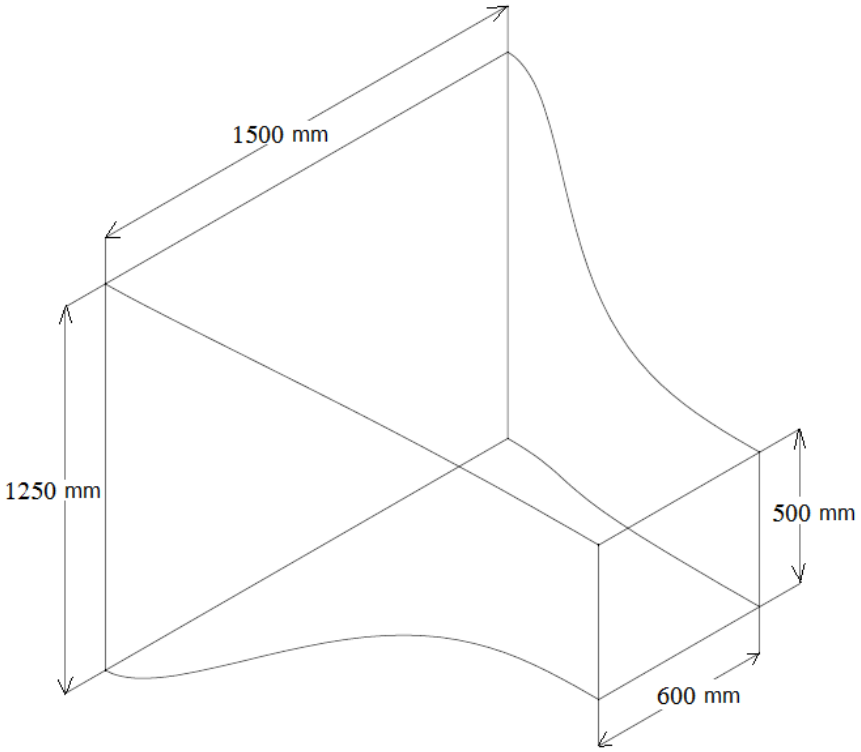
وبالتالي تصبح المعادلة من أجل الوجه الجانبي:

$$y=(750)\left(\frac{1384-x}{1384}\right)^{3}\left[2-\left(\frac{1384-x}{1384}\right)^{3}\right]+500 \qquad ('12.3)$$

من أجل الوجه العلوي:

$$z = (900)\left(\frac{1384-x}{1384}\right)^3\left[2-\left(\frac{1384-x}{1384}\right)^3\right]+600 \qquad ("12.3)$$

الجدول *(2.3)* يبين إحداثيات المنحني الممثل لجدار النفاثة حسب هذه الطريقة، والشكل *(11.3)* يوضح شكل النفاثة المصممة استناداً لهذه الطريقة، وذلك باعتماد القيمة الناتجة من الحساب وفق طريقة بورجر لطول النفاثة.



الشكل *(11.3)*: النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك.

4.6.3 مقارنة التصاميم الثلاثة للنفاثة واختيار الحل

الشكلان *(12.3)* و*(13.3)* يوضحان التمثيل البياني لمنحني الجدار للوجه الجانبي والعلوي للنفاثة حسب التصاميم الثلاثة. نلاحظ من الشكلين التقارب الواضح بين المنحنيين المصممين حسب طريقة بورجر وطريقة كثيري الحدود المتلاقيين، ولكن هناك فرق ملحوظ بين هذين التصميمين والتصميم بحسب معادلة جامعة روستوك. لذا سينحصر اختيارنا بين التصميم حسب بورجر والتصميم حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين، وللحصول على مقارنة أكثر مصداقية ومقاربة للواقع الفعلي سنربط قرار الاختيار والحل الأمثلي مع نتائج نمذجة ومحاكاة للتصاميم الثلاثة (راجع الفصل الرابع).

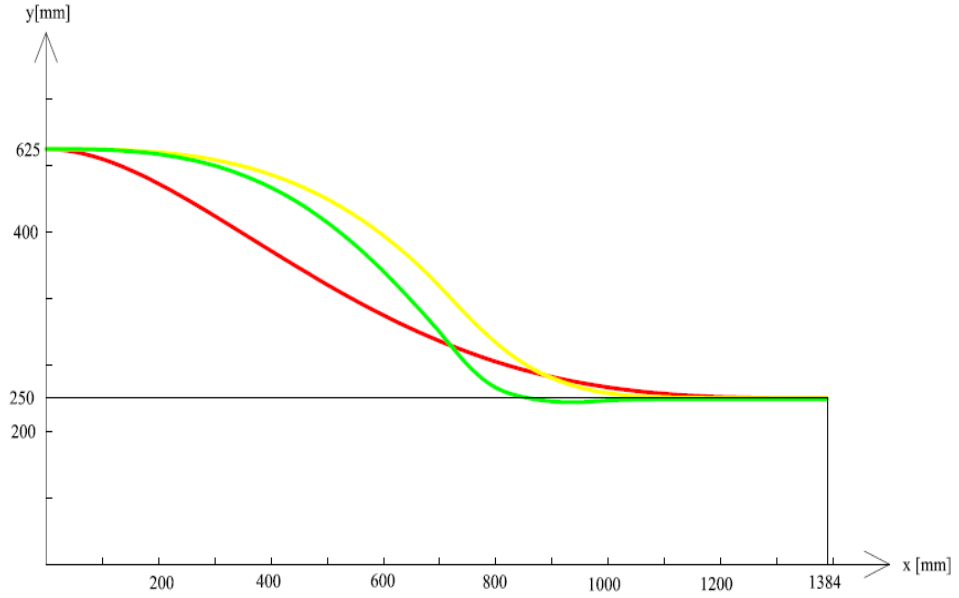
7.3 الهيكل المعدني الحامل للقناة

تم تصميم هيكل معدني فولاذي ليحمل القناة وليضمن تثبيتها بشكل مناسب بحيث يمنع الاهتزازات ويحمي القناة الهوائية ويضمن تثبيت قسم الاختبار وقسم المروحة بشكل جيد، كما راعينا المساحة المتاحة في مخبر ميكانيك السوائل في الكلية الذي نريد تركيب القناة الهوائية فيه. سيتم تصميم الهيكل من بروفيلات مربعة الشكل مصنوعة من الفولاذ المغلفن. يستند الهيكل على *24* رجلاً. الجدول *(3.3)* يبين كتلة عناصر القناة وكتلة القناة الهوائية كاملة سواء تم تصنيعها من الستانلس ستيل ذي الكثافة $8030\ kg/m^3$ أو من الفولاذ المغلفن ذي الكثافة $7850\ kg/m^3$، تم حساب مساحة كل عنصر من

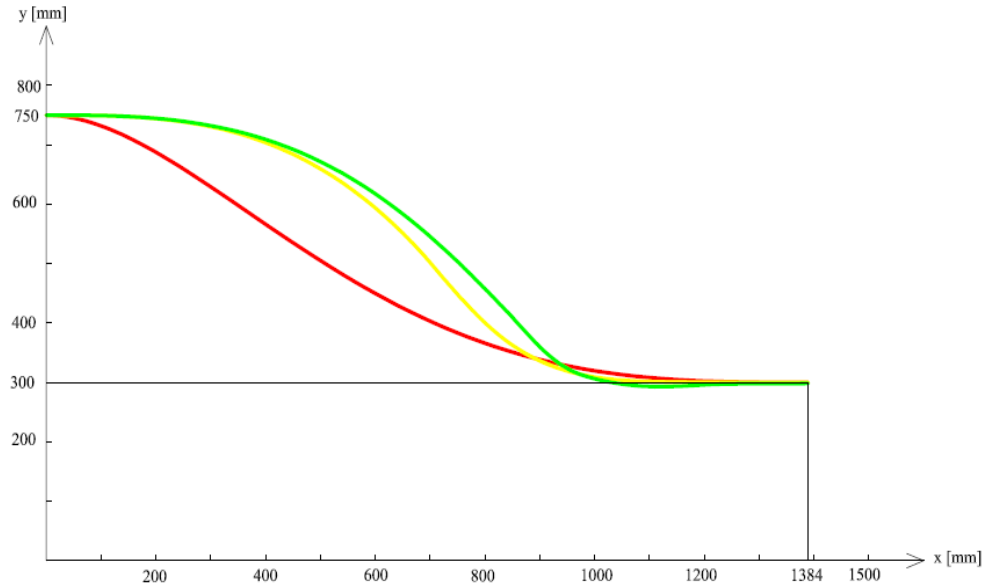
عناصر القناة الهوائية بالاستفادة من برنامج الأوتوكاد ثم بمعرفة السماكة والتي هي *3 mm* تم حساب الحجم، أما الكتلة فحسبت بالاعتماد على كثافة المعدن المستخدم، النفاثة ستصنع من الفيبرجلاس ذي الكثافة $1529\ kg/m^3$. الكتلة الكلية للقناة إذا تم تصنيعها من الستانلس ستيل وهو الأثقل تبلغ *2669.1 kg*، وبالتالي الكتلة التي تحملها كل رجل من أرجل الهيكل المعدني هي:

$$w = 2669.1 \div 24 = 111.2\,kg$$

أي *1090.9 N* ومساحة مقطع رجل الهيكل هي $1200\ mm^2$ وبالتالي الإجهاد هو $0.9\ N/mm^2$. وحيث أن إجهاد الانضغاط للفولاذ يبلغ $165.7\ N/mm^2$ *[81]*، وبالتالي فإن المتانة محققة. المخططات التنفيذية للهيكل المعدني يتضمنها الملحق *B* (الفقرة *2.11*، ص*201*).



الشكل *(12.3)*: منحني جدار الوجه الجانبي للنفاثة حسب التصاميم الثلاثة. الأحمر حسب معادلة جامعة روستوك، الأخضر حسب طريقة بورجر، والأصفر حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين بنقطة.



الشكل *(13.3)*: منحني جدار الوجه العلوي للنفاثة حسب التصاميم الثلاثة. الأحمر حسب معادلة جامعة روستوك، الأخضر حسب طريقة بورجر، والأصفر حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين بنقطة.

الجدول *(3.3)*: مساحة وحجم وكتلة كل عنصر من عناصر القناة الهوائية في حال تصنيعها من الستانلس ستيل أو الفولاذ المغلفن. كتلة الأكواع بدون ريش التوجيه:

العنصر	المساحة $[m^2]$	الحجم $[m^3]$	الكتلة فولاذ مغلفن [kg]	الكتلة ستانلس ستيل [kg]
قسم الاختبار *(1)*	2.163062	0.01081531	84.9001835	86.8469393
المجمع *(2.1.1)*	0.580580385	0.001741741	13.67266807	13.98618147
الناشرة *(2.1)*	7.082189	0.021246567	166.785551	170.609933
الكوع *(3.1,2)*	12.49821523	0.037494646	294.3329685	301.0820048
الناشرة *(2.2)*	3.3571	0.0100713	79.059705	80.872539
غلاف قسم المروحة *(6)*	5.64729868	0.016941896	132.9938839	136.0434252
الناشرة *(2.3)*	5.94998292	0.017849949	140.1220978	143.3350885
المقطع الانتقالي *(7)*	5.07882116	0.015236463	119.6062383	122.3488017
الكوع *(3.3,4)*	20.62065189	0.061861956	485.6163519	496.7515039
الناشرة *(2.4)*	4.00177557	0.012005327	94.24181467	96.40277348
حجرة الاستقرار*(8)*	6.70287469	0.020108624	157.8526989	161.4722513
النفاثة *(9)* (فيبرجلاس)	5.215846695	0.052158467	63.8	63.8
المروحة والمحرك			500	500
الفلانجات والبراغي			295.6	295.6
المجموع			2628.5	2669.1

8.3 الخلاصة والاستنتاجات

لقد تم في هذا الفصل شرح وتوضيح الأسس والمبادئ التصميمية لمكونات القناة الهوائية كافة. كما قمنا بتصميم النفاثة وفقاً لثلاثة طرق مختلفة: طريقة بورجر *[67]*، طريقة كثيري الحدود المتلاقيين بنقطة *[69,68,30]* ومعادلة قدمتها جامعة روستوك *[71]*. قمنا بتصميم النفاثة حسب بورجر بعد أن تمكنا من الحصول على نسخة من برنامج بورجر من جامعة روستوك قمنا بواسطتها بإجراء الحساب اللازم للوصول إلى إحداثيات المنحني الممثل لجدار النفاثة، علماً أن طريقة بورجر مستخدمة في تصميم نفاثات العديد من الأقنية الهوائية مثل بعض الأقنية الموجودة في جامعة براونشفايغ ***Braunschweig*** بألمانيا. أما التصميم حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقية فقد اعتمدنا على أطروحة الدكتوراه المقدمة في جامعة فلوريدا من قبل خوسيه ماثيو ***Jose Mathew*** *[30]* بالدرجة الأولى حيث أنه اعتمد هذه الطريقة لتصميم النفاثة الخاصة بالقناة التي صممها وصنعها واختبرها وقد أعطت نتائج جيدة فعلاً. كما قمنا بعمل تصميم ثالث بالاستفادة من معادلة خاصة لحساب النفاثة في الأقنية الهوائية حصلنا عليها من جامعة روستوك أيضاً، وقد أجرينا مقارنة لجدار النفاثة المصمم حسب الطرق الثلاثة تمهيداً لعمل نمذجة ومحاكاة للتصاميم الثلاثة لاختيار التصميم الأفضل من بينها، حيث سيبين الفصل الرابع مراحل عملية النمذجة والمحاكاة.

المخططات التنفيذية للتصميم النهائي لعناصر القناة والهيكل المعدني الحامل يتضمنها الملحق *B* (الفقرة *2.11*، ص *201*).

الفصل الرابع

نمذجة ومحاكاة الجريان في القناة الهوائية باستخدام برنامج ***Fluent***

مدخل

لقد تضمن الفصل الثالث تصميم القناة الهوائية ووضع المخططات التنفيذية اللازمة لعملية التصنيع. في هذا الفصل سوف نتأكد من كفاءة التصميم الذي توصلنا إليه من خلال نمذجة ومحاكاة رقمية للجريان داخل القناة باستخدام برنامج *Fluent 6.3* نظراً لتوفره وثبات كفاءته في محاكاة الأقنية الهوائية *[40,30,9]*، حيث سنقوم بعمل نمذجة ومحاكاة لكامل القناة الهوائية بكافة مكوناتها وكأنها في حالة عمل وليس بأخذ أحد عناصر القناة فقط وتطبيق الشروط الحدية عند مدخله ومخرجه وبهذا سوف نلاحظ تأثير أجزاء القناة على بعضها البعض. أيضاً فقد تم إيلاء قسم النفاثة اهتماماً خاصاً حيث تمت عملية النمذجة والمحاكاة للنفاثة المصممة حسب الطرق الثلاثة المذكورة سابقاً لاختيار الشكل الأفضلي للنفاثة بناءً على نتائج النمذجة والمحاكاة.

1.4 مراحل عملية النمذجة والمحاكاة

تتألف عملية النمذجة والمحاكاة من ثلاث مراحل: الأولى مرحلة ما قبل المعالجة *pre-processing*، والثانية مرحلة الحل التحليلي *analysis solver*، و الثالثة هي مرحلة ما بعد المعالجة *post-processing [50]*.

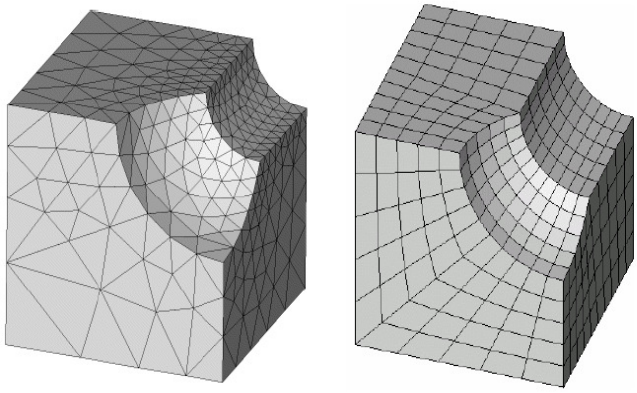
في المرحلة الأولى يتم تصميم النموذج بمساعدة أحد البرامج الخاصة بالتصميم الهندسي مثل الأوتوكاد *AutoCAD* ثم يتم تقسيمه إلى عناصر صغيرة سطحية في الحالة ثنائية البعد وحجمية في الحالة ثلاثية البعد من أجل توليد الشبك *Mesh generation* السطحي أو الحجمي باستخدام برامج خاصة مثل برنامج *Gambit* ثم يتم تعريف الشروط الحدية التي تشمل القوى المؤثرة على النموذج وخواص المواد والعناصر المتحركة الثابتة، بعد ذلك يجب اختيار مولد الحل *Solver* أي اختيار معادلات الحركة والحالة والاضطراب المراد تطبيقها في الحل. في المرحلة الثانية يتم تحليل النموذج الذي تم تعريفه في المرحلة الأولى. أما المرحلة الثالثة فيتم خلالها عرض النتائج وتحليلها باستخدام أدوات العرض والمخططات *[50]*. سنعرض في الفقرات اللاحقة الخطوات التنفيذية لمراحل عملية النمذجة والمحاكاة.

1.1.4 توليد الشبك *Mesh*

المقصود بهذه العملية هو تجزئة النموذج الذي نريد تحليله و محاكاته له باستخدام برنامج محاكاة مناسب. وقد استخدمنا برنامج *Gambit2.3 [84]* الذي يساعد على توليد الشبك بشكل آلي بعد تحديد قياس عنصر الشبك. يوجد نوعان من الشبك في برنامج *Gambit*: الشبك ذي البنية *Structured* والشبك عديم البنية *Unstructured*، الشكل *(1.4)*.

يستخدم الشبك ذي البنية لحالة الأشكال المنتظمة وغير المعقدة. لذلك سنستخدم توليد الشبك عن طريق خاصية *Quad* في برنامج *Gambit*، مع الانتباه أن عملية توليد الشبك آلياً بشكل كامل وخاصة في المناطق ذات الحواف الحادة بزوايا صغيرة سيؤدي للحصول على شبك غير مناسب للنمذجة *[50]*. لذا فقد قمنا بتوزيع العقد يدوياً بغرض تلافي الحصول على عناصر ، مثلثات، متخالفة الجوانب بشدة *highly skewed*. ويبين الشكل *(2.4)* مثالاً على التشذيب الذي قمنا به، مع التأكيد على أن السطوح المقسمة بشكل جيد لا تضمن وبشكل دائم شبكاً سطحياً جيداً، ولذلك توجب عند

الانتهاء من تجزئة الفراغ وتوليد الشبك الحجمي فحص الشبك الناتج، وبحال وجود عناصر ذات انحراف مساحة مكافئ *equisize skew > 0.97*، نقوم بإعادة التجزئة لكل السطوح و الحروف وصولاً لعناصر حجمية أفضل*[50]*.



الشكل *(1.4)* : أنواع الشبك ، يميناً الشبك ذو البنية ، و يساراً الشبك عديم البنية، *[50]*

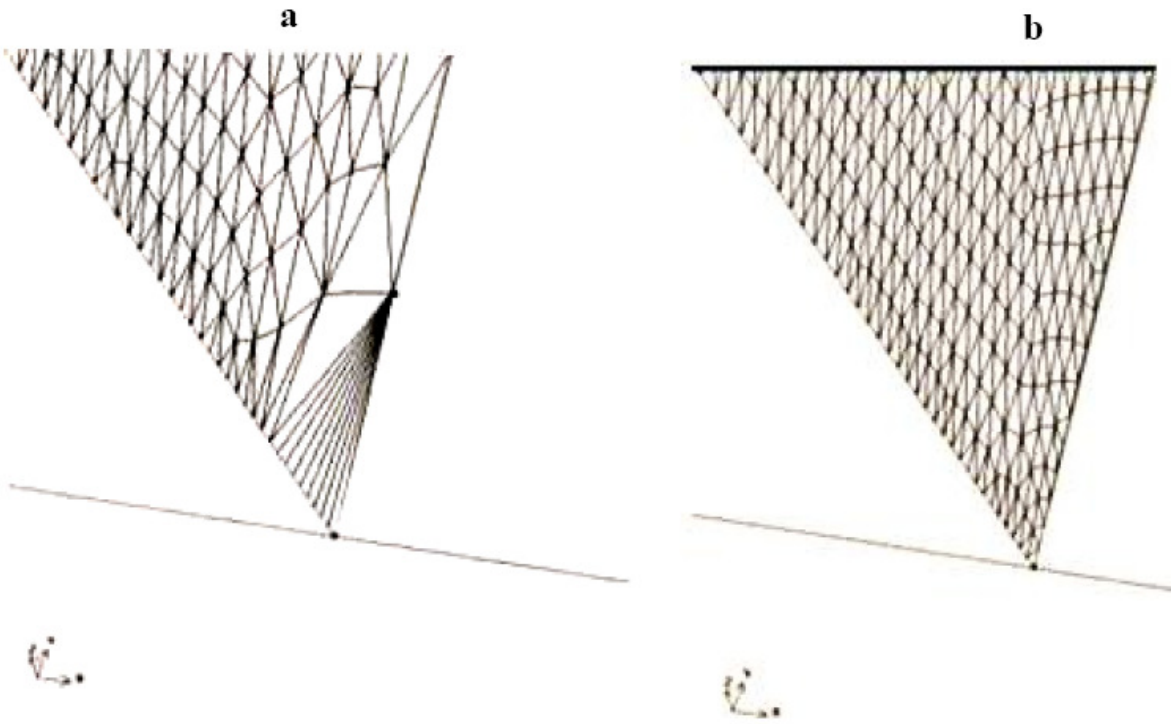
انحراف المساحة المكافئ Q_{EVS} هو مقياس للانحراف عن الشكل الأصلي ويعرف بالعلاقة:

$$Q_{EVS} = \frac{S_{eq} - S}{S_{eq}}$$

حيث S مساحة عنصر الشبك، S_{eq} المساحة الأعظمية لخلية متساوية الأضلاع نصف قطر الدائرة المحيطة بها خارجاً مطابق لنصف قطر الدائرة المحيطة بالعنصر الشبكي. ومن تعريف انحراف المساحة المكافئ:

$$0 \le Q_{EVS} \le 1$$

حيث $Q_{EVS} = 0$ تعني أن العنصر الشبكي مساوٍ للعنصر الأصلي، $Q_{EVS} = 1$ تعني أن الشكل الناتج غير مطابق نهائياً للشكل الأصلي.

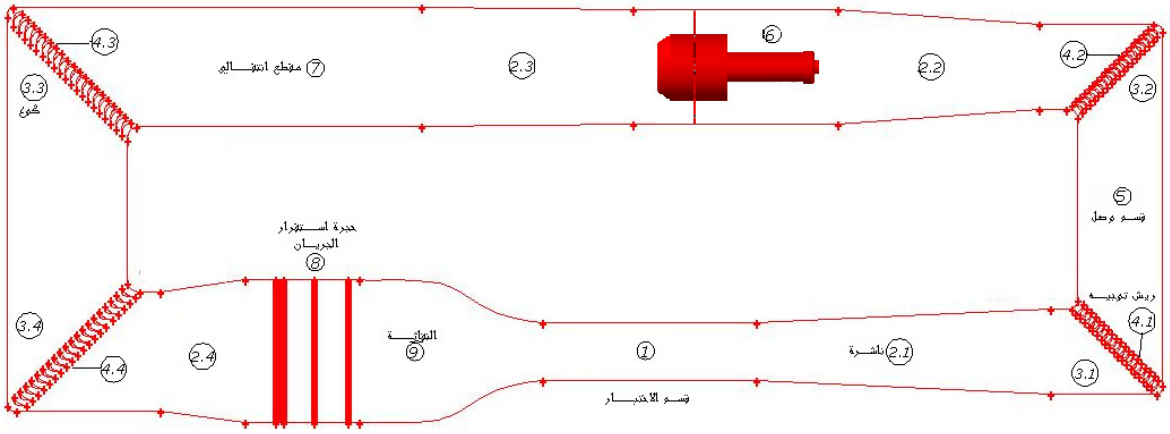


الشكل *(2.4)*: الفرق بين توليد الشبك آلياً *(a)* ويدوياً *(b) [50].*

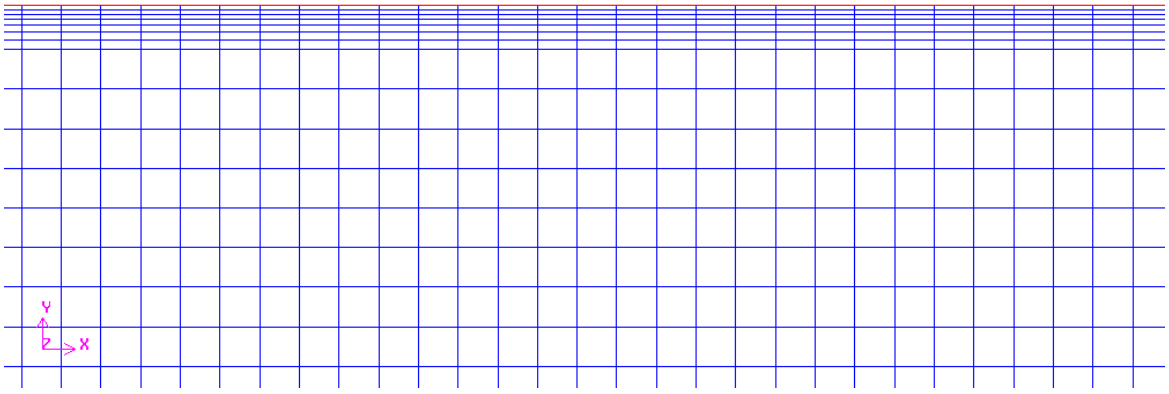
2.1.4 مجالات الحساب الرقمي *Computational Domains*

في البداية تم تصدير تصميم القناة من برنامج *AutoCAD* إلى برنامج *Gambit 2.3* عبر اللاحقة *ACIS* ، وظهر التصميم في *Gambit 2.3* كما هو موضح في الشكل *(3.4)*. وقبل البدء بعملية التجزئة وتوليد الشبك يجب علينا تحديد نطاقات الحساب.

تم توليد الشبك السطحي باستخدام خاصية الطبقة الحدية، التي تتضمن أن سماكة الطبقة الحدية أصغر بكثير من الطول المميز للجسم *[50]*، وبالتالي لحساب الجريان في الطبقة الحدية يجب أن تكون كثافة الشبك، عدد العناصر، بالقرب من جدار الجسم كبيرة جداً لتنخفض كلما ابتعدنا عنه وهذا ما يبينه الشكل *(4.4)*، الذي يظهر مقطعاً عرضياً في شبك قسم الاختبار. وقد بلغ عدد العناصر السطحية للقناة الهوائية *1,780,000* عنصر. وبعدها تم حفظ الشبك الكلي الناتج باللاحقة *msh*. وتصديرها إلى برنامج *Fluent 6.3*، علماً أن المحاكاة تمت بنظام ثنائي البعد *2D* لأن النظام ثلاثي البعد يحتاج مقدرات حاسوبية كبيرة غير متوفرة لدينا.

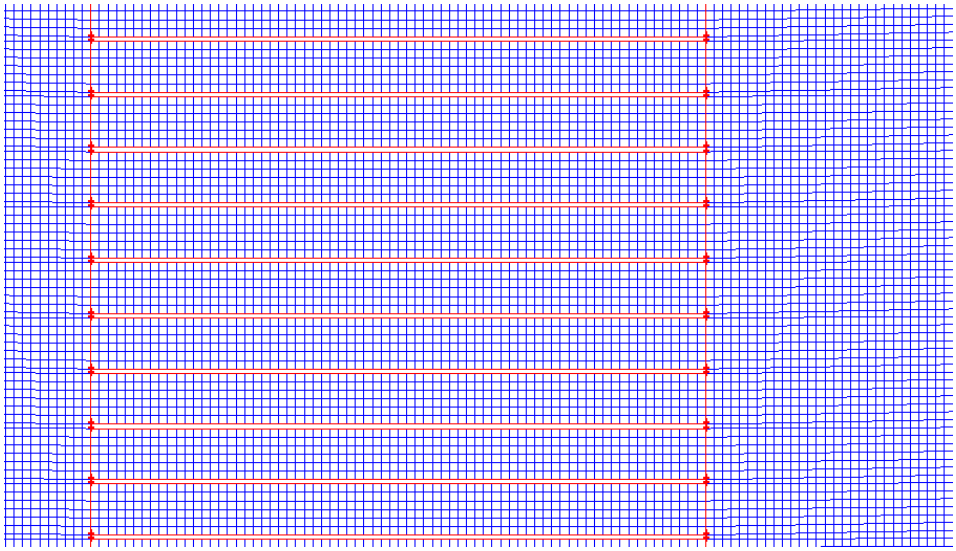


الشكل *(3.4)*: مقطع طولي للقناة الهوائية بعد تصديرها إلى برنامج *Gambit 2.3* .

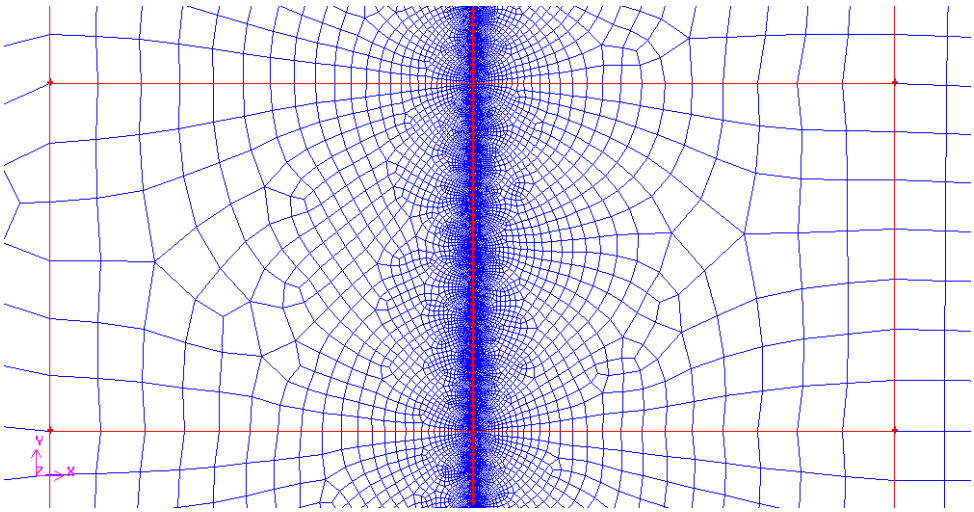


الشكل *(4.4)*: الشبك السطحي في قسم الاختبار وبالقرب من جدار قسم الاختبار لبيان الشبك في الطبقة الحدية.

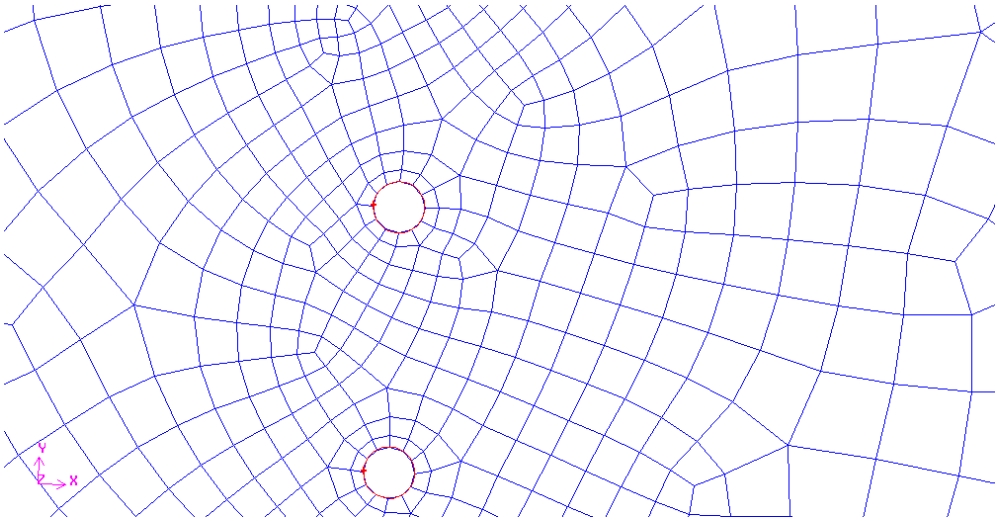
الأشكال *(4.4)*، *(5.4)*، *(6.4)*، *(7.4)*، *(8.4)*، *(9.4)* توضح الشبك السطحي لكل من قسم الاختبار، خلايا عش النحل، المناخل، الكوع الرابع مع ريش التوجيه داخله والنفاثة، حيث نلاحظ أننا حصلنا على شبك سطحي منتظم وجاهز للمعالجة باستخدام برنامج *Fluent*.



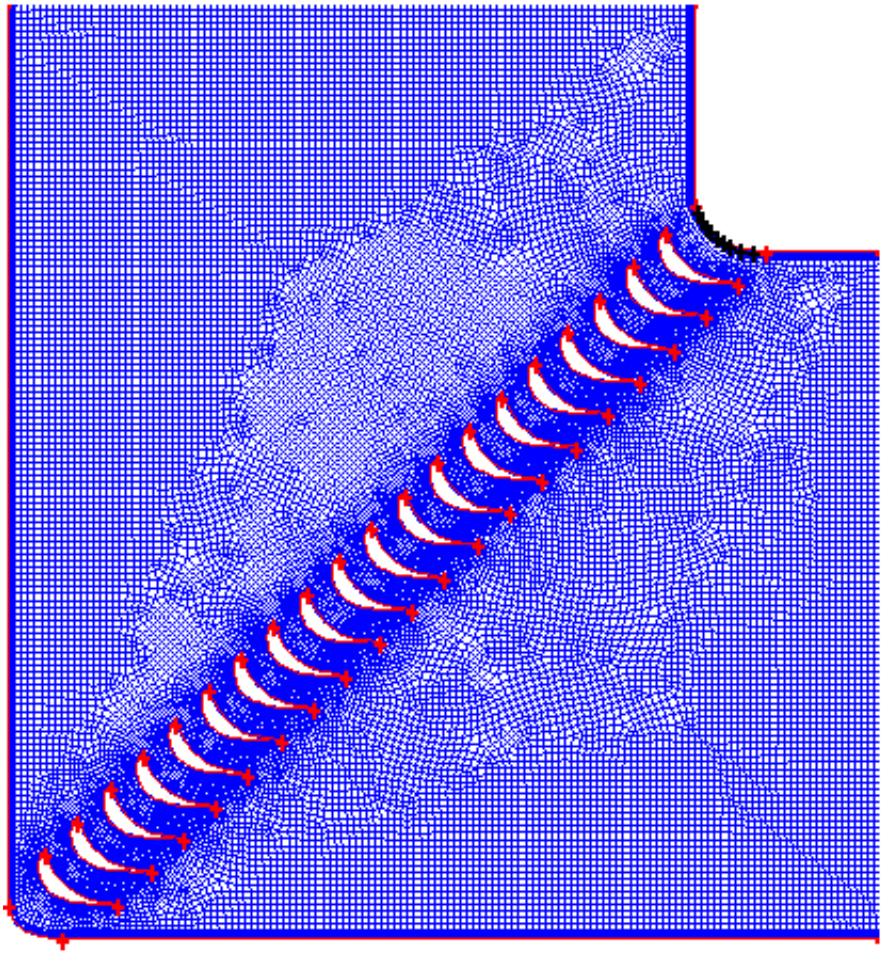
الشكل *(5.4)*: الشبك السطحي لخلايا عش النحل، الخطوط الحمراء هي جدران خلايا عش النحل.



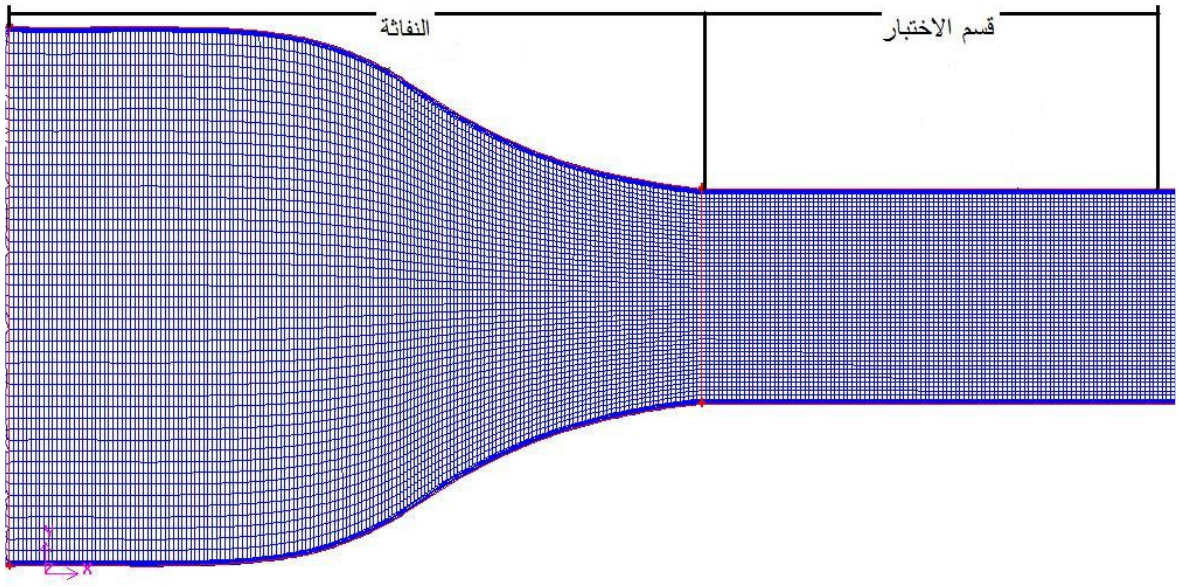
الشكل *(6.4)*: الشبك السطحي للمناخل.



الشكل *(7.4)* : الشبك السطحي حول أسلاك المناخل.



الشكل *(8.4)*: الشبك السطحي للكوع الرابع *(3.4)*.



الشكل *(9.4)*: الشبك السطحي للنفاثة *(9)* وقسم الاختبار *(1)*.

2.4 خطوات الحل في برنامج *Fluent*

سنستخدم برنامج *Fluent 6.3* لإيجاد الحل التحليلي. وهذا يتطلب تعريف النموذج الرياضي للجريان في القناة الهوائية المغلقة، الذي يستوجب بداية تحديد طريقة نمذجة الاضطراب والشرط الحدي للمروحة *[40]*.

1.2.4 نمذجة الإضطراب

إن عملية نمذجة الجريان المضطرب تتطلب حل معادلات نافير ستوكس التي تمثل حالة التوازن بين قوى العطالة والقوى الحجمية وقوى الضغط والاحتكاك المؤثرة على الجزيء الحجمي في كل لحظة، حيث يتصف الجريان المضطرب بتذبذبات حقل السرعة والضغط والحقول المرتبطة بها مع إحداثيي الزمان والمكان *[3]*. ينتج عن هذه التذبذبات عملية تمازج مستمر بين الجزيئات السائلية وترتبط بها عملية تبادل ونقل للقدرة الحركية وكمية الحركة مما يؤدي إلى تذبذب في الكميات المميزة المنقولة، وهذه التذبذبات يمكن أن تكون ذات مقاس صغير وترددات مرتفعة، وبالتالي فإن عملية النمذجة بهذه الطريقة تحتاج وقتاً وجهداً حاسوبياً كبيراً. لذا يتم اللجوء إلى المقاربة التي قام بها العالم رينولدز ***Reynolds*** حيث يتم وفقاً لهذه المقاربة التعبير عن كل متغير يتعلق بالزمن في معادلة نافير ستوكس بقيم وسطية زمنياً بالإضافة لمركبة تتغير بشكل عشوائي، أي أن الجريان المضطرب يعتبر مؤلفاً من تضام جريان أساسي شبه مستقر مع جريان إعصاري عشوائي غير مستقر، وبالتالي يمكن التعبير عن السرعة الآنية الموضعية بالعلاقة:

$$u_i = \overline{u}_i + u_i' \qquad (1.4)$$

حيث $\overline{u}_i$: مركبة السرعة الوسطية زمنياً للجريان شبه المستقر، و تعرف بالعلاقة :

$$\overline{u}_i = \frac{1}{\Delta t}\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u_i \cdot \Delta t \qquad (2.4)$$

و u_i' تمثل مركبة السرعة للحركة المتذبذبة الإهتزازية،*[2]* . بتبديل كل متغير بالمركبتين السابقتين في معادلات نافير ستوكس نحصل على ما يسمى معادلات نافير ستوكس الوسطية حسب رينولدز أو الوسطية زمنياً، ويرمز لها عادة *RANS* و التي هي اختصار لـــ *Reynolds averaged Navier-Stokes equations* ويلاحظ في هذه المعادلات ظهور إجهادات إضافية تتمثل بالحد $-\rho\overline{u_i'u_j'}$ و تدعى إجهادات رينولدز الإعصارية المماسية (قص).

$$\frac{\partial(\rho\overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho\overline{u_i u_j}\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\eta\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \overline{u_m}}{\partial x_m}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i'u_j'}\right) \qquad (3.4)$$

لحل معادلات نافير ستوكس الوسطية يجب معرفة العلاقة التي تربط الإجهادات الإعصارية مع بروفيل السرعة للجريان الوسطي وهي عادة غير معروفة، لذا يتم افتراض نماذج لهذه العلاقة موضحة على افتراضات نظرية ونتائج تجريبية. وتعد النماذج التي تعتمد فرضية بوسينسيك الأشهر بين هذه النماذج، حيث صاغ بوسينسيك علاقة مماثلة لقانون نيوتن للإحتكاك في الجريان الصفائحي وهي:

$$\tau_\omega = \eta_\omega \frac{\partial \overline{u}}{\partial n} = -\rho u_1' u_2'$$

حيث τ_ω: إجهاد القص الإعصاري و η_ω اللزوجة التحريكية الإعصارية *[3]*.

تستخدم هذه الفرضية في العديد من النماذج مثل نموذج *Spalart-Allmaras* ونموذج k-ε ونموذج k-ω. وتتميز مقاربة بوسينسيك بانخفاض الكلفة الحاسوبية المترافقة مع حساب اللزوجة الإعصارية. حيث في حال نماذج k-ε و k-ω يتم حل معادلتين إضافيتين هما معادلتا انتقال الطاقة الحركية المضطربة k و معادلة التبدد الطاقي المضطرب ε أو معادلة التبدد النوعي $\omega=k/\varepsilon$ أي أن اللزوجة الإعصارية تحسب كتابع لـــ k و ε *[50]*.

نموذج k-ε هو نموذج نصف تجريبي يعتمد على معادلات انتقال الطاقة الحركية المضطربة (k) ومعدل التبدد الطاقي (ε). تم اشتقاق النموذج k-ε على افتراض أن الجريان مضطرب بشكل كامل وأن تأثيرات اللزوجة الجزيئاتية مهملة، لذلك فإن هذا النموذج صالح فقط للجريانات المضطربة الصرفة. ولحالة الأقنية الهوائية المشابهة لحالتنا يتم اختيار نموذج الاضطراب k-ε *[40]*، وهذا ما سنعتمده.

2.2.4 برنامج *Fluent*

سنستخدم برنامج *Fluent* لإيجاد الحل التحليلي للنموذج الرياضي للقناة، وهو برنامج تجاري يقوم بحل المعادلات الحاكمة بالصيغة التكاملية لانحفاظ الكتلة وكمية الحركة وكميات سلمية أخرى، ويستخدم لهذا الأمر تقنية مبنية على حجم التحكم *Control-Volume* أو ما يسمى طريقة الحجوم المنتهية *Finite-Volume-Method* وتتألف هذه التقنية من الخطوات التالية *[50]* :

- تقسيم النطاق إلى حجوم تحكم باستخدام الشبك المولد في برامج أخرى مثل *Gambit*.
- مكاملة المعادلات الحاكمة على كل حجم من هذه الحجوم، لتكوين المعادلات الجبرية لمتغيرات الجريان (السرعة، الضغط، درجة الحرارة ...)
- تحويل المعادلات المجزأة لمعادلات خطية وحل نظام المعادلات الخطية الناتجة للحصول على قيم المتغيرات وحفظها كقيم مربوطة مع مراكز الحجوم.

يستخدم هذا البرنامج لحل مسائل الجريان ثنائية وثلاثية البعد ولحالة شبك ذي بنية أو عديمها، وهو مكتوب بلغة البرمجة المعروفة c (لغة الآلة) وهناك نوعان لمولد الحلول فيه :

- مولد الحلول المرتكز على الضغط *Pressure-Based Solver*
- مولد الحلول المرتكز على الكثافة *Density-Based Solver*

الأول يستخدم لحالة الجريان غير القابل للانضغاط والثاني لحال الجريان القابل للانضغاط. ولحالتنا هذه سنختار مولد الحلول الأول لأنه في مجال السرعات السائدة في القناة يمكن إهمال تأثير الانضغاطية على الجريان. كما سنختار مخططات تجزئة من المرتبة الأولى بالنسبة للزمن . بعد ذلك لابد من اختيار الشروط الحدية والتي تحدد متغيرات الجريان عند حدود النموذج الفيزيائي المدروس و التي تعد من المركبات المهمة في عملية النمذجة، وسنشرح تالياً مميزات الشروط الحدية التي اخترناها في عملية النمذجة:

1. شرط الجدار *Wall*: يستخدم هذا الشرط لربط مناطق السائل والجسم الصلب، والإعداد الإفتراضي الذي يترافق مع هذا النموذج هو شرط الإلتصاق والذي يطبق لحالة الجريانات الحقيقية ، بينما يتم حساب إجهادات القص تبعاً لنموذج الإضطراب المختار.
2. الشرط الحدي للمروحة الموضح في الفقرة التالية.

1.2.2.4 الشرط الحدي للمروحة

الطريقة التقليدية للنمدجة والمحاكاة تقضي بنمذجة ومحاكاة الجريان في قسم الاختبار فقط *[40]*، ويتم التعبير عن الجريان في بقية أجزاء القناة بشروط حدية عند مدخل ومخرج قسم الاختبار. وقد تبين أن هذه الطريقة غير مناسبة من أجل الأقنية المغلقة لعدم أخذ تأثير بقية عناصر الدارة *[40]*. للحصول على نتائج أكثر دقة تم استبدالها بنمذجة ومحاكاة الجريان في كامل القناة الهوائية وذلك ليتم الأخذ بالحسبان تأثير السمات الأساسية للجريان في كامل الدارة (مثلاً انفصام الجريان في أحد أجزاء الدارة) على النتائج التي نحصل عليها في قسم الاختبار، ويتم وفقاً لهذه الطريقة استبدال الشروط الحدية عند مدخل ومخرج قسم الاختبار بالشرط الحدي للمروحة *[40]*. وهنا يجب إعطاء انتباه خاص للأساس النظري والتنفيذ العملي لهذا النوع من الشروط الحدية في النموذج الحاسوبي. تم اختبار النموذج الرقمي لحالة قناة جولز فيرن ***Jules verne*** الموجودة في نانت – فرنسا عندما تكون القناة فارغة وفي حالة وجود نموذج في قسم الاختبار. وقد أظهرت النتائج أن هذه المنهجية الجديدة تؤمن الحصول على نتائج قريبة جداً من نتائج القياسات التجريبية المأخوذة من القناة بعد وضع نموذج وإجراء تجارب عليه في القناة وبنسبة خطأ لا يزيد عن *% 10 [40]*. وبذلك يمكن استخدام هذه المنهجية كطريقة لاختبار وتصميم الأقنية الهوائية أو لغرض التأكد من صحة القياسات.الشرط الحدي للمروحة يفهمه البرنامج على أنه بارامتر يمكن استخدامه لتحديد تأثير مروحة ذات مواصفات معروفة على حقل الجريان. هذا الشرط يمكننا من إدخال المنحني المميز للمروحة التي تم اختيارها والمعبر عن العلاقة بين تزايد الضغط والغزارة عبر المروحة، علماً أنه بهذه الطريقة لا يمكن إعطاء وصف دقيق لتفاصيل الجريان عبر ريش المروحة. وبدلاً عن ذلك يمكن حساب غزارة الجريان عبر المروحة. ولإعطاء الشرط الحدي للمروحة يجب تعريف قفزة ضغط ذات قيمة مساوية لقيمة فرق الضغط الذي تولده المروحة.

1.1.2.2.4 نمذجة ومحاكاة ارتفاع الضغط عبر المروحة

تمت نمذجة المروحة على أساس أنها تولد قفزة بالضغط Δp. قيمة Δp المتوجب اختيارها يجب أن تؤمن السرعة الأعظمية المطلوبة في قسم الاختبار البالغة $V_{max} = 60\ m/s$ ولتحديد قيمة Δp المطلوبة للنمذجة قمنا بإدخال عدة قيم مختلفة حتى توصلنا للقيمة $\Delta p = 1700\ Pa$ التي تحقق قيمة V_{max} المطلوبة في قسم الاختبار، كما هو موضح في الشكل *(10.4)* لنافذة برنامج الحاسوب.

2.1.2.2.4 مدخلات المروحة

تشمل مدخلات المروحة مايلي:

1. تعريف منطقة المروحة ***fan zone***:

يفترض أن مستوي المروحة يمثله قرص بسماكة لامتناهية الصغر وعلى أساس ذلك تتم نمذجة المروحة كخطوط بينية بين الخلايا وليس كخلايا كاملة. وعند تصدير الشبك إلى برنامج ***Fluent*** نقوم بتغيير تعريف المروحة من ***interior zone*** إلى ***fan zone*** عن طريق نافذة الشروط الحدية:

Define ⟶ Boundary Conditions...

وبعد ذلك يمكننا فتح نافذة المروحة وتحديد قفزة الضغط.

2. تعريف قفزة الضغط عبر المروحة:

يمكن تعريف قفزة الضغط كتابع للسرعة، أو تابع معرف من قبل المستخدم، أو يمكن تعريفه كقيمة ثابتة. وقد قمنا بتعريفه كقيمة ثابتة لحالة تشغيل محددة وذلك كما يلي:

1. نقوم بتفعيل الخيار *Profile Specification* من الخيار *Pressure-Jump*.
2. نختار *constant* ثابت من القائمة المنسدلة *Pressure Jump Profile* وندخل قيمة ΔP في حقل *Pressure Jump Profile*.
3. يسبق ذلك مجموعة من الخطوات العملية للبدء بالحل وهي:

- استيراد ملف الشبك الذي نفذ ببرنامج *Gambit 2.3* .
- اختيار مولد الحل *Solver*: تم اختيار مولد الحل ثنائي البعد مع صيغة مطلقة للسرعة و تجزئة من المرتبة الثانية للسرعة . أما نموذج الإضطراب فقد تم اختيار النموذج k-ε .
- نوع الجريان : مستقر
- اختيار المواد : و قد تم اختيار الهواء كسائل تشغيل عند كثافة *1.225 kg/m3*
- الشروط الحدية: الجدران وريش التوجيه والمناخل وخلايا عش النحل فقد اختير شرط الجدار *Wall Condition*.
- شروط البدء : تم اختيار بدء الحل من كل النطاقات.
- البواقي : تم اختيار حد بقيمة *0.00001* للبواقي .
- عدد مرات التتابع التقريبي للحل : *Iteration=3000* مع العلم أنه عادة تم الحصول على قيمة البواقي عند حوالي *2750* مرة تكرار الشكل *(11.4)*.

بعد ذلك تبدأ إجراءات الحل الذي استغرق *12* ساعة باستخدام حاسوب (ذو معالج *i7* وذواكر *6 GB*).

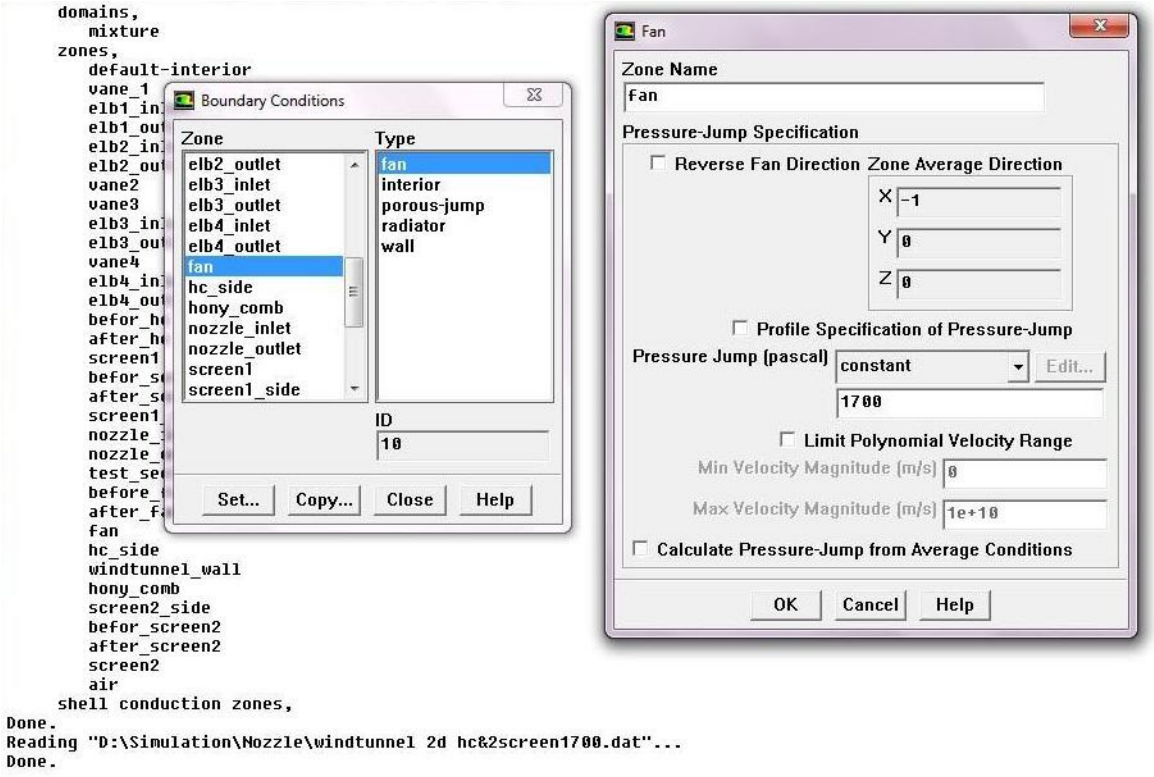
3.4 نتائج النمذجة والمحاكاة

القيم التي حسبناها ومثلناها بمساعدة برنامج *Fluent* شملت توزع السرعة وصورة خطوط التيار في جميع مكونات القناة، وذلك من أجل التأكد من وجود أو عدم وجود مناطق انفصام للجريان والتأكد من جودة الجريان. كما تم حساب وتحديد توزع معامل الاضطراب في قسم الاختبار. كما تمت نمذجة ومحاكاة ثلاثة تصاميم للنفاثة.

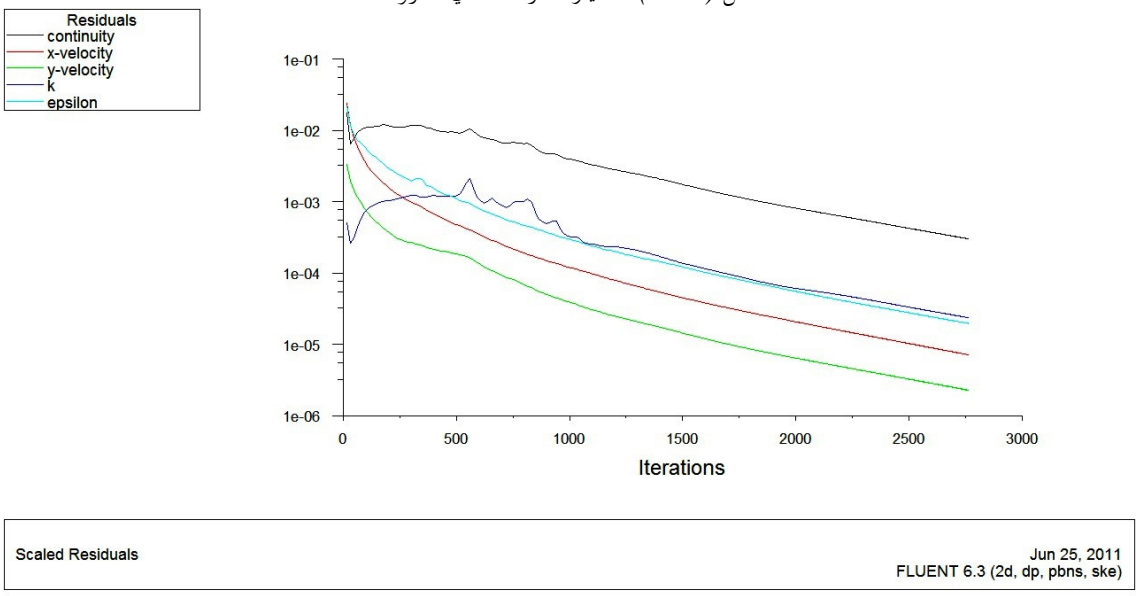
1.3.4 قسم الاختبار *(1)*

الشكل *(12.4)* يوضح توزع السرعة داخل قسم الاختبار على طول *1100 mm* منه ويستنتج منه أن الجريان داخل قسم الاختبار هو جريان منتظم ولا وجود لأي انفصام للطبقة الحدية. الجريان في منطقة اللون الأصفر يمثل الجريان في الطبقة الحدية بالقرب من الجدران. والشكل *(13.4)* يظهر خطوط التيار داخل قسم الاختبار وكما نلاحظ فإن خطوط التيار متوازية ومنتظمة ولا يوجد منطقة تتباعد فيها خطوط التيار كثيراً عن بعضها وهذا يؤكد حصولنا على جريان انسحابي منتظم داخل قسم الاختبار وعدم وجود انفصام للطبقة الحدية. كما يوضح الشكل *(14.4)* بروفيل توزع السرعة على

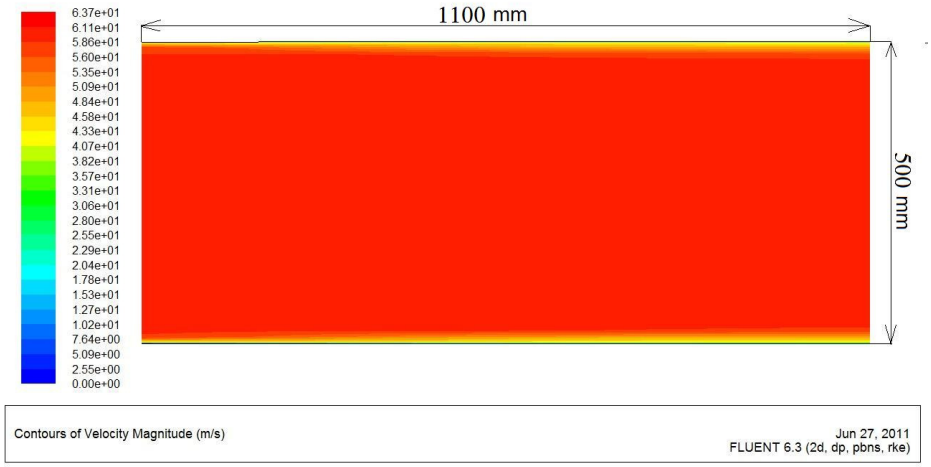
مقطع عرضي لقسم الاختبار ويظهر من الشكل أن سرعة الجريان عند الجدار معدومة وهو ما يوافق شرط الالتصاق وتزداد كلما ابتعدنا عن الجدار حتى تصل للسرعة العظمى المطلوبة والتي قيمتها $60\ m\backslash s$، السبب في اختلاف شكل بروفيل السرعة عن الشكل المعروف والذي تزيد السرعة فيه بشكل تدريجي أكبر من الشكل *(14.4)* هو أن نتائج المحاكاة لا تطابق تماماً النتائج التجريبية، خاصة لأننا اعتمدنا نظاماً ثنائي البعد *2D* للنمذجة والمحاكاة لعدم توفر الاستطاعة الحاسوبية لنظام ثلاثي البعد *3D*.



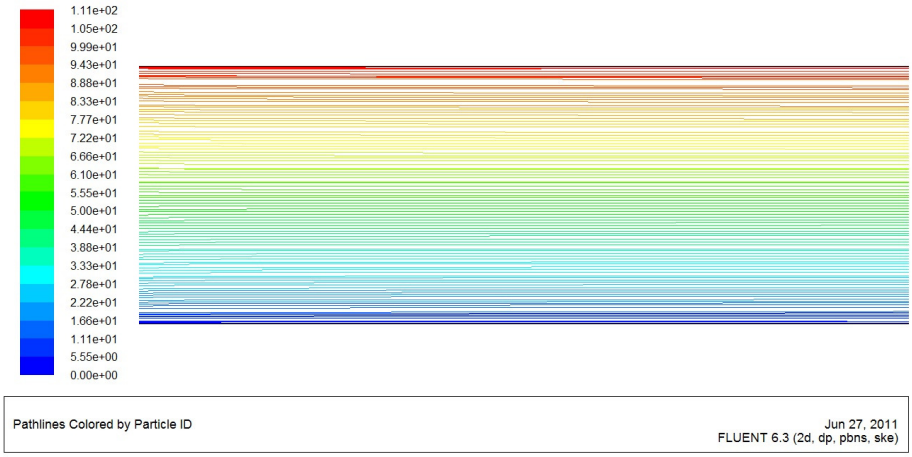
الشكل *(10.4)*: اختيار الشرط الحدي للمروحة.



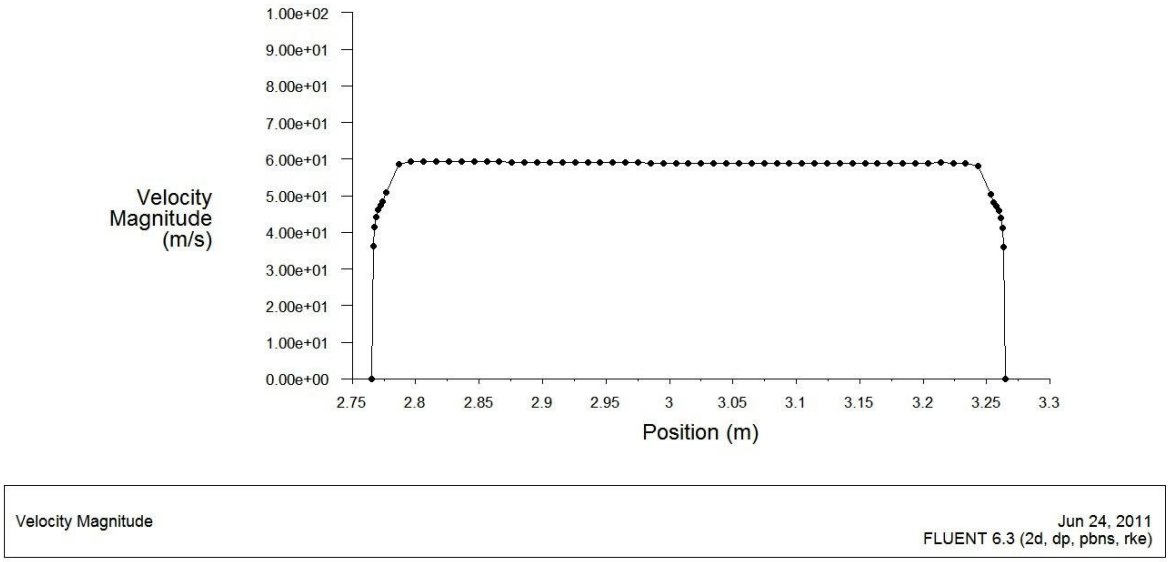
الشكل *(11.4)* : قيمة البواقي أثناء الحل.



الشكل *(12.4)*: توزع السرعة في قسم الاختبار



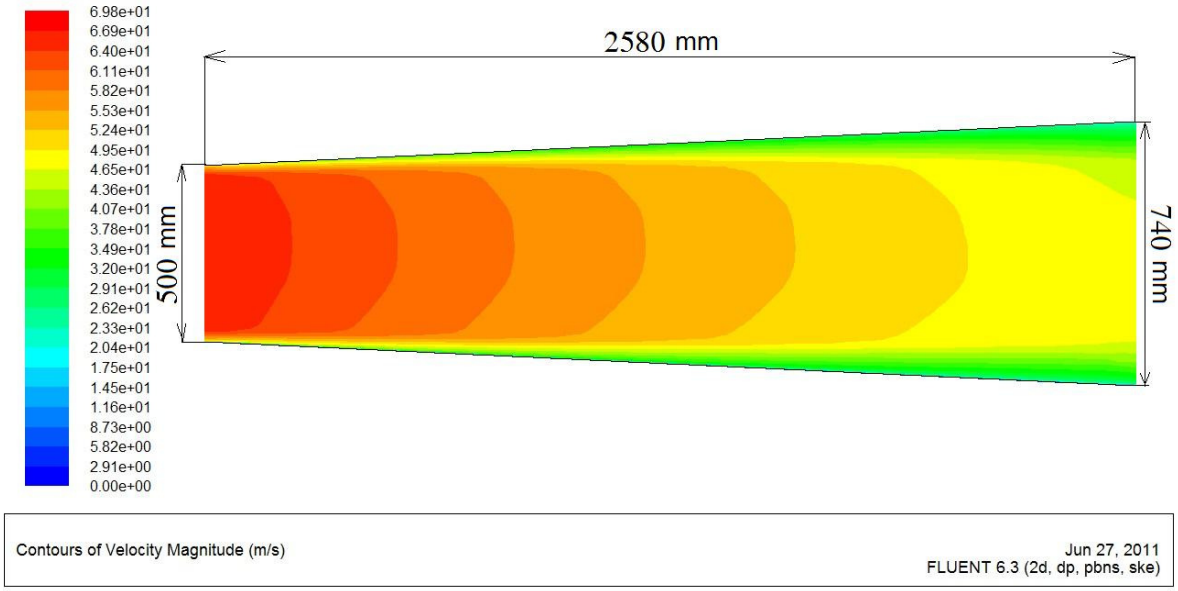
الشكل *(13.4)* : صورة خطوط التيار في قسم الاختبار .



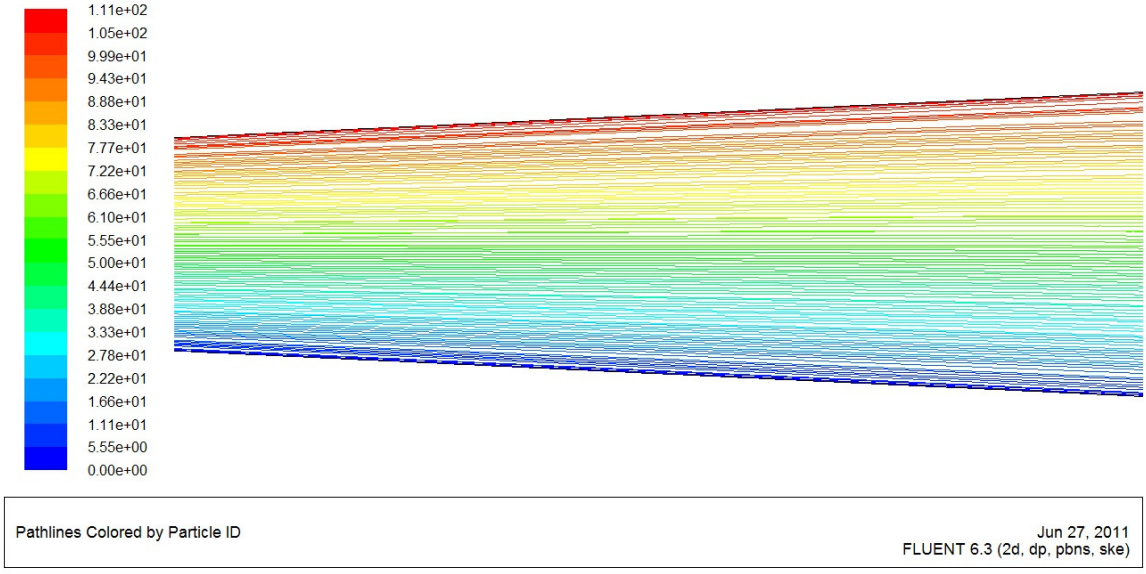
الشكل *(14.4)* :بروفيل توزع السرعة على مقطع عرضي لقسم الاختبار.

2.3.4 الناشرات *(2)*

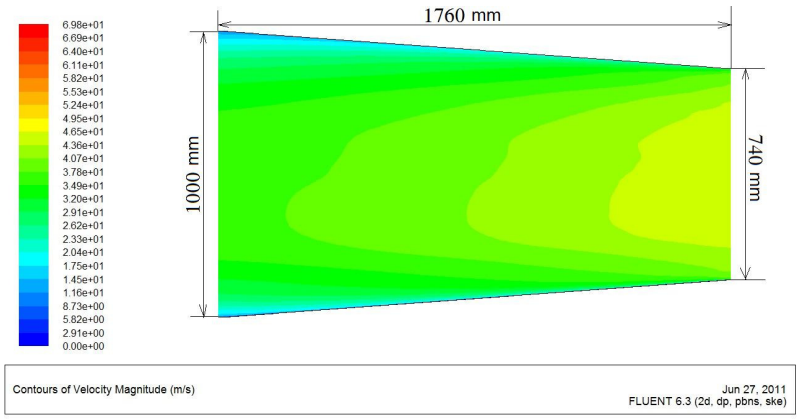
تبين الأشكال *(16.4)*، *(17.4)*، *(18.4)*، *(19.4)*توزع السرعة وخطوط التيار في الناشرتين الأولى *(2.1)* والثانية *(2.2)* وكما هو واضح من الأشكال فإن الجريان داخل الناشرات هو جريان منتظم ولا وجود لأي مناطق انفصام، كما يظهر من الشكلين *(16.4)* و*(18.4)* دور الناشرة في تخفيض سرعة الجريان بشكل تدريجي من المدخل وحتى المخرج مما يؤدي إلى تحويل القدرة الحركية للجريان إلى قدرة ضغط.



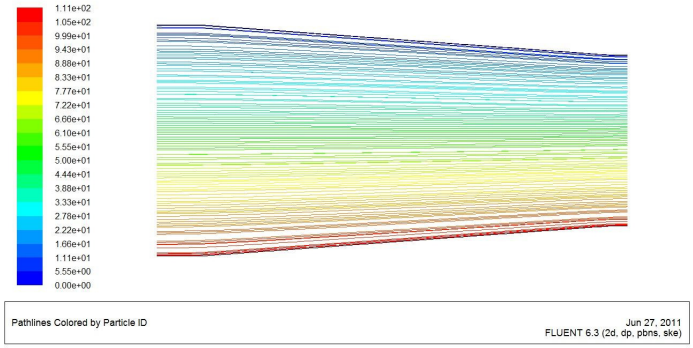
الشكل *(16.4)* : توزع السرعة في مقاطع مختلفة من الناشرة الأولى *(2.1)*.



الشكل *(17.4)*: صورة خطوط التيار في الناشرة الأولى *(2.1)*.



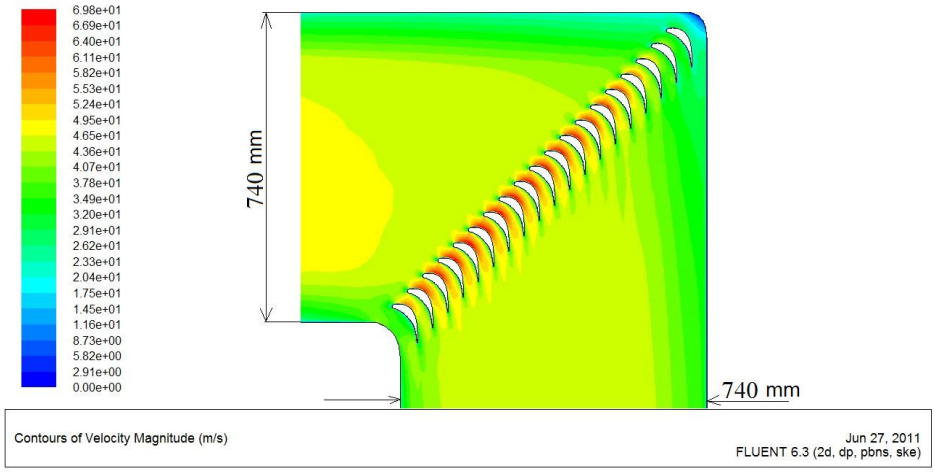
الشكل *(18.4)* : توزع السرعة في مقاطع مختلفة من الناشرة الثانية *(2.2)*.



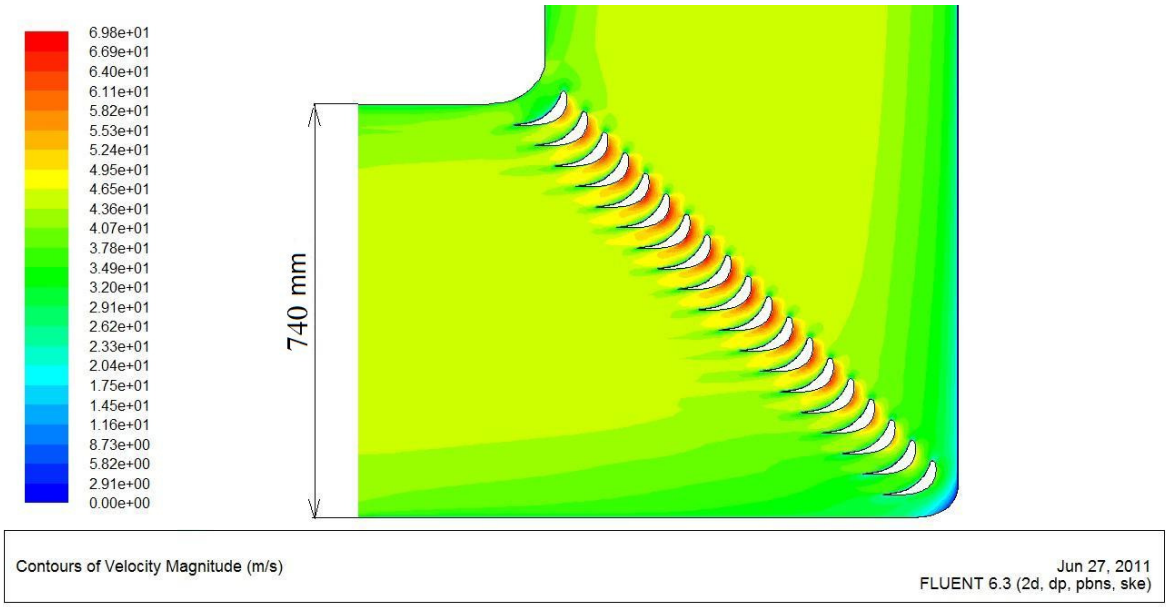
الشكل (19.4): صورة خطوط التيار في الناشرة الثانية *(2.2)*.

3.3.4 الأكواع *(3)*

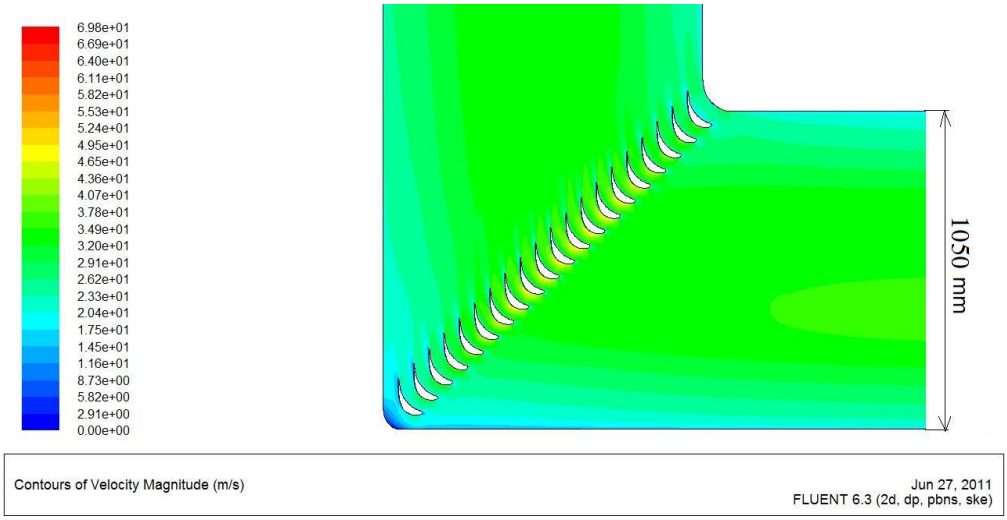
تبين الأشكال *(20.4)*، *(21.4)*، *(22.4)*، *(24.4)* توزع السرعة في الأكواع الأربعة للقناة وحول ريش التوجيه داخل الأكواع، ويظهر جلياً من هذه الأشكال أن الجريان داخل الأكواع منتظم ولا وجود لأي انفصام ناشئ عن ريش التوجيه في الأكواع مما يؤكد التصميم الجيد لريش التوجيه. الشكل *(23.4)* يوضح صورة خطوط التيار في الكوع الثالث وهي خطوط متوازية فيما بينها وهذا يدل على انتظام الجريان. الشكل *(25.4)* يوضح انتظام أشعة السرعة حول أحد ريش التوجيه وهذا يؤكد على جودة التصميم الانسيابي لريش التوجيه.



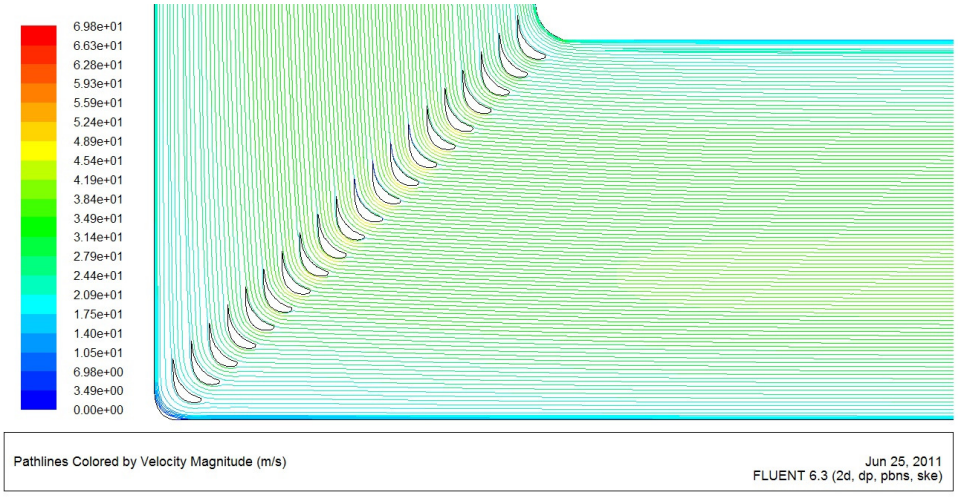
الشكل *(20.4)* : توزع السرعة في الكوع الأول *(3.1)*.



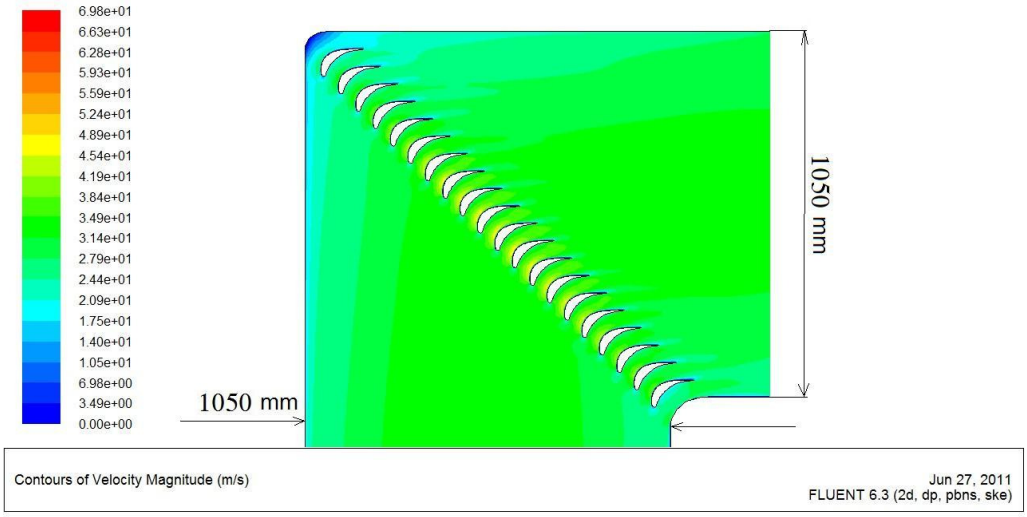
الشكل *(21.4)*: توزع السرعة في الكوع الثاني *(3.2)*.



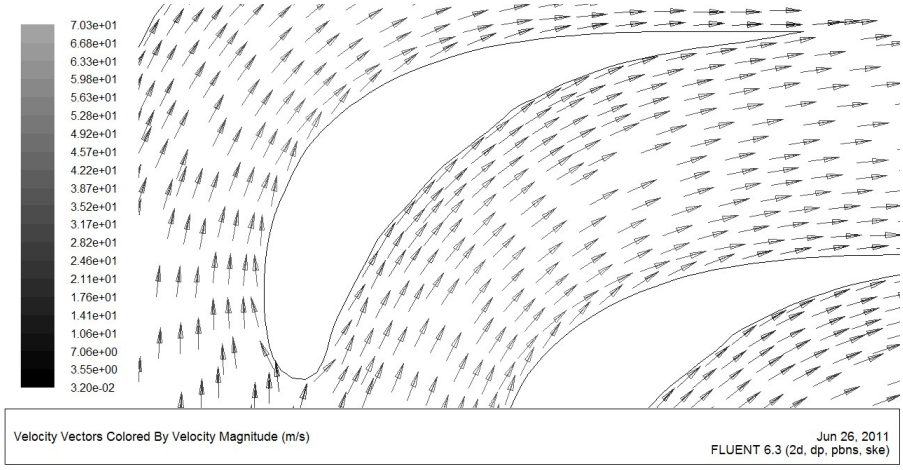
الشكل *(22.4)* : توزع السرعة في الكوع الثالث *(3.3)*.



الشكل *(23.4)* : صورة خطوط التيار في الكوع الثالث *(3.3)*.



الشكل *(24.4)* : توزع السرعة في الكوع الرابع *(3.4)*.



الشكل *(25.4)*: أشعة السرعة حول أحد ريش التوجيه طول وتر الريشة *136 mm* سماكتها *26.6 mm*.

4.3.4 النفاثة *(9)*

في البداية تم تصدير تصميم النفاثات الثلاثة المصممة وفق مراجع مختلفة (انظر الفقرة *7.3* ص *55*) من برنامج *AutoCAD* إلى برنامج *Gambit 2.3* عبر اللاحقة *ACIS*. و قبل البدء بعملية التجزئة وتوليد الشبك يجب علينا تحديد نطاقات الحساب. وقد تم توليد الشبك السطحي باستخدام خاصية الطبقة الحدية المشروحة في الفقرة *2.1.4* ص *67* كما في الشكل *(26.4)* الذي يظهر مقطعاً طولياً بنظام *2D* في شبك النفاثة المصممة بحسب بورجر، والشكل *(27.4)* الذي يظهر شبكاً ثلاثي البعد لنفس النفاثة. وقد تمت معالجة التصميمين الآخرين بنفس الطريقة.

وبعدها تم حفظ الشبك الكلي الناتج باللاحقة *msh*. وتصديرها إلى برنامج *Fluent 6.3*، علماً أن المحاكاة تمت بنظام *3D*.

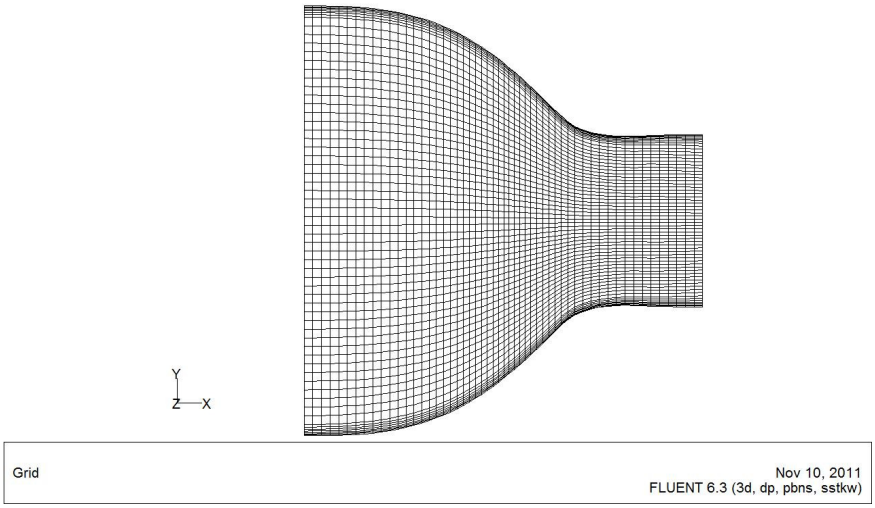
بعد ذلك لابد من اختيار الشروط الحدية، التي تحدد متغيرات الجريان عند حدود النموذج الفيزيائي المدروس، والتي تعد من المركبات المهمة في عملية المحاكاة. وهنا يجب أن نميز حالتين: الأولى حالة قسم اختبار مغلق، والثانية قسم اختبار مفتوح.

1.4.3.4 حالة قسم اختبار مغلق

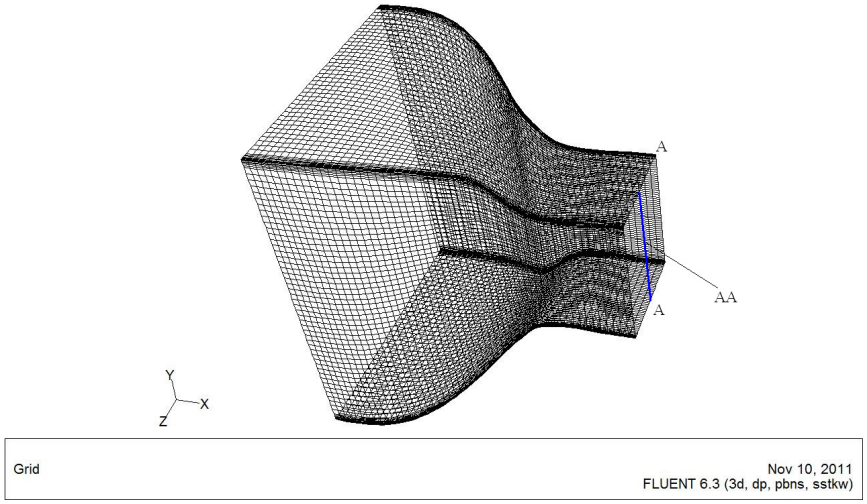
مميزات الشروط الحدية التي اخترناها في عملية المحاكاة في حالة قسم اختبار مغلق:

1. شرط الجدار *Wall*.
2. الشرط الحدي عند المدخل هو ضغط المدخل *pressure inlet*: الذي تم اعتماده من عملية المحاكاة السابقة للقناة بنظام *2D*.
3. الشرط الحدي عند المخرج هو شرط التدفق الكتلي الثابت *mass flow inlet* المحسوب بالسرعة الأعظمية في قسم الاختبار: $\dot{m} = \rho \cdot V_{\max} \cdot A_{TS} = 22.5\,kg/s$

وقد اخترنا نموذج الاضطراب المعروف باسم $k-\omega$ *SST Shear Stress Transportation* انتقال إجهادات القص وذلك لأنه أفضل من النماذج الأخرى في الحالات التي من المتوقع فيها حدوث انفصام، حيث أنه يزيد دقة الحساب في الطبقة الحدية *[70]*.



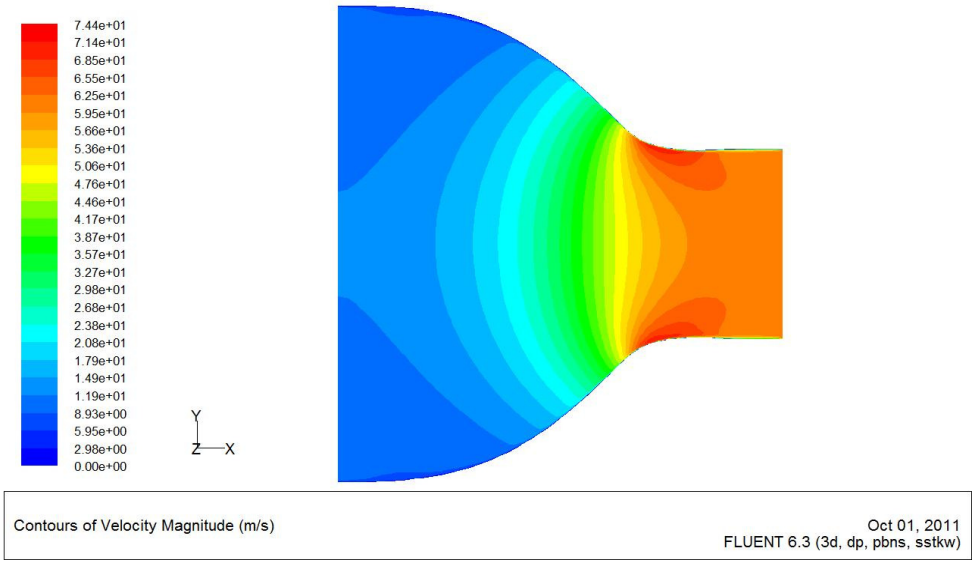
الشكل *(26.4)*: مقطع طولي في شبك النفاثة المصممة حسب بورجر.



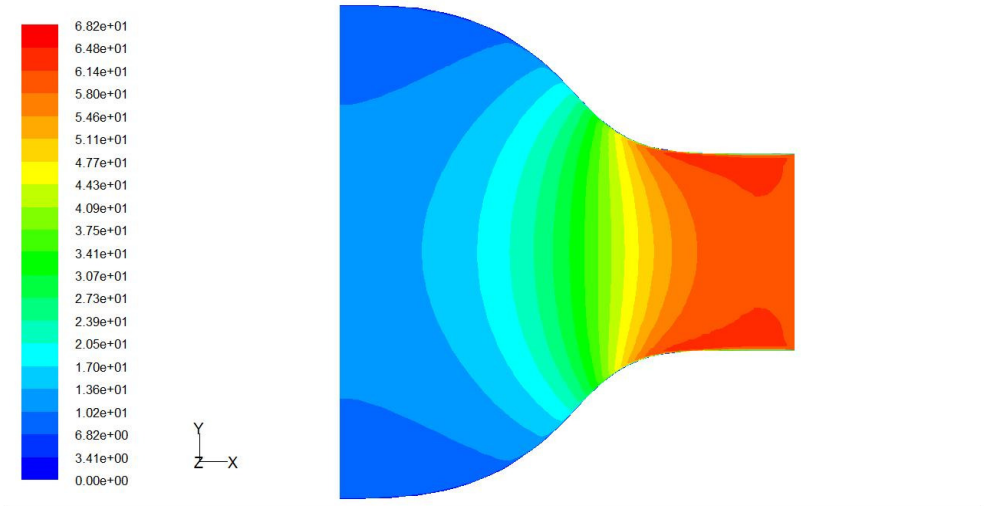
الشكل *(27.4)*: شبك ثلاثي البعد للنفاثة المصممة حسب بورجر.

1.1.4.3.4 مقارنة توزع السرعة في النفاثات الثلاثة

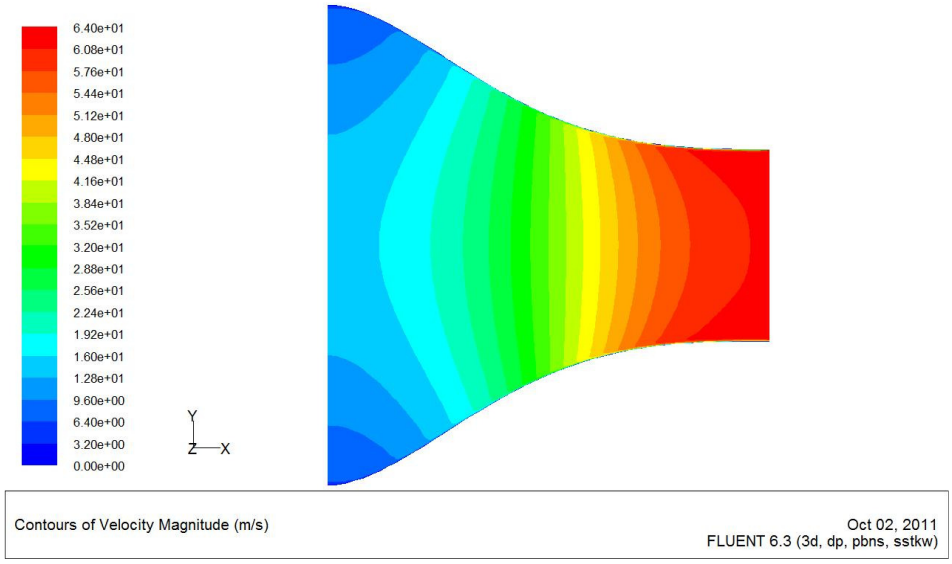
الأشكال *(28.4)*، *(29.4)*، *(30.4)* توضح توزع السرعة في النفاثات الثلاث، حيث نلاحظ أننا حصلنا على توزع سرعة وجريان منتظم في النفاثات الثلاثة.



الشكل *(28.4)*: توزع السرعة في النفاثة المصممة حسب بورجر.



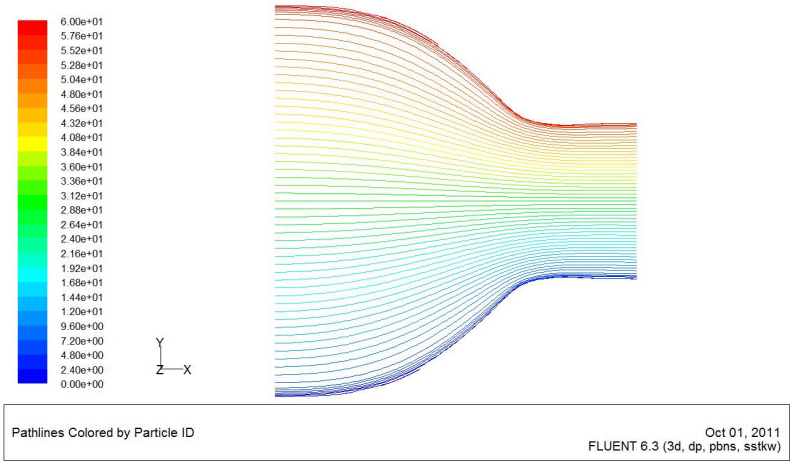
الشكل *(29.4)*: توزع السرعة في النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين.



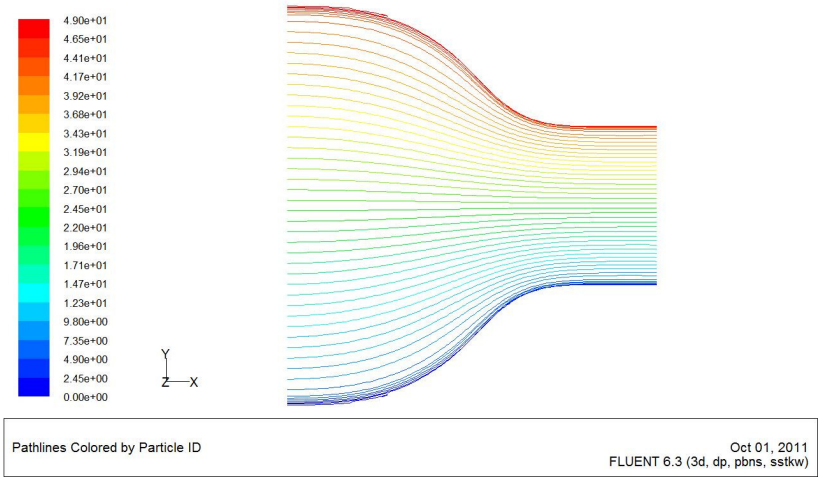
الشكل *(30.4)*: توزع السرعة في النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك.

2.1.4.3.4 مقارنة خطوط التيار في النفاثات الثلاثة

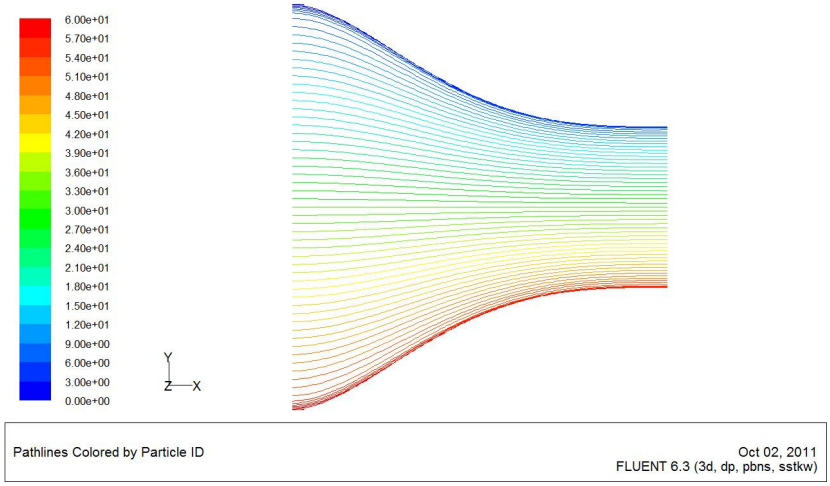
الأشكال *(31.4)*، *(32.4)*، *(33.4)* توضح صور خطوط التيار في النفاثات الثلاثة وكما هو واضح من الأشكال الثلاثة فإن خطوط التيار متوازية مع بعضها في النفاثات الثلاثة ولا وجود لأية مناطق انفصام للجريان لعدم وجود مناطق تتباعد فيها خطوط التيار عن بعضها البعض.



الشكل *(31.4)*: صورة خطوط التيار في النفاثة المصممة حسب بورجر.



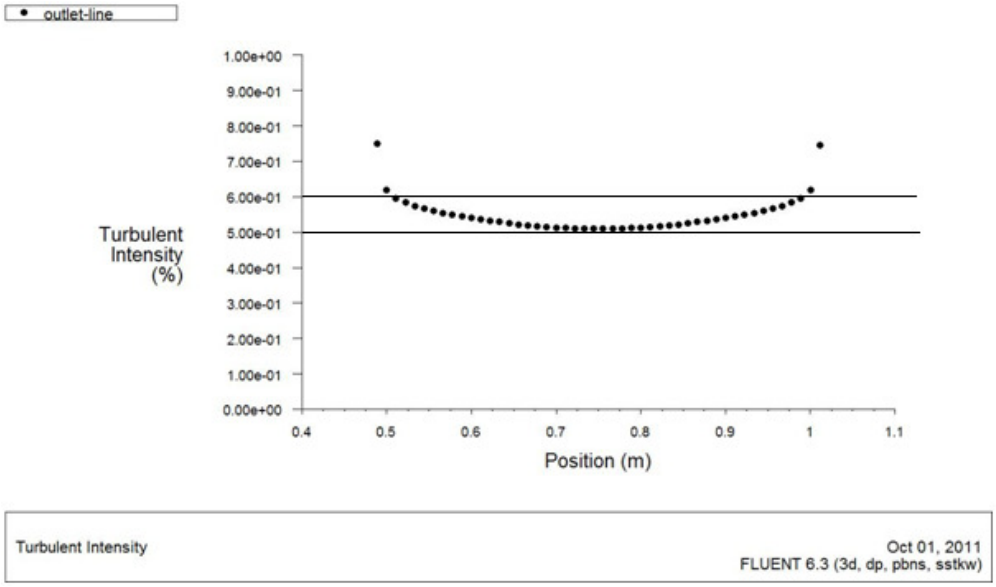
الشكل *(32.4)*: صورة خطوط التيار في النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين.



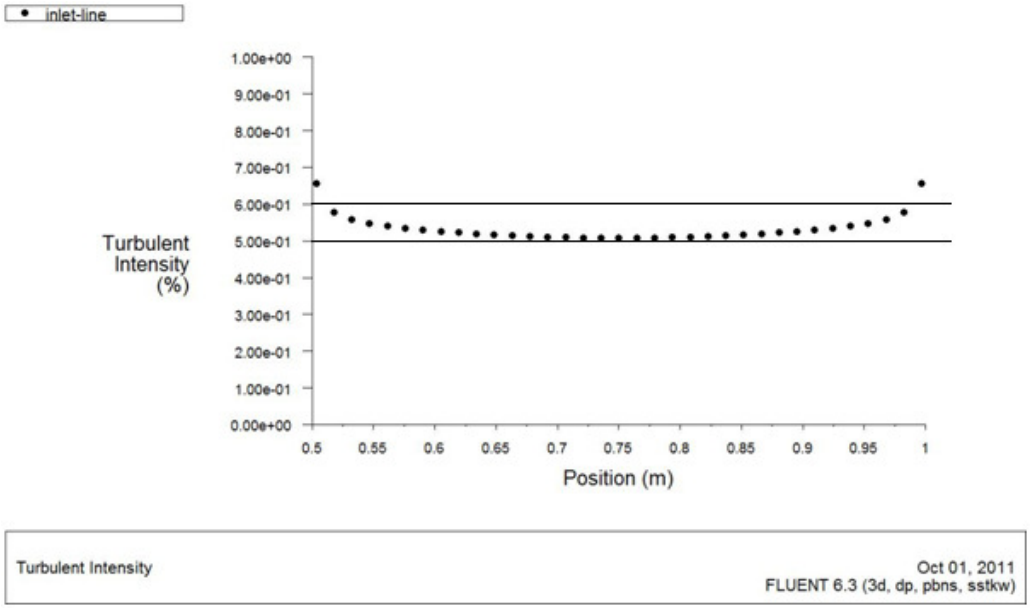
الشكل *(33.4)*: صورة خطوط التيار في النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك.

3.1.4.3.4 مقارنة معامل درجة الاضطراب في النفاثات الثلاثة

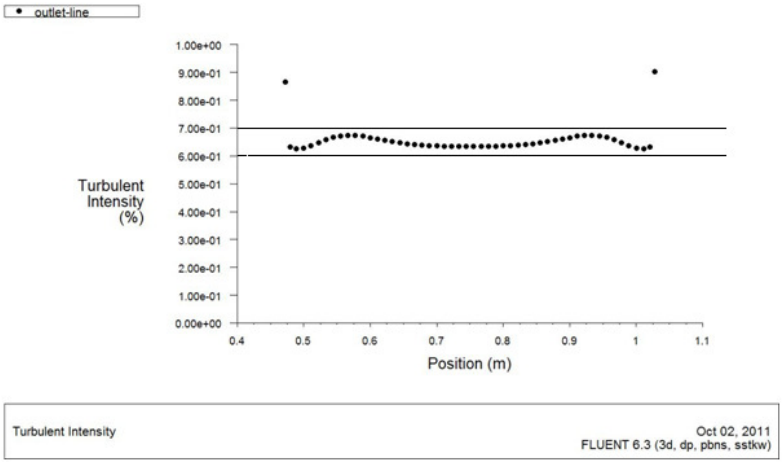
الأشكال *(34.4)*، *(35.4)*، *(36.4)* توضح توزع معامل درجة الاضطراب على طول المستقيم *AA* الشكل *(27.4)* عند مخرج النفاثات الثلاثة، حيث يمثل المحور الأفقي إحداثيات المستقيم *AA* الممثل لارتفاع مخرج النفاثة، حسب برنامج *Fluent*. وكما هو واضح في الشكلين *(34.4)* و *(35.4)* فإن قيمة معامل درجة الاضطراب في النفاثتين المصممتين حسب بورجر وحسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين تساوي *0.5 %* في نواة الجريان وهذا يمنح هذين التصميمين أفضلية عن النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك والذي نلاحظ في الشكل *(36.4)* أن قيمة معامل درجة الاضطراب عند مخرجها محصورة بين *0.6 – 0.7 %*.



الشكل *(34.4)*: معامل درجة الاضطراب عند مخرج النفاثة المصممة حسب بورجر.



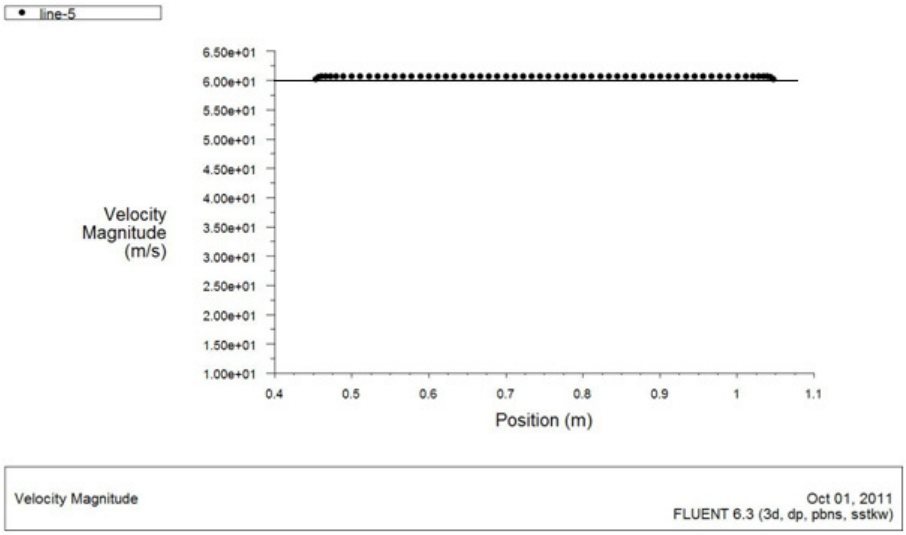
الشكل *(35.4)*: معامل درجة الاضطراب عند مخرج النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين.



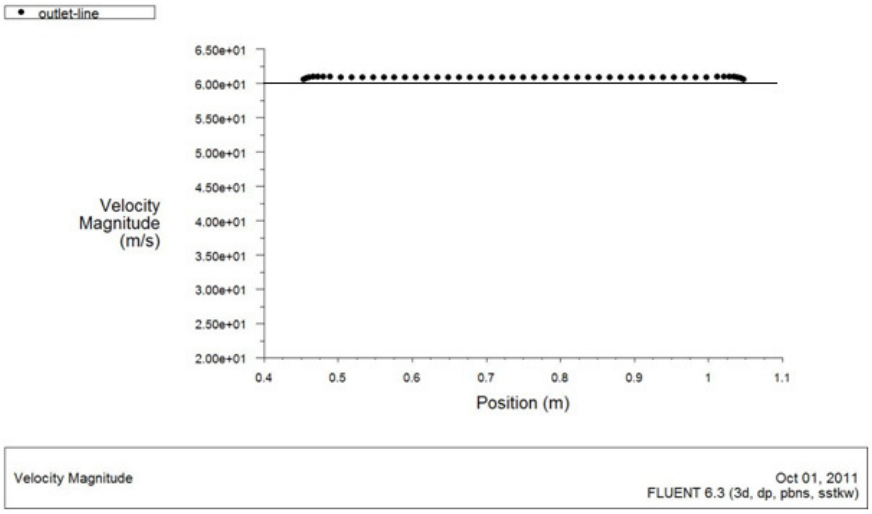
الشكل *(36.4)*: معامل درجة الاضطراب عند مخرج النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك.

4.1.4.3.4 مقارنة بروفيل توزع السرعة عند المخرج في النفاثات الثلاثة

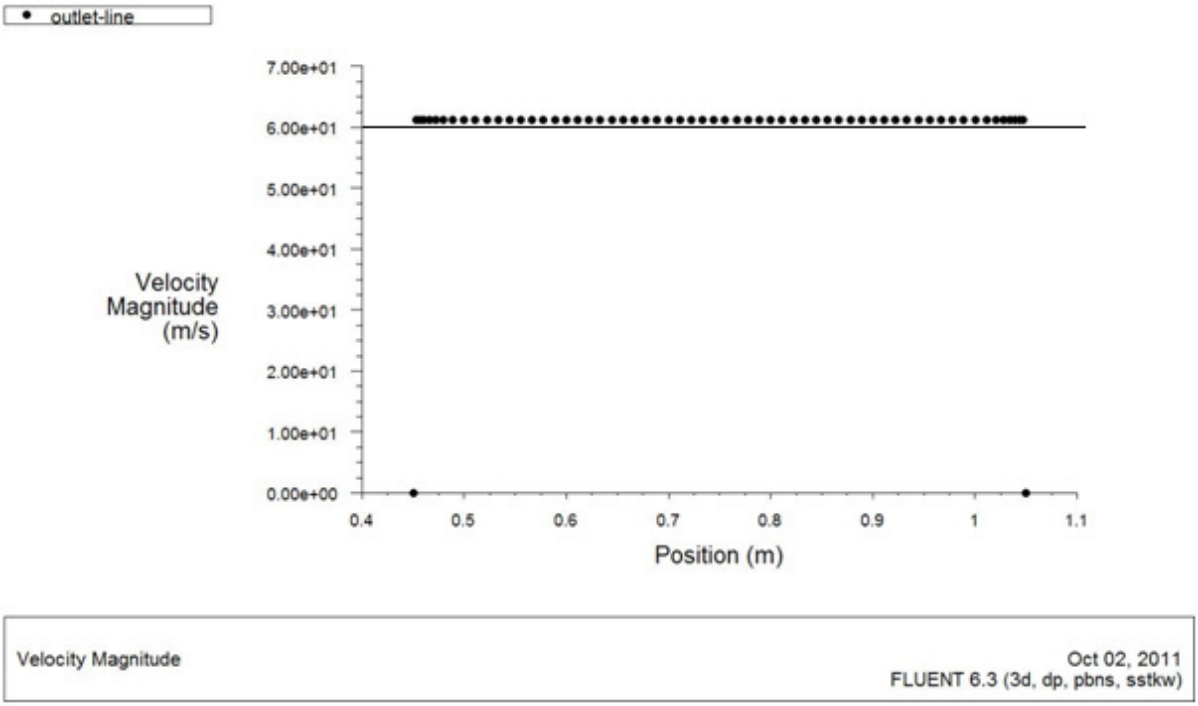
الأشكال *(37.4)*، *(38.4)*، *(39.4)* توضح بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثات الثلاثة، وكما هو واضح من الأشكال فإن السرعة عند المخرج في التصاميم الثلاثة مساوية تقريباً للسرعة المطلوبة وهي *60 m/s*.



الشكل *(37.4)*: بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثة المصممة حسب بورجر.



الشكل *(38.4)*: بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين.



الشكل *(39.4)*: بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك.

5.1.4.3.4 مقارنة فرق الضغط خلال النفاثات الثلاثة

وجدنا من نتائج المحاكاة بأن قيمة فرق الضغط الكلي بين مدخل ومخرج نفاثة بورجر هي *191.32 Pa* وللنفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقية *167.68 Pa* وللنفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك *87.565 Pa* وهذا يؤشر إلى أن الفواقد في النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك أصغر من الفواقد في النفاثتين الأخريين.

2.4.3.4 حالة قسم اختبار مفتوح

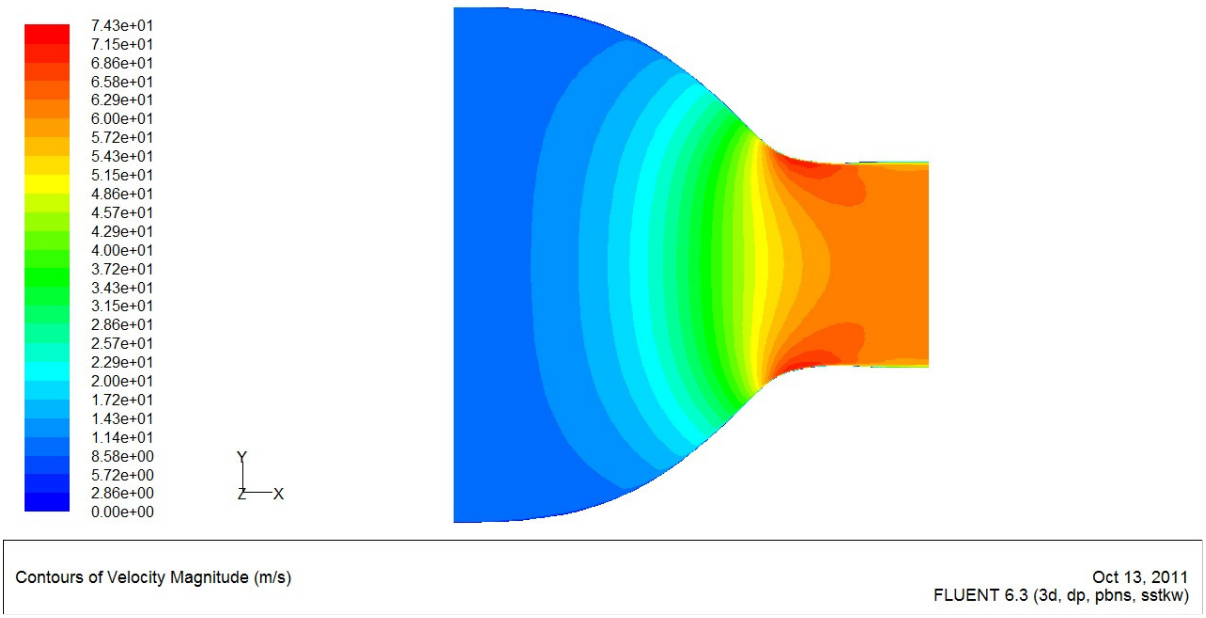
مميزات الشروط الحدية التي اخترناها في عملية المحاكاة في حالة قسم اختبار مفتوح:

1. شرط الجدار *Wall*.
2. الشرط الحدي عند المدخل هو شرط السرعة velocity inlet.
3. الشرط الحدي عند المخرج هو مخرج ضغط pressure outlet والذي هو الضغط الجوي.

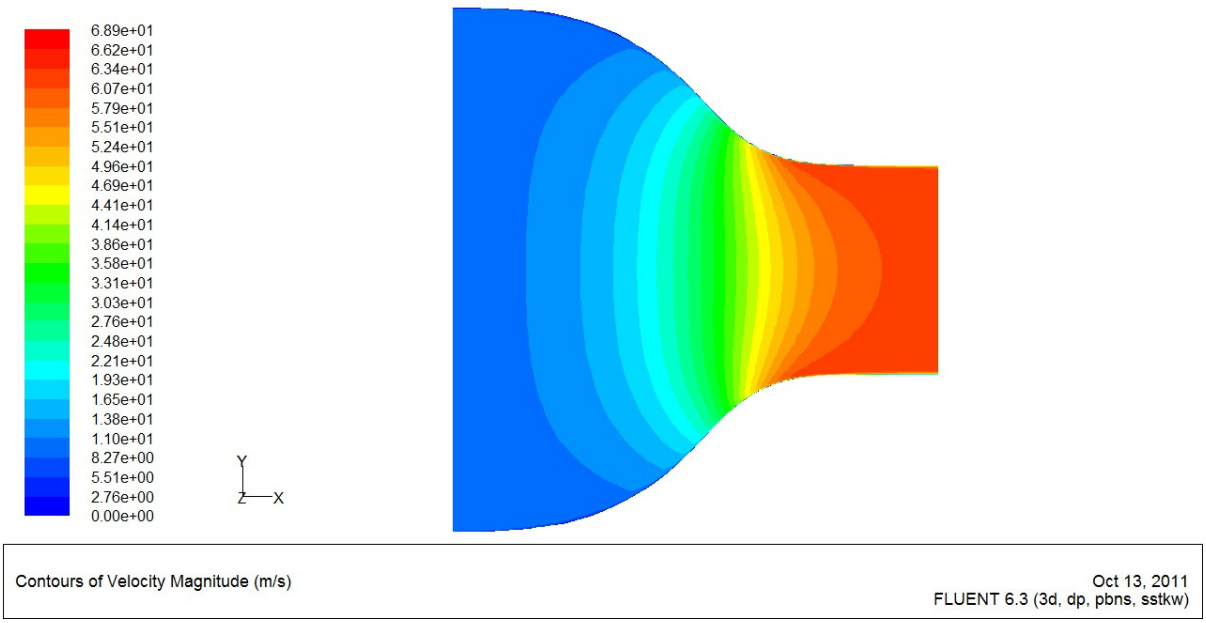
علماً أن نموذج الاضطراب الذي اخترناه هو $k-\omega\ SST$ أيضاً.

1.2.4.3.4 مقارنة توزع السرعة في النفاثات الثلاثة

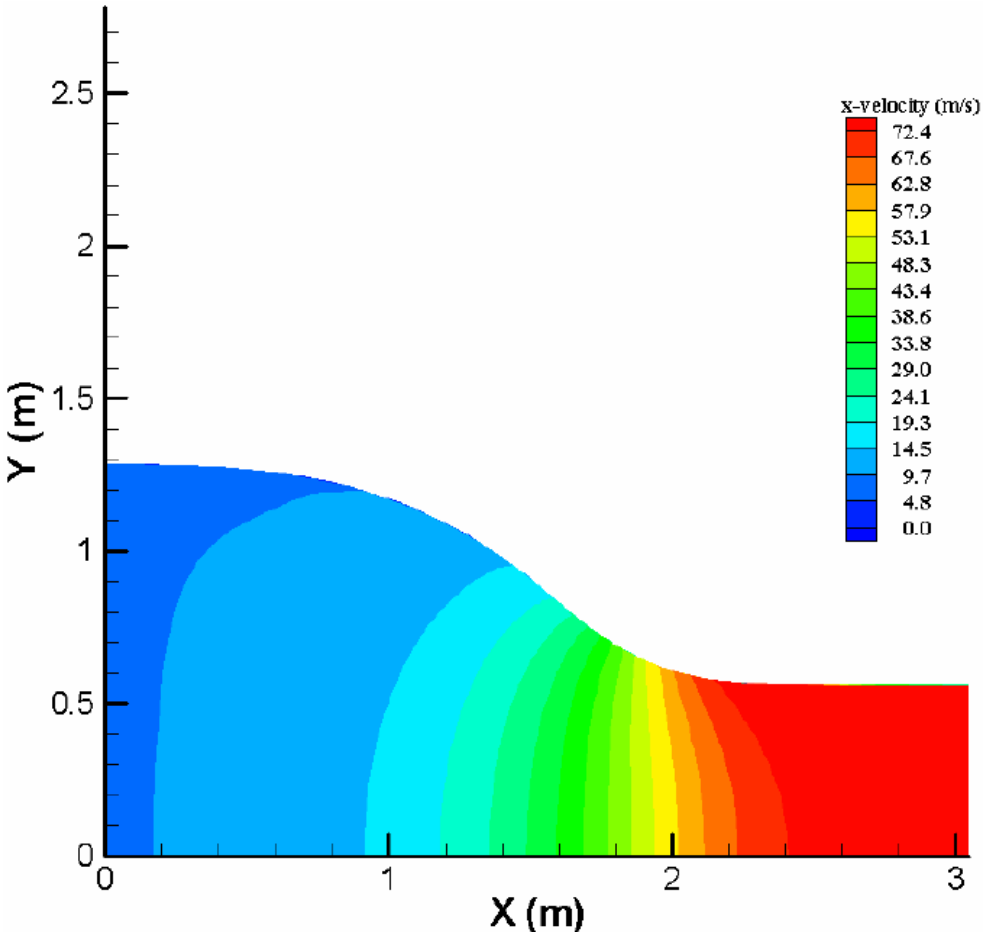
الأشكال *(40.4)*، *(41.4)*، *(43.4)* توضح توزع السرعة في النفاثات الثلاث في حالة قسم اختبار مفتوح، حيث نلاحظ أننا حصلنا على توزع سرعة وجريان منتظم في النفاثات الثلاثة، بالإضافة لذلك قمنا بمقارنة نتائج المحاكاة للتصاميم الثلاثة مع نتائج المحاكاة للنفاثة المصممة في جامعة فلوريدا الشكل *(42.4)* والمصممة بطريقة كثيري الحدود المتلاقية *[30]*. وهنا نلاحظ التشابه الكبير من حيث الجوهر بين نتائجنا والنتائج التي حصلوا عليها حيث تمت المحاكاة بنفس البرنامج المستخدم من قبلنا.



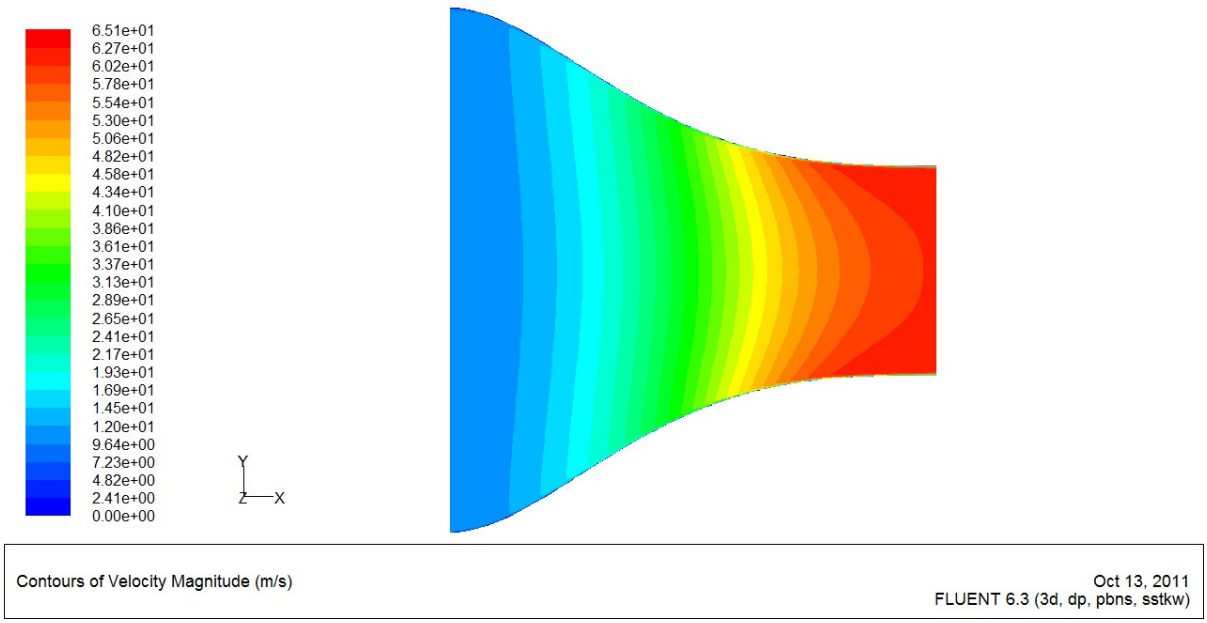
الشكل *(40.4)*: توزع السرعة في النفاثة المصممة حسب بورجر في حالة قسم اختبار مفتوح.



الشكل *(41.4)*: توزع السرعة في النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين في حالة قسم اختبار مفتوح.



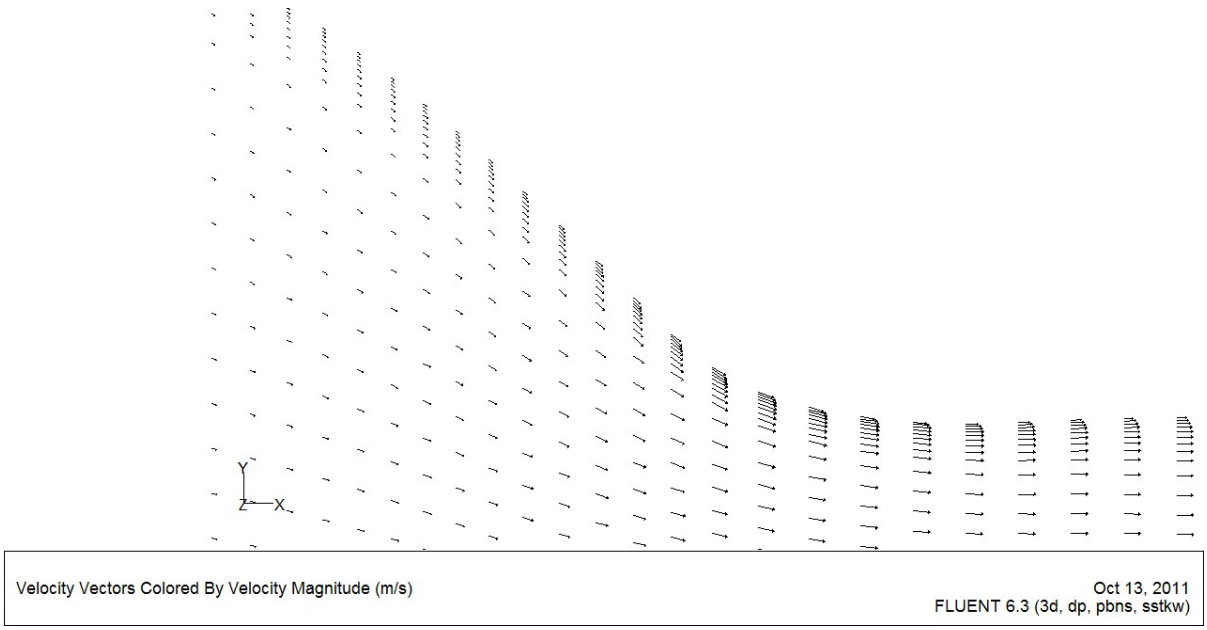
الشكل *(42.4)*: توزع السرعة في النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين في حالة قسم اختبار مفتوح في جامعة فلوريدا *[30]*.



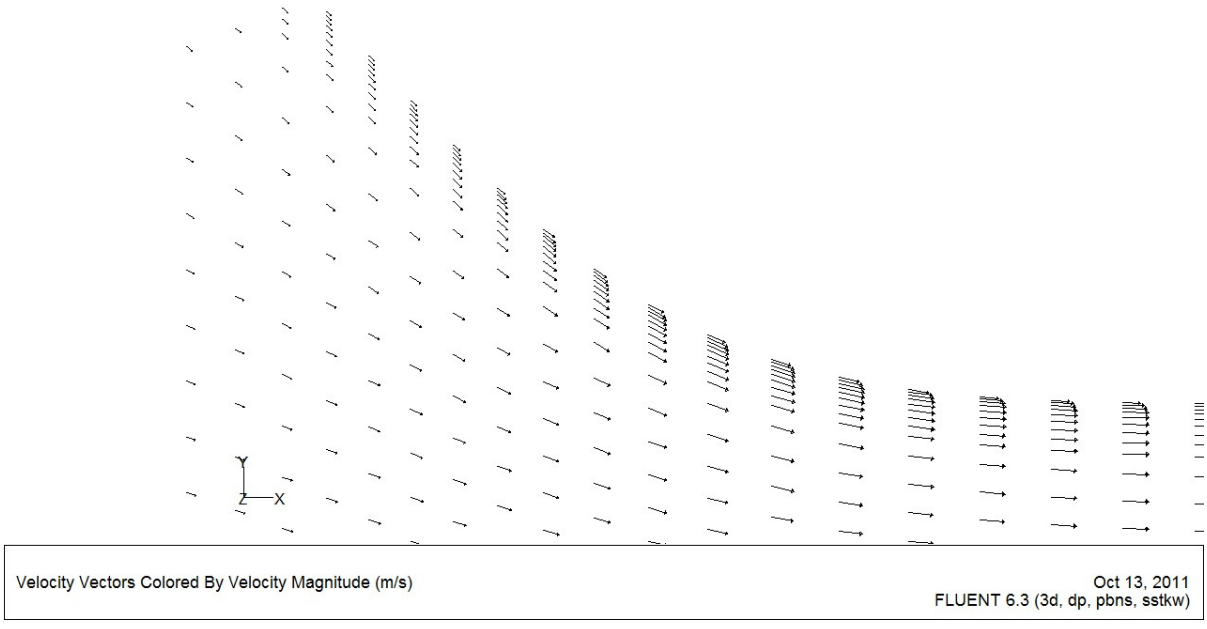
الشكل *(43.4)*: توزع السرعة في النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك في حالة قسم اختبار مفتوح.

2.2.4.3.4 مقارنة أشعة السرعة في النفاثات الثلاثة

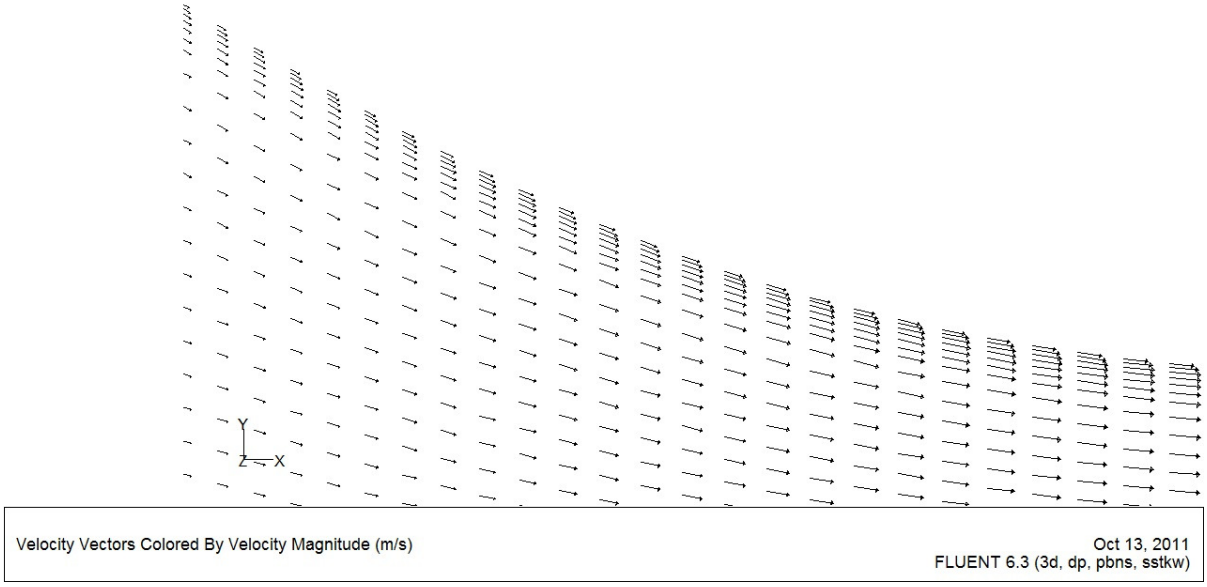
الأشكال *(44.4)*، *(45.4)*، *(46.4)* توضح أشعة السرعة في النفاثات الثلاثة وكما هو واضح من الأشكال الثلاثة لا وجود لأية مناطق انفصام للجريان لعدم وجود مناطق تنعكس فيها اتجاهات أشعة السرعة.



الشكل *(44.4)*: أشعة السرعة في النفاثة المصممة حسب بورجر في حالة قسم اختبار مفتوح.



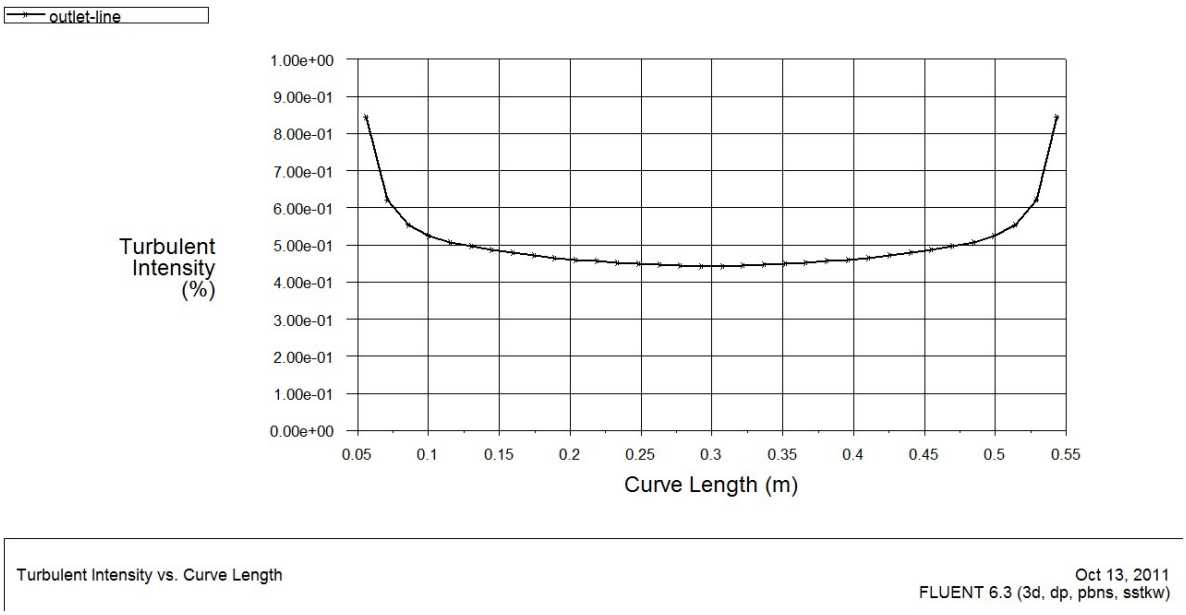
الشكل *(45.4)*: أشعة السرعة في النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين في حالة قسم اختبار مفتوح.



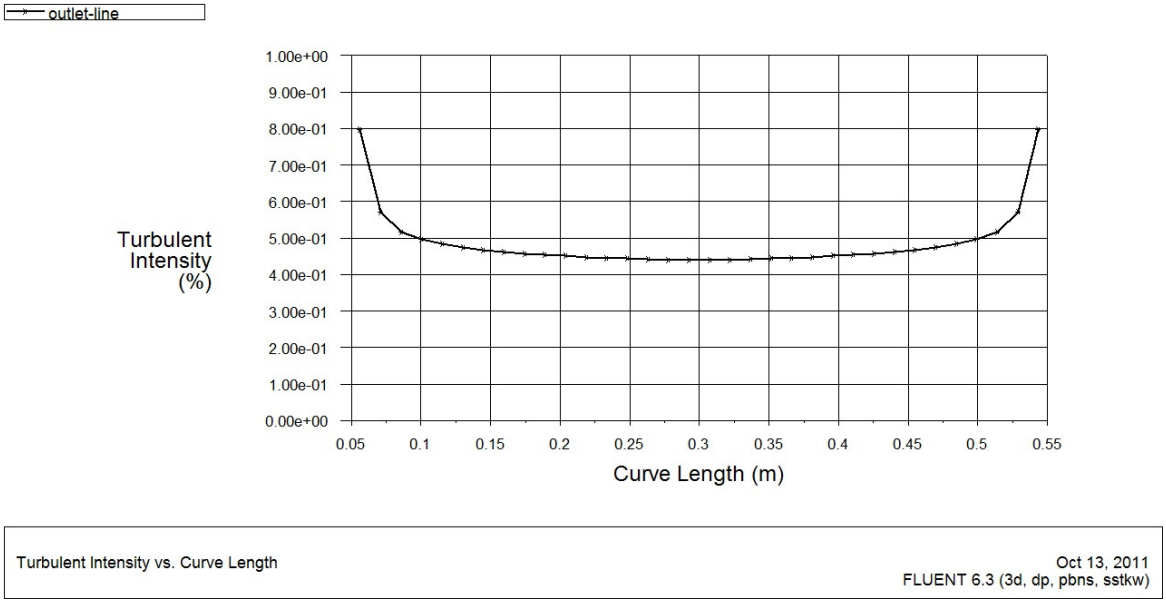
الشكل *(46.4)*: أشعة السرعة في النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك في حالة قسم اختبار مفتوح.

3.2.4.3.4 مقارنة معامل درجة الاضطراب في النفاثات الثلاثة

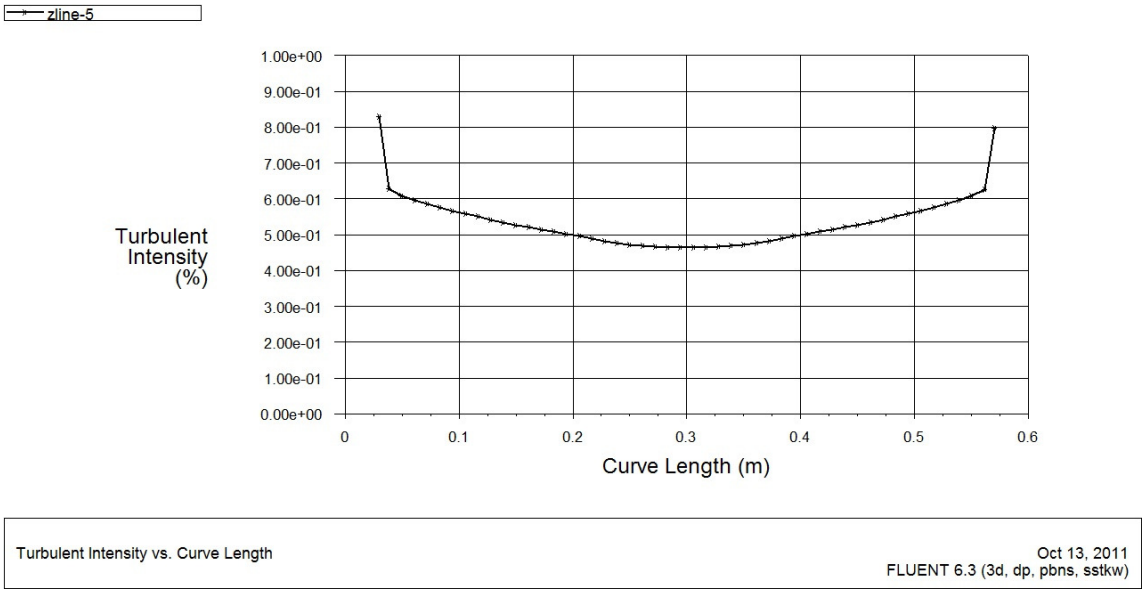
الأشكال *(47.4)*، *(48.4)*، *(49.4)* توضح توزع معامل درجة الاضطراب عند مخرج النفاثات الثلاثة وكما هو واضح من الأشكال الثلاثة فإن قيمة معامل درجة الاضطراب محصورة بين *0.5 % - 0.4* في نواة الجريان ولكن منحني شدة الاضطراب أكثر استقراراً في النفاثتين المصممتين حسب بورجر وحسب طريقة كثيري الحدود المتلاقية حيث نلاحظ وجود نقطة ذروة سفلى في التصميم حسب معادلة جامعة روستوك مما يمنح التصميمين الآخرين أفضلية عن هذا التصميم.



الشكل *(47.4)*: معامل درجة الاضطراب عند مخرج النفاثة المصممة حسب بورجر في حالة قسم اختبار مفتوح.



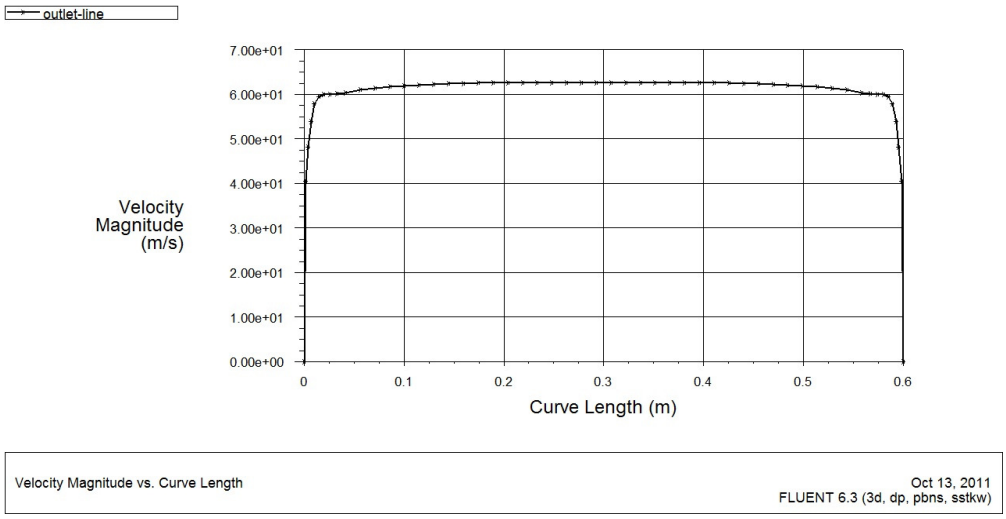
الشكل *(48.4)*: معامل درجة الاضطراب عند مخرج النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين في حالة قسم اختبار مفتوح.



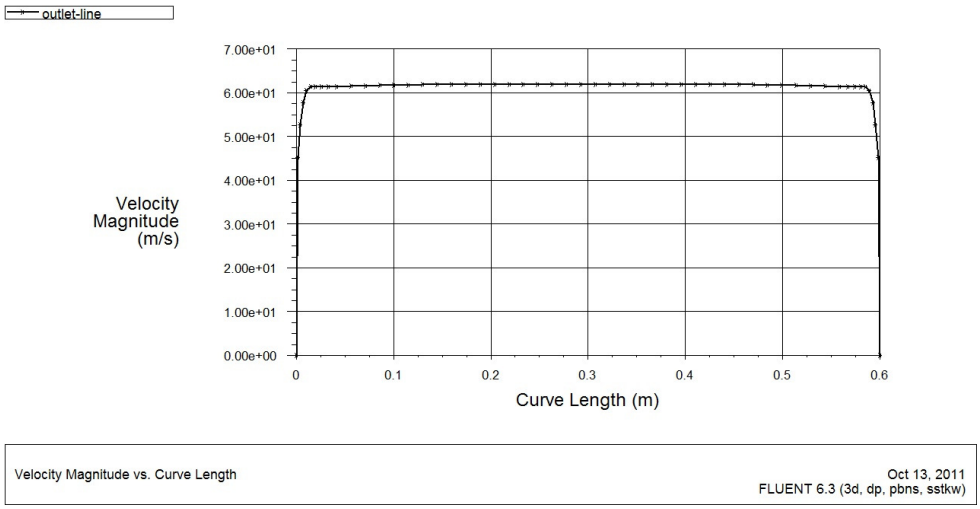
الشكل *(49.4)*: معامل درجة الاضطراب عند مخرج النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك في حالة قسم اختبار مفتوح.

4.2.4.3.4 مقارنة بروفيل توزع السرعة عند المخرج في النفاثات الثلاثة

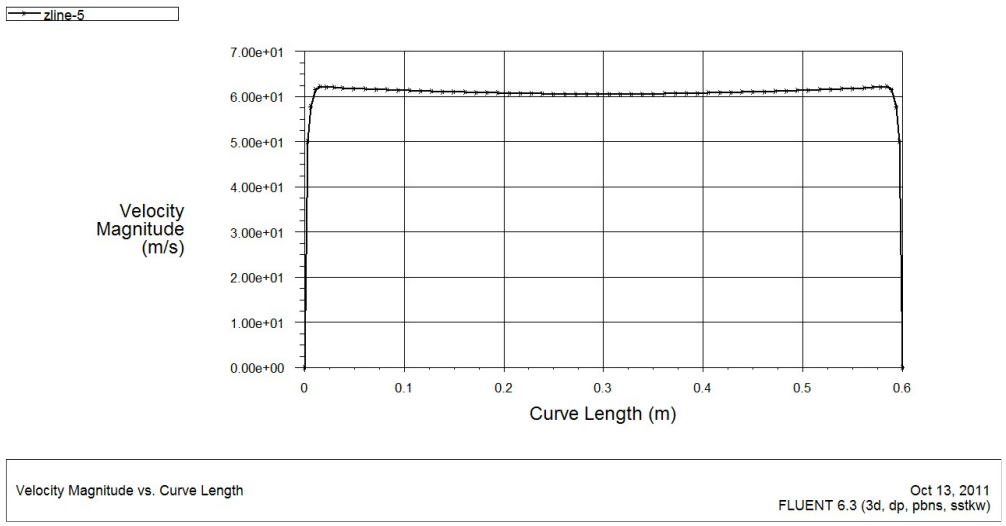
الأشكال *(50.4)*، *(51.4)*، *(52.4)* توضح بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثات الثلاثة، وكما هو واضح من الأشكال فإن السرعة عند المخرج في التصاميم الثلاثة تتراوح بين *60 – 62 m/s*، إذن تحقق السرعة الأعظمية المطلوبة.



الشكل *(50.4)*: بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثة المصممة حسب بورجر في حالة قسم اختبار مفتوح.



الشكل *(51.4)*: بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين في حالة قسم اختبار مفتوح.



الشكل *(52.4)*: بروفيل توزع السرعة عند مخرج النفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك في حالة قسم اختبار مفتوح.

3.4.3.4 اختيار الحل الأنسب للنفاثة

لقد حصلنا على توزع سرعة وجريان منتظم في التصاميم الثلاثة للنفاثة، كما أننا وصلنا إلى السرعة المطلوبة عند مخرج النفاثة في التصاميم الثلاثة أيضاً في حالة قسم اختبار مغلق أو مفتوح. فرق الضغط الكلي للنفاثة المصممة حسب معادلة جامعة روستوك هو الأصغر ولكن بما أن معامل درجة الاضطراب في هذا التصميم أكبر من التصميمين الآخرين لذا سوف ينحصر اختيارنا بين النفاثتين الأخريين لأن معامل درجة الاضطراب له تأثير حاسم على جودة الجريان في قسم الاختبار، وبما أن فرق الضغط عبر النفاثة المصممة حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقية أصغر فسوف نختار هذه النفاثة لتصميم وتصنيع القناة الهوائية المدروسة.

4.4 الخلاصة والاستنتاجات

- أثبتت نتائج النمذجة والمحاكاة أن الحساب الأيروديناميكي استناداً إلى *[30]* هي الأقرب للصواب من الحساب بالاعتماد على *[1]* أو *[6]*. ومن الجدير بالذكر هنا أن المرجع *[30]* هو رسالة دكتوراة لدراسة وتصميم وتصنيع قناة هوائية منشورة في جامعة فلوريدا وقد تم تصنيع هذه القناة والتأكد من الحسابات النظرية.

- أظهرت نتائج المحاكاة أن الجريان في القناة المدروسة وفق التصميم المعتمد خالٍ من أية نقاط انفصام للطبقة الحدية سواء في الناشرات أو الأكواع أو في أي قسم آخر من أقسام القناة.

- الحصول على جريان انسحابي منتظم في قسم الاختبار عند سرعة *60 m/s* وبمعامل درجة اضطراب مساوٍ تقريباً لـــ *0.5 %* وهي المواصفات الأيروديناميكة التي هدفنا لتحقيقها.

- سنعتمد تصميم النفاثة وفقاً لطريقة كثيري الحدود مع اعتماد طول النفاثة المحدد حسب طريقة بورجر البالغ *.L = 1384 mm*

الفصل الخامس

طريقة تصنيع عناصر القناة الهوائية وتجميعها وبحث إمكانات التصنيع المتوفرة محلياً

1.5 مادة تصنيع القناة الهوائية

يستخدم في تصنيع الأقنية الهوائية المماثلة للقناة المدروسة عدة مواد مثل: الستانلس ستيل، الفولاذ المغلفن، الفيبر جلاس لتصنيع النفاثة، كما يستخدم نوع معين من الزجاج *Plexiglass* لتصنيع نوافذ قسم الاختبار *[29]*. وقد وقع اختيارنا على الستانلس ستيل درجة *304* أو يسمى أحياناً *18/8* لاحتوائه على *18 %* كروم و*8 %* نيكل لاستخدامه في عملية تصنيع القناة أو الفولاذ المغلفن باستثناء النفاثة التي سوف يتم تصنيعها من الفيبر جلاس نظراً لمواصفاته الجيدة ولتوافره في السوق المحلية. بعض ميزات الستانلس ستيل *[61]*:

- يحتوي هذا النوع من الستانلس على كمية من الكربون أقل من باقي أنواع الستانلس الستيل.
- أقل حساسية للحرارة من باقي أنواع الستانلس.
- قابليته للسحب والطرق واللحام.
- مقاومة عالية ضد الصدأ والأكسدة بسبب احتوائه على النيكل *[66,62]*.
- مقاومته للنقر والتصدع والتشقق بسبب احتوائه على الكروم *[66]*.
- هذا النوع هو أكثر أنواع الستانلس استخداماً حيث يشكل حوالي *50 %* من استخدام الستانلس *[65,63,62]*.

والجداول *(3,2,1.5)* تبين التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية والفيزيائية للستانلس ستيل درجة *304*، والجدول *(4.5)* يبين خواص الفولاذ.

الجدول *(1.5)*: النسب المئوية لتركيب الستانلس الستيل درجة *304* الكيميائي *[65,64,63,62,61]*:

العنصر	الكربون	الكروم	النيكل	المنغنيز	السيليكون	الكبريت	الفوسفور
النسبة المئوية	0.08	20-18	12-8	2	1	0.03	0.04

الجدول *(2.5)*: الخواص الميكانيكية للستانلس الستيل درجة *304 [63]*:

إجهاد الشد [MPa]	**إجهاد التعب [MPa]**	**إجهاد الانضغاط [MPa]**
600	240	210

الجدول *(3.5)*: الخواص الفيزيائية للستانلس الستيل درجة *304 [85,66,62]*:

درجة الانصهار $[^{\circ}C]$	الكثافة ρ $[kg/m^3]$	معامل التمدد الحراري α $[^{\circ}C]$	الناقلية الحرارية λ $[W/m]$	ثابت المرونة E $[kN/mm^2]$
1454	8030	$19.5x\,10^{-6}$	15	200

يستخدم في لحامه قضبان ستانلس ستيل درجة *308 [65]*، ولتجنب التشققات والتصدعات عند لحام هذا النوع من الستانلس يجب مراعاة القواعد التالية:

- يجب عدم تحريك الالكترود بشكل متعرج.
- نسبة عرض درزة اللحام إلى عمقها يجب أن تكون بحدود *1.5* إلى *2.5*.
- يجب عدم ترك أي فجوات أو ثقوب قبل البدء بدرزة اللحام التالية.

الجدول *(4.5)*: الخواص الفيزيائية للفولاذ *[87]*:

الكثافة *[kg/m3]*	معامل التمدد الحراري *[10-6\K]*	الناقلية الحرارية *[W/m]*	الحرارة النوعية *[J/kg.K]*	المقاومة الكهربائية *[10-9 Ω.m]*	إجهاد الشد *[MPa]*
7850	*9-15*	*26-48.6*	*1499-452*	*1251-210*	*758-1882*

وسيتم اختيار المادة بعد مقارنة كلفة شراء وتشغيل المواد الأولية.

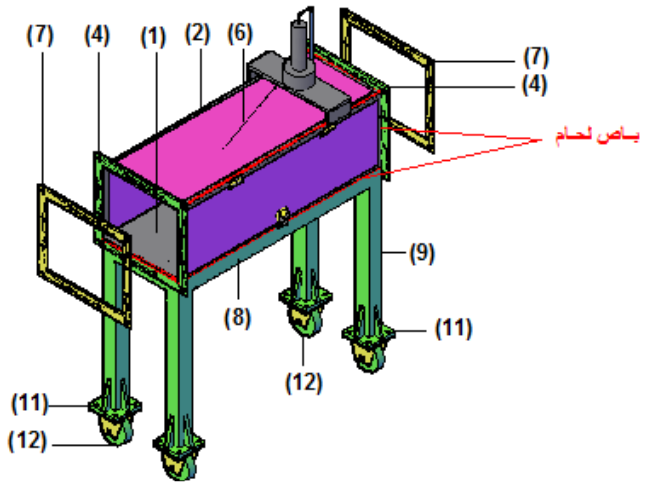
2.5 تصنيع قسم الاختبار *(1)*

قسم الاختبار سيعمل مغلقاً ومفتوحاً وسيتم ربطه مع العناصر التي تليه والتي تسبقه بواسطة فلانجات. الأجزاء المطلوبة لتصنيع قسم الاختبار موضحة في جدول الكميات الخاص بقسم الاختبار في المخطط *1/12* في الملحق *B* ص *208*.

يتم تصنيع إطار قسم الاختبار من الستانلس ستيل أو الفولاذ المغلفن أو الألمنيوم حيث نحتاج إلى صفيحة بالأبعاد الموضحة في المخطط *1/12* المسقط الأفقي لتشكل أرضية قسم الاختبار وثلاث صفائح من البلكسي جلاس الشفاف بالأبعاد الموضحة في المخطط *1/12* لتشكل الجدران الجانبية والسطح العلوي لقسم الاختبار.

يتم قص الصفائح التي سوف تشكل الجدران الجانبية والسطح العلوي لقسم الاختبار لفتح الأماكن المخصصة للنوافذ كما في المخطط *1/12* وبالأبعاد الموضحة في المخطط.

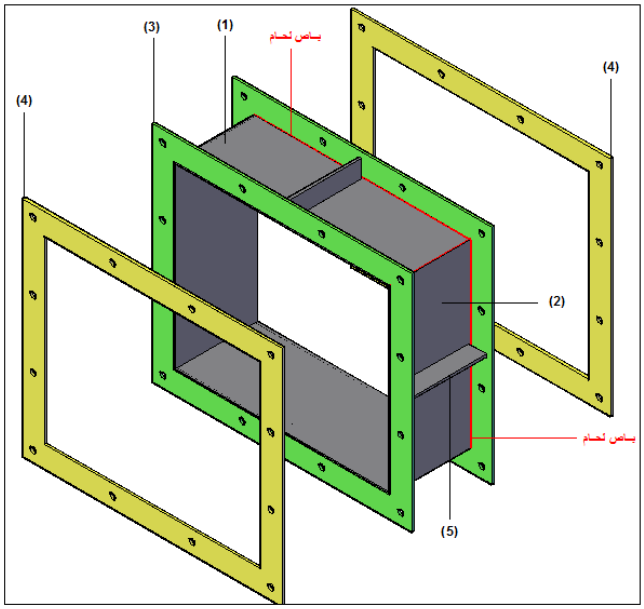
بعد ذلك يتم لحام عناصر إطار قسم الاختبار، وتوضع النوافذ في الأماكن المخصصة لها على الجدران الجانبية والسطح العلوي لقسم الاختبار حيث يتم ربطها مع الإطار بواسطة مفصلات خاصة، كما يتم تركيب قفل خاص للنافذة للتمكن من فتحها وإغلاقها، ويتم ربط قسم الاختبار مع النفاثة من جهة المدخل ومع مدخل المجمع من جهة المخرج بواسطة فلانجات وبراغي، ويربط الإطار مع الأرجل بواسطة اللحام، الشكل *(1.5)*.



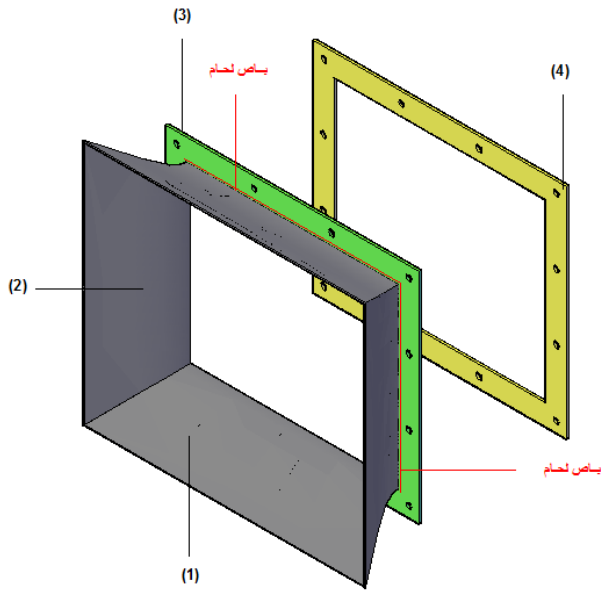
الشكل *(1.5)*: قسم الاختبار المغلق مع الحامل الخاص به *(1)*، بدون اعتماد مقياس رسم.

3.5 تصنيع المجمع *(2.1.1)*

الأجزاء المطلوبة لتصنيع المجمع موضحة في جدول الكميات الخاص بقسم المجمع في المخطط *2/12* في الملحق *B* ص *212*. الصفيحتان ذات الأبعاد الموضحة في المسقط الأفقي تشكلان السطح العلوي والسفلي للمجمع، والصفيحتان ذات الأبعاد الموضحة في المسقط الأمامي تشكلان الجدران الجانبية له. يتم لحام الصفائح مع بعضها البعض لتشكل المجمع كما هو موضح في الشكل *(2.5)*. يوصل المجمع مع الناشرة من جهة المخرج ومع قسم الاختبار من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي، كما يتم تركيب أعصاب على الجوانب الأربعة للمجمع بالأبعاد الموضحة في المخطط من أجل التدعيم والمتانة. في حال استخدام قسم الاختبار المفتوح تضاف فوهة تجميع لجريان الهواء توصل مع مدخل المجمع الشكل *(3.5)* قبل المجمع أي بعد قسم الاختبار (انظر المخطط التنفيذي الملحق *B* ص *212*).



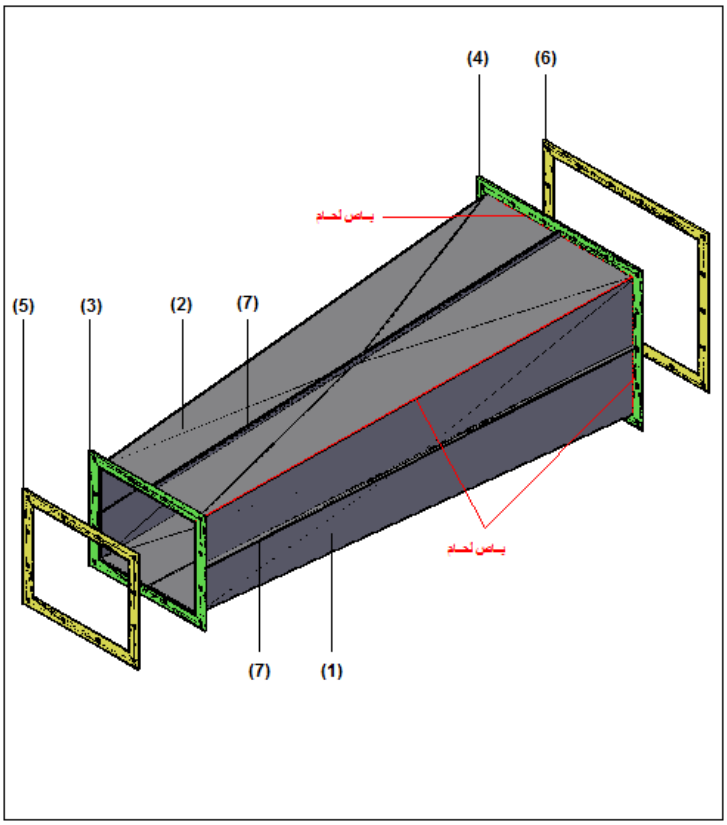
الشكل *(2.5)*: قسم المجمع *(2.1.1)*.



الشكل *(3.5)*: فوهة تجميع لجريان الهواء توصل مع مدخل المجمع في حالة قسم اختبار مفتوح *(2.1.2)*.

4.5 تصنيع الناشرة الأولى *(2.1)*

المواد المطلوبة لتصنيع الناشرة الأولى موضحة في جدول الكميات الخاص بها في المخطط *3/12* في الملحق *B*. ص *216*.
أبعاد الصفيحتين اللتين تشكلان السطح العلوي والسفلي للناشرة موضحة في المخطط *3/12* المسقط الأفقي، بينما يوضح المسقط الأمامي أبعاد الصفيحتين اللتين تشكلان الجدران الجانبية للناشرة. يتم لحام الصفائح مع بعضها للحصول على الناشرة الأولى التي يتم وصلها مع الكوع الأول من جهة المخرج ومع قسم المجمع من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي، كما يتم تركيب أربعة أعصاب للناشرة على جوانبها الأربعة من أجل التدعيم، الشكل *(4.5)* يوضح شكل الناشرة الأولى.

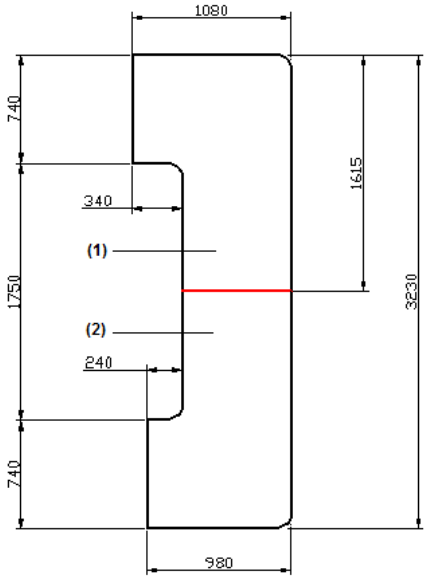


الشكل *(4.5)*: الناشرة الأولى *(2.1)*.

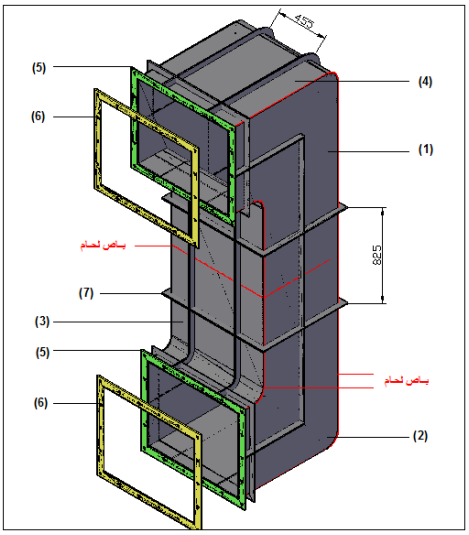
5.5 تصنيع الكوع الأول والثاني *(3.1,2)*

المواد المطلوبة لتصنيع الكوع الأول والثاني موضحة في جدول الكميات الخاص بهما في المخطط *4/12* في الملحق *B* ص *218*.

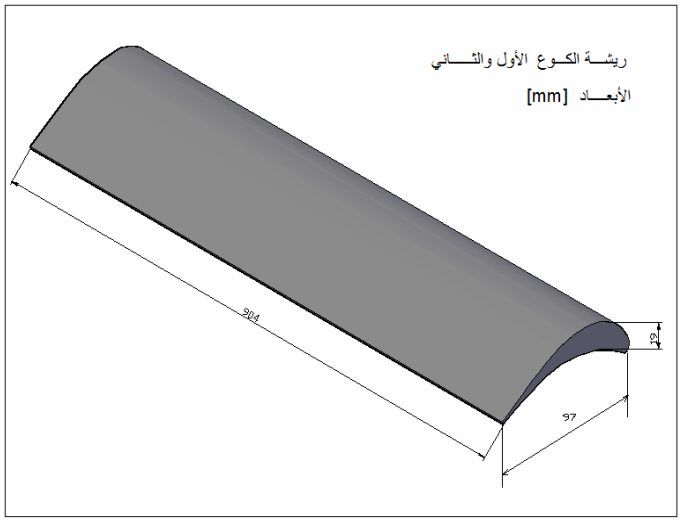
يتم تصنيع الكوع الأول والثاني من قسمين كما هو واضح في المخطط ثم يتم لحام القسمين مع بعضهما للحصول على الكوعين كما هو موضح في الشكل *(5.5)*، ويتم وصلهما مع الناشرة الثانية من جهة المخرج ومع الناشرة الأولى من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي كما هو موضح في الشكل *(6.5)* الذي يظهر أيضاً الأعصاب اللازمة لتدعيم المتانة. يجب تصنيع زوايا الأكواع بشكل منحني يماثل شكل الريشة من أجل تجنب تكون أعاصير عند زوايا الكوع. ريش التوجيه التي يجب تركيبها في هذين الكوعين موضحة في الشكل *(7.5)*، ونقترح استيرادها من شركة مختصة وحسب نوع مادة تصنيعها ستحدد الطريقة المناسبة لتركيبها داخل الكوعين.



الشكل *(5.5)*: توضيح القسمين اللذين يصنع منهما الكوع الأول والثاني الأبعاد بـــ *mm*.



الشكل *(6.5)*: الكوع الأول والثاني *(3.1,2)*.

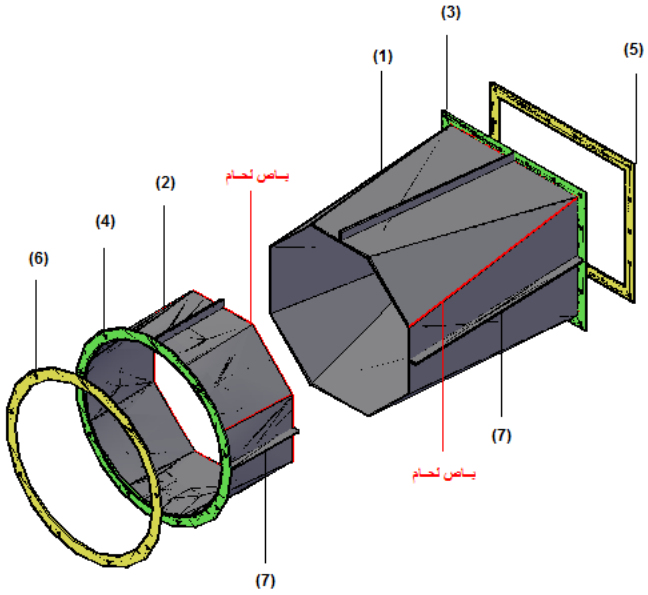


الشكل *(7.5)*: أبعاد ريش التوجيه المراد تركيبها في الكوع الأول والثاني بـــ *mm*.

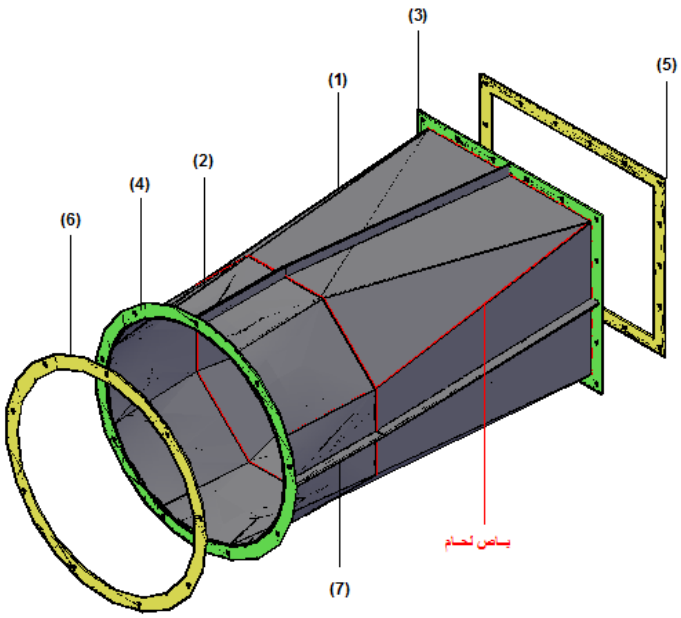
6.5 تصنيع الناشرة الثانية *(2.2)*

المواد المطلوبة لتصنيع الناشرة الثانية موضحة في جدول الكميات في المخطط *5/12* في الملحق *B*. ص *225*.

سيتم تصنيع هذه الناشرة من قسمين كما في الشكل *(8.5)*. الأول ذو مدخل مستطيل أبعاده *740 x 910 mm* ومخرج مثمن محيطه *3312 mm* بمساحة مقطع تساوي *0.785* m^2 وطول هذا القسم *1260 mm*، والثاني مدخله هو المثمن ومخرجه دائرة محيطها *3141 mm* بمساحة مقطع تساوي *0.818* m^2، ثم يتم لحام القسمين مع بعضهما للحصول على الناشرة الثانية كما في الشكل *(9.5)*، الذي يظهر أيضاً الأعصاب اللازمة لتدعيم متانة الناشرة، والتي يتم وصلها مع قسم المروحة من جهة المخرج ومع الكوع الثاني من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي.



الشكل *(8.5)*: توضيح القسمين اللذين تصنع منهما الناشرة الثانية.



الشكل *(9.5)*: الناشرة الثانية *(2.2)*.

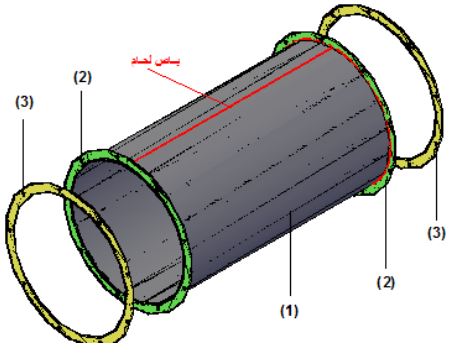
7.5 تصنيع قسم المروحة *(6)*

المواد المطلوبة لتصنيع غلاف قسم المروحة فيما لو تم تصنيعه محلياً وتم شراء المروحة ومحركها فقط موضحة في جدول الكميات في المخطط *6/12* في الملحق *B*. ص *228*.

لتصنيع قسم المروحة نحتاج إلى صفيحة مستطيلة الشكل أبعادها *3141 x 1800 mm* لتشكل هذا القسم حيث يتم حني هذه الصفيحة ثم لحامها للحصول على قسم المروحة كما هو موضح في الشكل *(10.5)* ويتم وصله مع الناشرة الثالثة من جهة المخرج ومع الناشرة الثانية من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي.

تركب المروحة مع محركها داخل قسم المروحة وبشكل عام فإن طريقة الوصل بين المحرك والمروحة الأكثر تفضيلاً هي طريقة الوصل المباشر *[1]*. يجب وضع وصلات مرنة قبل وبعد قسم المروحة لمنع الاهتزازات.

من الأفضل أن يتم استيراد قسم المروحة كاملاً وبالأبعاد المناسبة للقناة المدروسة من إحدى الشركات المختصة، متضمناً مجموعة المحرك والمروحة وريش التوجيه الثابتة ونظام التحكم بسرعة المروحة وقاعدة البيانات.

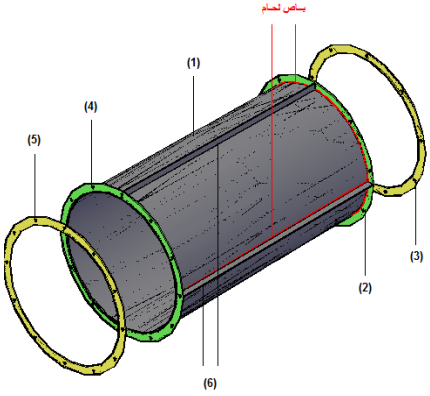


الشكل *(10.5)*: منظور الغلاف الخارجي لقسم المروحة *(6)*.

8.5 تصنيع الناشرة الثالثة *(2.3)*

المواد المطلوبة لتصنيع الناشرة الثالثة موضحة في جدول الكميات في المخطط *7/12* في الملحق *B*. ص *230*.

لتصنيع الناشرة الثالثة نحتاج إلى صفيحة عرضها عند المدخل *3141mm* وعند المخرج *3298 mm* وطولها *1800 mm* لتشكل هذا القسم، حيث يتم حني هذه الصفيحة ثم لحامها للحصول على الناشرة الثالثة كما هو موضح في الشكل *(11.5)*. ويتم وصلها مع القسم الانتقالي من جهة المخرج ومع قسم المروحة من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي كما سيتم لحام أربعة أعصاب على الجوانب الأربعة لهذه الناشرة من أجل التدعيم.

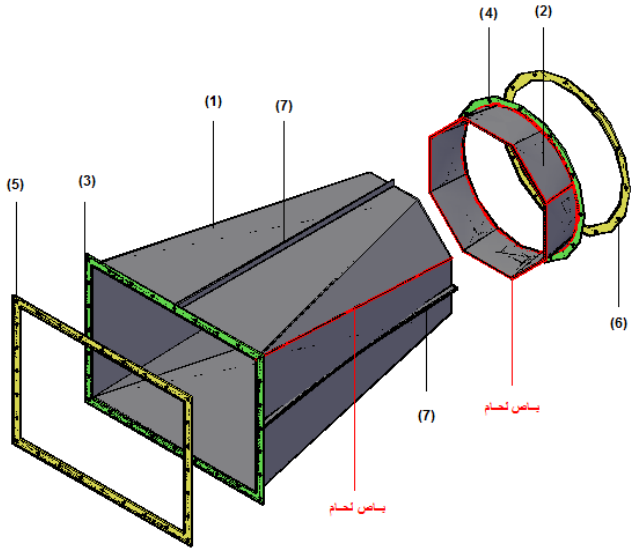


الشكل *(11.5)*: منظور الناشرة الثالثة *(2.3)*.

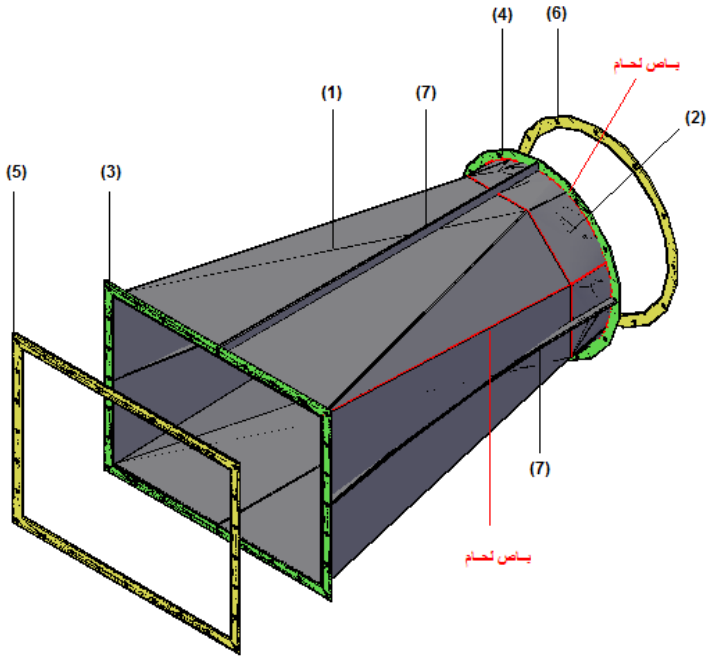
9.5 تصنيع القسم الانتقالي *(7)*

المواد المطلوبة لتصنيع هذا القسم موضحة في جدول الكميات في المخطط *8/12* في الملحق *B*. ص *232*.

سيتم تصنيع هذا القسم من جزئين كما في الشكل *(12.5)* الأول مدخله دائرة محيطها *3298 mm* ومخرجه مثمن محيطه *3456 mm* يتم تصنيعه بتطعيج الصفيحة بشكل مثمن وطول هذا القسم *300 mm* والثاني مدخله هو المثمن ومخرجه مستطيل أبعاده *1050 x 1500 mm* ثم يتم لحام القسمين مع بعضهما للحصول على القسم الانتقالي كما في الشكل *(13.5)* الذي يظهر أيضاً الأعصاب اللازمة للتدعيم الواجب تركيبها. يتم الوصل مع الكوع الثالث من جهة المخرج ومع الناشرة الثالثة من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي.



الشكل *(12.5)*: منظور الجزئين اللازمين لتصنيع القسم الانتقالي.



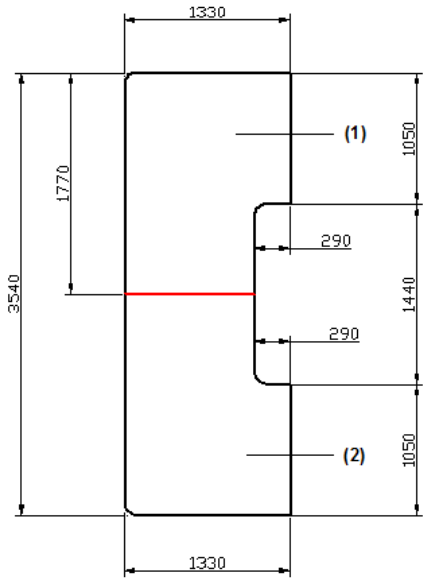
الشكل *(13.5)*: منظور القسم الانتقالي *(7)*.

10.5 تصنيع الكوع الثالث والرابع *(3.3,4)*

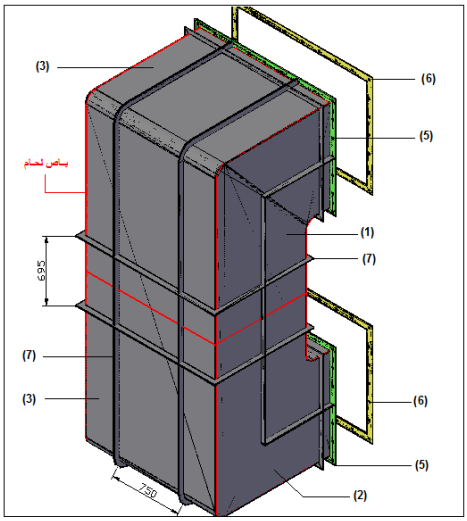
المواد المطلوبة لتصنيع الكوع الثالث والرابع موضحة في جدول الكميات الخاص بهما في المخطط *9/12* في الملحق *B*. ص *235*.

يتم تصنيع الكوع الثالث والرابع من قسمين كما هو واضح في المخطط ثم يتم لحام القسمين مع بعضهما البعض للحصول على الكوعين كما هو موضح في الشكل *(14.5)*، ويتم وصلهما مع الناشرة القصيرة من جهة المخـــرج ومـــع القســـم الانتقالي من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي كما هو موضح في الشكل *(15.5)* الذي يظهر أيضاً الأعصاب اللازمة للتدعيم التي يجب تركيبها على هذا القسم. يجب تصنيع زوايا الأكواع بشكل منحني يماثل شكل ريشة التوجيه من أجل عدم تكون أعاصير عند زوايا الكوع، ريش التوجيه التي ستركب في هذين الكوعين موضحة في الشكل *(16.5)*.

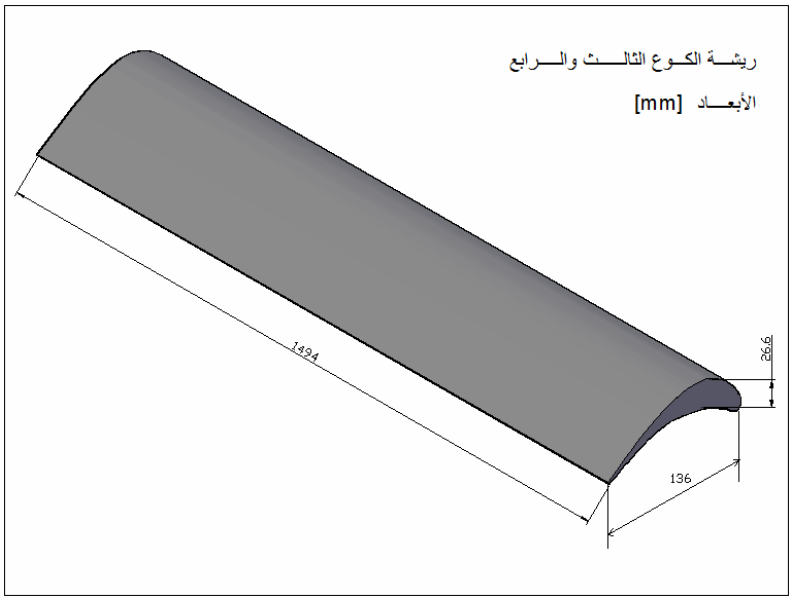
ريش التوجيه يجب شراؤها من شركة مختصة وبعد ذلك تثبيتها في الأكواع. يتم تثبيت ريش التوجيه في الأكواع باللحام أو بالتبشيم أو باستخدام مواد لاصقة خاصة وذلك حسب مادة تصنيعها.



الشكل *(14.5)*: توضيح القسمين اللذين يصنع منهما الكوع الثالث والرابع الأبعاد بـــ *mm*.



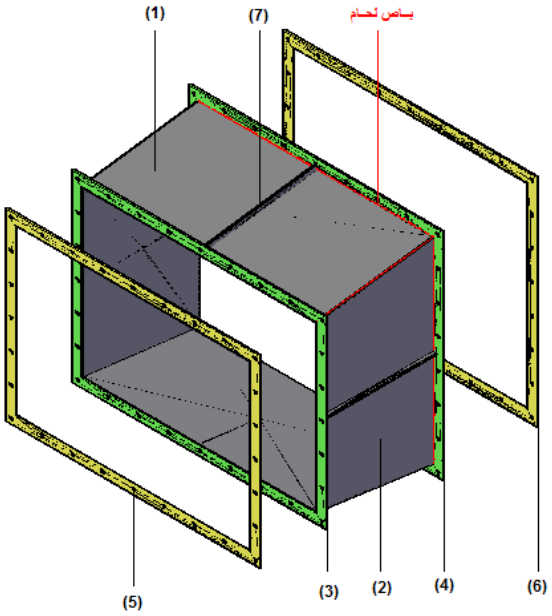
الشكل *(15.5)*: الكوع الثالث والرابع *(3.3,4)*.



الشكل *(16.5)*: أبعاد ريش التوجيه المراد تركيبها في الكوع الثالث والرابع بـــ *mm*.

11.5 تصنيع الناشرة القصيرة *(2.4)*

المواد المطلوبة لتصنيع الناشرة القصيرة موضحة في جدول الكميات الخاص بها في المخطط *10/12* في الملحق *B* ص *242*. أبعاد الصفيحتين اللتين تشكلان السطح العلوي والسفلي للناشرة موضحة في المخطط *10/12* المسقط الأفقـــي، بينمـــا يوضح المسقط الأمامي أبعاد الصفيحتين اللتين تشكلان الجدران الجانبية للناشرة. يتم لحام الصفائح مع بعضها للحصـــول على الناشرة القصيرة التي يتم وصلها مع الكوع الرابع من جهة المدخل ومع حجرة تهدئة واستقرار الجريان مـــن جهـــة المخرج بواسطة فلانجات وبراغي، كما يتم تركيب أربعة أعصاب للناشرة على جوانبها الأربعة من أجل التدعيم، الشكل *(17.5)* يوضح شكل الناشرة القصيرة.



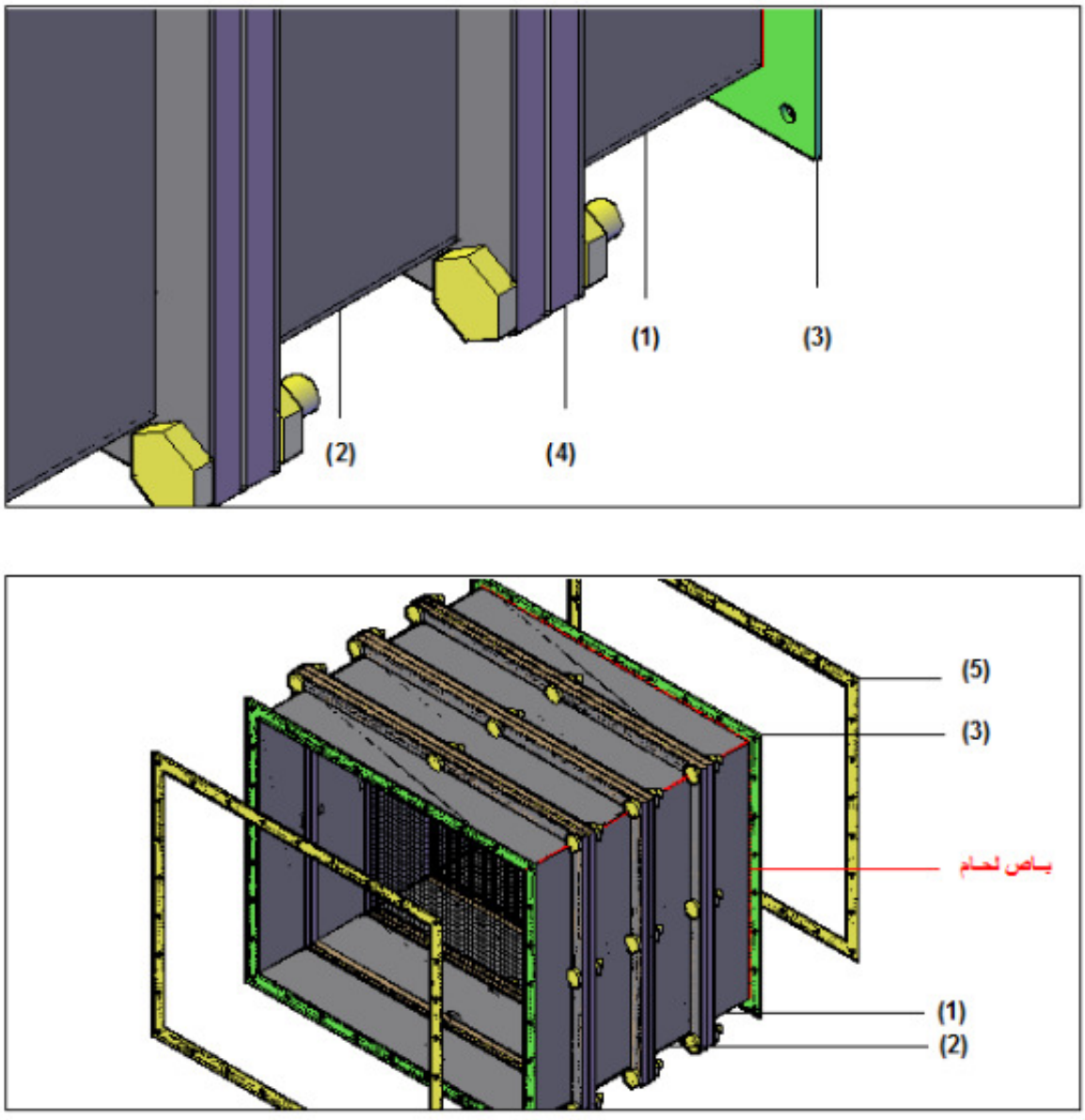
الشكل *(17.5)*: منظور الناشرة القصيرة *(2.4)*.

12.5 تصنيع حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*

المواد المطلوبة لتصنيع حجرة تهدئة واستقرار الجريان موضحة في جدول الكميات الخاص بهذا القسم في المخطط *11/12* في الملحق *B*. ص *244*.

من أجل عملية التصنيع نحتاج إلى صفيحتين بالأبعاد الموضحة في المخطط *11/12* المسقط الأفقي لتشكلا السطح العلوي وأرضية حجرة استقرار الجريان وصفيحتين بالأبعاد الموضحة في المسقط الأمامي لتشكلا الجدران الجانبية.

يتم ترك فراغات خاصة ومجاري لإدخال وإخراج المناخل وخلايا عش النحل التي توضع في إطار خشبي مناسب ويتم تركيبها في مكانها في حجرة تهدئة واستقرار الجريان. يتم لحام الأسطح الأربعة مع بعضها البعض لتشكل حجرة استقرار الجريان، ويتم ربط حجرة استقرار الجريان مع النفاثة من جهة المخرج ومع الناشرة القصيرة من جهة المدخل بواسطة فلانجات وبراغي.

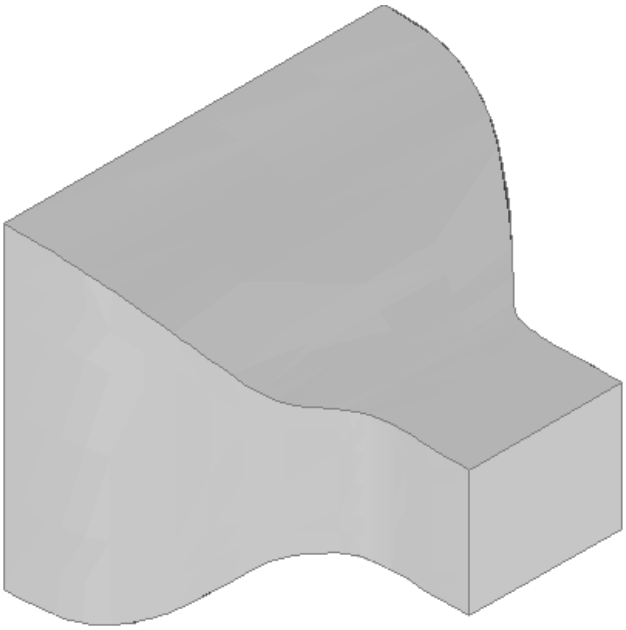


الشكل *(18.5)*: حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*.

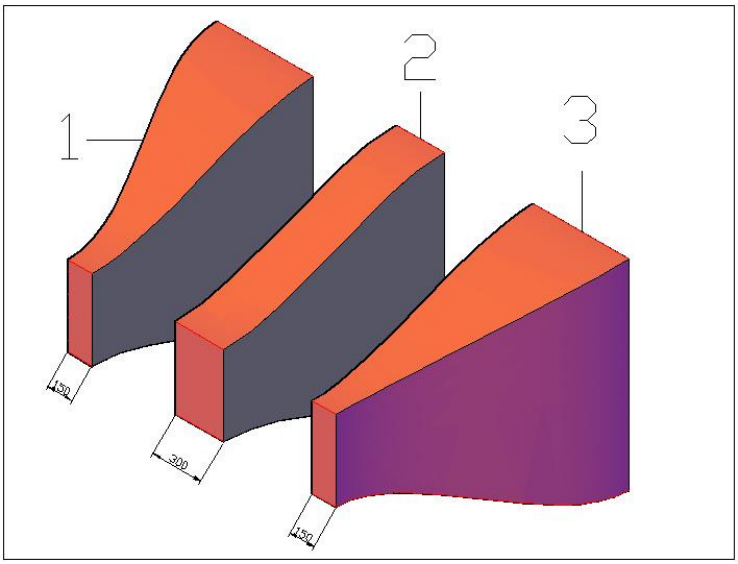
13.5 تصنيع النفاثة *(9)*

ستصنع جدران النفاثة من مادة الفيبرجلاس القابلة للطلاء على نموذج خشبي مناسب والمدعمة بجملة أعصاب فولاذية مربوطة باللحام مع فلانجات مدخل ومخرج النفاثة. بذلك نضمن سطوحاً ملساء لجدران النفاثة الداخلية والمتانة المطلوبة لها، حيث تلبس جملة الأعصاب بمادة الفيبرجلاس لتصبح جسماً واحداً مع جدران النفاثة. عملية التصنيع تتألف من ثلاث مراحل:

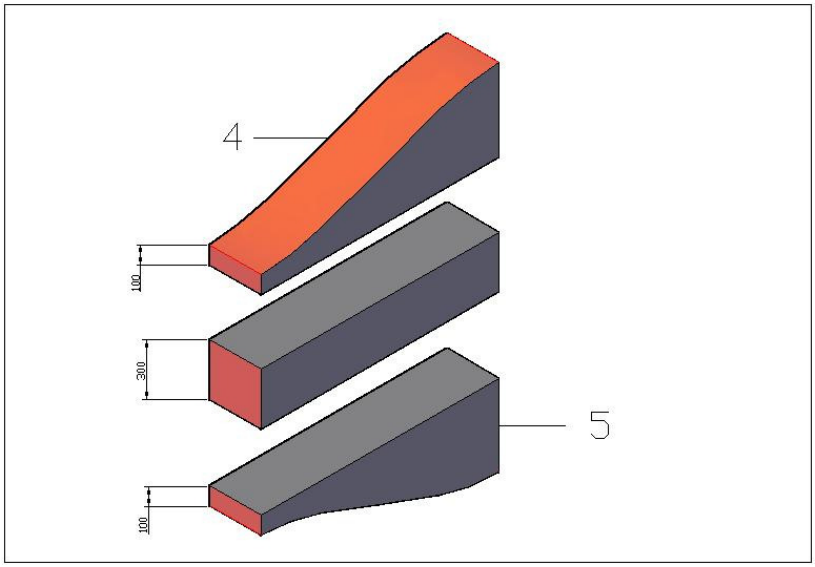
- المرحلة الأولى: تصنيع نموذج قالب خشبي تتطابق جدرانه تماماً مع جدران النفاثة. ويتحقق ذلك باستخدام آلة فارزة موصولة مع حاسوب مزود ببرنامج يسمح بتزويد آلة الفرز بإحداثيات جدران النفاثة الأربعة. يصنع النموذج مصمتاً كما في الشكل *(19.5)*. لضمان فك القالب من داخل النفاثة بعد الانتهاء من عملية التصنيع يتم تقسيمه إلى ثلاثة أقسام، الشكل *(20.5)*، ثم تفريغه من الداخل باقتطاع جزء أبعاده *30 X 30 cm*، الشكل *(21.5)*. بعد ذلك يتم ربط الأقسام الأربعة مع بعضها البعض بوساطة براغي شد ووصلات قابلة للتعيير، الشكل *(22.5)*، ومن ثم يطلى القالب بمعجون خشبي مناسب وتصقل السطوح بورق زجاجي لتصبح ملساء، ويصبح القالب جاهزاً لتلبيسه بمادة الفيبرجلاس، الشكل *(23.5)*.
- المرحلة الثانية: تصنيع جملة الأعصاب وربطها مع فلانجات مدخل ومخرج النفاثة باللحام. ونختار لتصنيع الأعصاب بروفيلاً بمقطع مربع *30 X 30 mm*، الشكل *(24.5)*.
- المرحلة الثالثة: عملية التصنيع، حيث يطلى نموذج القالب الخشبي بعدة طبقات من مادة الفيبرجلاس لتصل سماكتها إلى *1 mm*. ثم تركب عليها جملة الأعصاب والفلانجات، وتستكمل عملية الطلاء بالفيبرجلاس شاملة جسم النفاثة والأعصاب والفلانجات إلى أن تصل سماكة جدران النفاثة بحدود *6 – 8 mm*، ثم تترك فترة كافية حتى تجف تماماً. فك أقسام القالب الخشبي وإخراجها من داخل النفاثة يتم بحل براغي الشد والوصلات، ومن ثم فك وسحب القطعة *4* والقطعة *5*، وتليهما القطعة *1* والقطعة *3*، ونحصل على النفاثة المبينة في الشكل *(25.5)*. مع التنويه أنه يمكن إجراء بعض التعديلات بناءً على متطلبات عملية التصنيع.



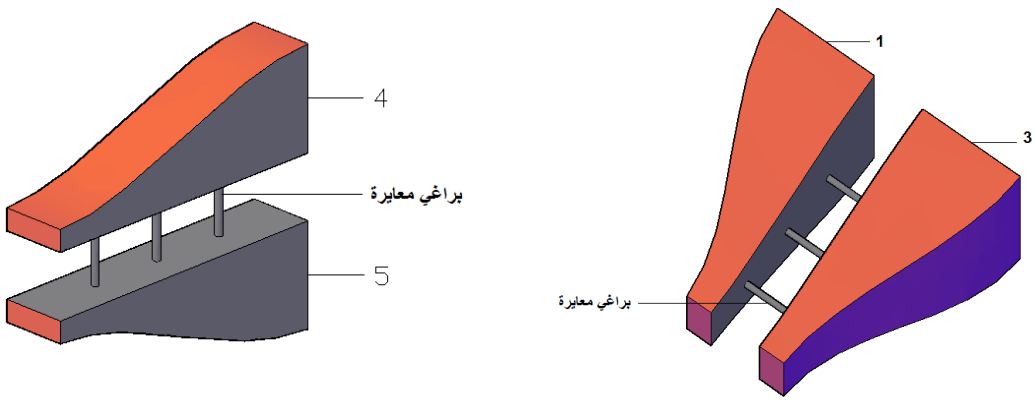
الشكل *(19.5)*: النموذج الخشبي للنفاثة: أبعاد مقطع الدخول *1500 X 1250 [mm]* ومقطع الخروج *600 X 500 [mm]*



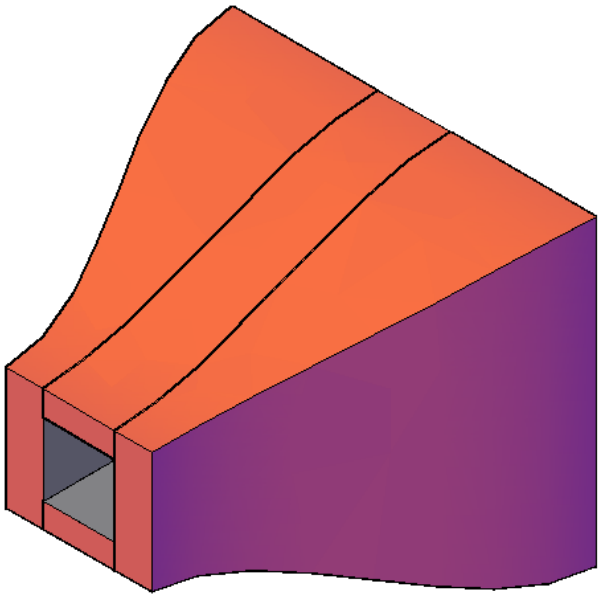
الشكل *(20.5)*: تقسيم القالب الخشبي إلى ثلاثة أقسام.



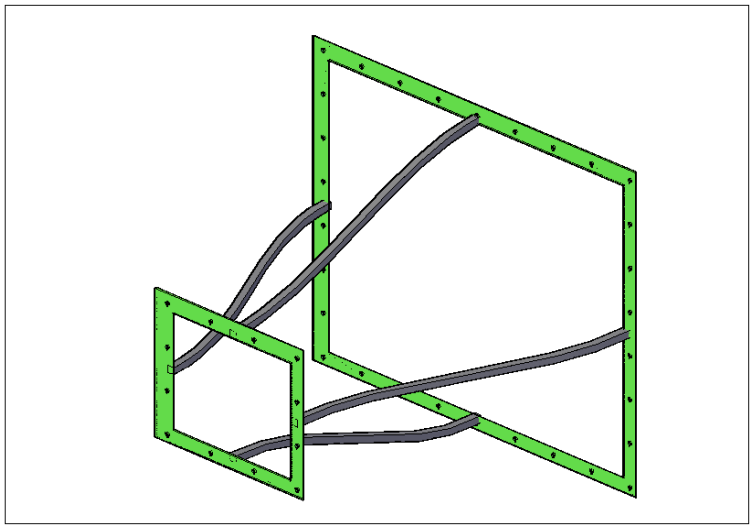
الشكل *(21.5)*: تفريغ القالب الخشبي.



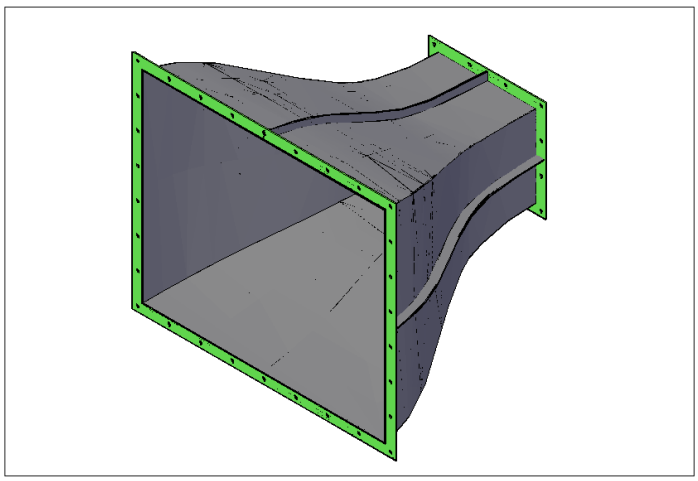
الشكل *(22.5)*: ربط أقسام القالب مع بعضها البعض ببراغي معايرة.



الشكل *(23.5)*: القالب الخشبي بعد ربط أقسامه مع بعضها البعض.



الشكل *(24.5)*: جملة الأعصاب والفلانجات.



الشكل *(25.5)*: النفاثة بعد الانتهاء من عملية التصنيع.

14.5 تصنيع الهيكل المعدني الحامل للقناة الهوائية

المواد المطلوبة لتصنيع الهيكل الحامل للقناة الهوائية موضحة في جدول الكميات المدرجة في مخطط الهيكل المعدني في الملحق *B*. ص *206*.

من أجل عملية التصنيع نحتاج إلى قضبان معدنية مفرغة بمقطع مستطيل بالأبعاد الموضحة في المخطط المذكور ويتم لحامها مع بعضها لتشكيل الهيكل، أما تثبيت الهيكل مع القناة فيتم بواسطة براغي من أجل سهولة الفك عند الحاجة لذلك (انظر ص*207*)، كما سيتم توصيل القناة مع سقف المخبر بواسطة مخمدات اهتزاز، لقسم المروحة سيتم تصنيع حامل خاص به ليكون قادراً على حمل وزن قسم المروحة، أيضاً سيتم تصنيع حامل خاص لقسم الاختبار المغلق للتمكن من تحريكه بسهولة عند الحاجة إلى إجراء تجارب بقسم اختبار مفتوح. طريقة تثبيت الهيكل مع أرض المخبر موضحة في الملحق *B* ص *211*.

15.5 البحث عن الإمكانات المحلية لتصنيع القناة وحساب الكلفة التقديرية

قمنا بزيارة الورشات التالية في إطار عملية البحث عن ورشة مناسبة من أجل تصنيع القناة محلياً:

1. بعد البحث عن ورشة جيدة للتنفيذ وجدنا ورشة في منطقة صحنايا بإشراف المهندس عبد الحميد عواد تتوفر لديها إمكانيات التصنيع لتوفر العدد والأدوات و الماكينات اللازمة لهذا العمل ولأن عناصر الورشة احترافيون. وقدرت الورشة تكاليف تصنيع نموذج مصغر للنفاثة بمقياس *1/2* بحوالي *40,000* ليرة سورية.
2. زيارة منشأة البرجاوي للقوالب في منطقة الصناعة وسؤالها عن إمكانية تصنيع النفاثة وكانت الإجابة بأن الورشة غير قادرة على تنفيذ هذا العمل.
3. كما تمت زيارة معمل المالح لتصنيع وحدات معالجة الهواء وأجريت مناقشة مع م.بشار المالح مدير المعمل حول إمكانية تصنيع القناة ككل أو أحد مكونات القناة مثل النفاثة أو المناخل و خلايا عش النحل أو المروحة في المعمل وكانت الإجابة حول تصنيع هيكل القناة بأن العمال والمعدات غير مجهزين لإنجاز عمل بهذه الدقة. أما بالنسبة لخلايا عش النحل و المناخل فأجاب بأنهم في المعمل لا يعملون على تصنيع مثل هذه العناصر. و بخصوص المروحة فأجاب بأن المراوح التي يصنعونها تختلف عن المروحة المطلوبة وبأنهم لا يصنعون مراوح مماثلة.
4. طبعاً توجد في القطر ورشات تصنيع أخرى لابد من زيارتها والتعرف على إمكاناتها التصنيعية عندما يقر موضوع تصنيع القناة وترصد له المبالغ اللازمة لذلك.

والنتيجة التي خلصنا إليها بأنه من الممكن تصنيع هيكل القناة بكافة مكوناته متضمناً النفاثة في الورشة الكائنة في صحنايا على أن يتم استيراد باقي العناصر الأخرى التي تشمل قسم مجموعة المروحة، وريش التوجيه في الأكواع، والمناخل وخلايا عش النحل من شركات مختصة مثل شركة *TLT* الألمانية وموقعها الالكتروني: *www.tlt.de*، أو شركة كروما *Chroma* الأندونيسية وموقعها الالكتروني: *www.chromaintegrated.com*، أو شركة *Witt & Sohn* الألمانية وموقعها الالكتروني: *www.wittfan.de*.

حساب الكلفة التقديرية للتصنيع موجودة في الملحق *C*، الفقرة *3.11*، ص *248*، حيث بلغت الكلفة الإجمالية اللازمة لتصنيع القناة محلياً من صفائح معدنية مغلفنة *4,616,000* ل.س تضاف إليها أجور التجميع والتركيب في المخبر بواقع *20 %* من الكلفة الإجمالية.

الفصل السادس

أسس اختبار ومعايرة القناة

بعد بناء أي قناة هوائية يجب التحقق من أن مواصفات الجريان تخدم الأغراض التي من أجلها تم تصميم القناة. اختبار ومعايرة القناة يقتضي بأن نتأكد بأننا قد حصلنا على جريان منتظم داخل قسم الاختبار وأن قيمة معامل درجة الاضطراب هي القيمة المطلوبة، كما أنه من المهم قياس نمو الطبقة الحدية على جدران قسم الاختبار *[30,14,5,1]*، ويضاف إلى ذلك قياس كل من الضغط الستاتيكي *[30]* وسرعة الجريان التي تحسب استناداً لقياسات الضغط الديناميكي كما يجب قياس تدرج الضغط الطولي *[1]*. ومن الضروري عدم إهمال القياسات المتعلقة بالضجيج التي أصبحت ذات أهمية خاصة هذه الأيام في الأقنية الهوائية تحت الصوتية.

من الجدير بالذكر أن عملية المعايرة لقناة هوائية جديدة تكلف بها شركات اختصاصية مستقلة تصدر بعد إنجاز العملية شهادة مطابقة مصدقة يحدد فيها مدى التباين أو التطابق مع شروط ومتطلبات الزبون. ويتوجب على الشركة الصانعة إجراء التعديلات المطلوبة وفقاً لهذه الوثيقة لتحقيق الشروط المطلوبة. وفي حال تم تصنيع القناة المدروسة ومن أجل تخفيض التكاليف العالية لشركات المعايرة يمكننا الاستفادة من العلاقات العلمية التي تربط كليتنا مع عدد من الجامعات الألمانية لإرسال خبراء يقومون بعملية المعايرة المطلوبة.

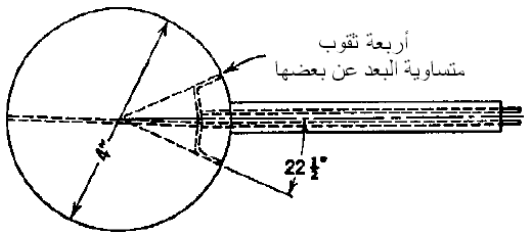
1.6 انتظام الجريان

للتأكد من أن الجريان منتظم يجب معرفة توزع السرعة داخل قسم الاختبار، حيث يمكن إجراء ذلك باستخدام مسبار السلك الساخن أو مشط أنبوبات بيتوت *[35,30,14]*، ثم يتم مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة والمحاكاة أي مقارنة بروفيل توزع السرعة والضغط اللذين حصلنا عليهما عن طريق النمذجة والمحاكاة مع مثيليهما من النتائج التجريبية *[30]*، وأيضاً فإنه من الأفضل أن يتم تمثيل أشعة السرعة بيانياً في كامل الحيز الذي سيشغله نموذج الاختبار عند استخدام القناة الهوائية لإجراء التجارب، وعندها يمكن توقع أماكن تشكل الأعاصير في قسم الاختبار إن وجدت، حيث يعزى سبب وجود هذه الأعاصير إن وجدت إلى توزع السرعة السيئ قبل الكوع الثالث أو إلى التركيب السيئ لريش التوجيه في الكوع الرابع *[14,1]*. بناءً على نتائج القياسات للتأكد من انتظام الجريان في قسم الاختبار ممكن زيادة المناخل وخلايا عش النحل في حجرة التهدئة للحصول على جريان أكثر انتظاماً.

2.6 قياس شدة الاضطراب في قسم الاختبار

الاختلاف بين نتائج الاختبارات المجراة في أقنية هوائية مختلفة عند نفس عدد رينولدز سببه الاختلاف في قيمة معامل درجة الاضطراب لهذه الأقنية. لذلك يعتبر تحديد قيمة معامل درجة الاضطراب داخل قسم الاختبار من المعطيات التصميمية الأساسية *[22,7,1]*.

لقياس مركبات الاضطراب في القناة يستخدم مقياس السلك الساخن *CTA [35,25,14,7,1]* أو كرة الاضطراب*[7,1]* الموضحة في الشكل *(1.6)* التي مازالت طريقة فعالة وسهلة لقياس شدة الاضطراب في القناة، حيث تأكد من خلال التجارب أن عدد رينولدز الذي يحدث عنده هبوط فجائي لمعامل المقاومة للكرة أي نقطة الانعطاف في المنحني الموضح في الشكل *(2.6)* يعتمد بشكل كبير على درجة الاضطراب في القناة، إذ أن عدد رينولدز الذي يحدث عنده انخفاض معامل المقاومة يتناقص بزيادة معامل درجة الاضطراب في القناة، كما أن هناك تأثير لخشونة السطح، ولكن على اعتبار أن الكرة المستخدمة ذات سطح أملس، فيمكن تفسير الهبوط الفجائي في قيمة معامل المقاومة بأنه نتيجةً لزيادة عدد رينولدز سيحدث انتقال مبكر للطبقة الحدية من الحالة الصفائحية إلى المضطربة، قبل نقطة الانفصام الجريان على سطح الكرة يصبح الجريان في الطبقة الحدية مضطرباً، مما يمكن جزيئات الطبقة الحدية نتيجة لعمليات المزج وتبادل القدرة أن تتحمل تزايد ضغط أكبر وهذا بدوره يقود إلى انتقال نقطة الانفصام باتجاه الجريان ويصبح بالتالي عرض أثر المخر أصغر والمقاومة أقل *[3,1]*. من المعلوم تجريبياً بأن عدد رينولدز الحرج للكرة هو $3.85\ X\ 10^5$ *[1]*، وهذه القيمة أكبر من القيم التي نحصل عليها في الأقنية الهوائية، لأنه في الواقع لا تؤثر الأعاصير المضطربة على الطبقة الحدية الرقيقة للكرة. عدد رينولدز الحرج للكرة الذي يحدث عنده انخفاض قيمة معامل المقاومة بشكل كبير وفجائي يمكن قياسه بطريقتين، الطريقة الأولى بتمثيل القيم المقاسة لمعامل المقاومة للكرة C_D بيانياً مع عدد رينولدز كما في الشكل *(2.6)*. من الشكل يمكن قراءة عدد رينولدز الحرج في القناة الموافق لـــ $C_D = 0.3$، الطريقة الثانية هي أن نأخذ المتوسط الحسابي لضغوط الثقوب الأربعة لكرة الاضطراب ونطرحها من قيمة ضغط الركود عند رأس الكرة فينتج لدينا ΔP، بالتمثيل البياني لـــ $\Delta P/q$ حيث q هو الضغط الديناميكي مع عدد رينولدز نلاحظ أن قيمة $\Delta P/q = 1.22$ في نقطة الانعطاف والمقابلة لقيمة عدد رينولدز حرج يساوي *299,000* كما في الشكل *(3.6)*.

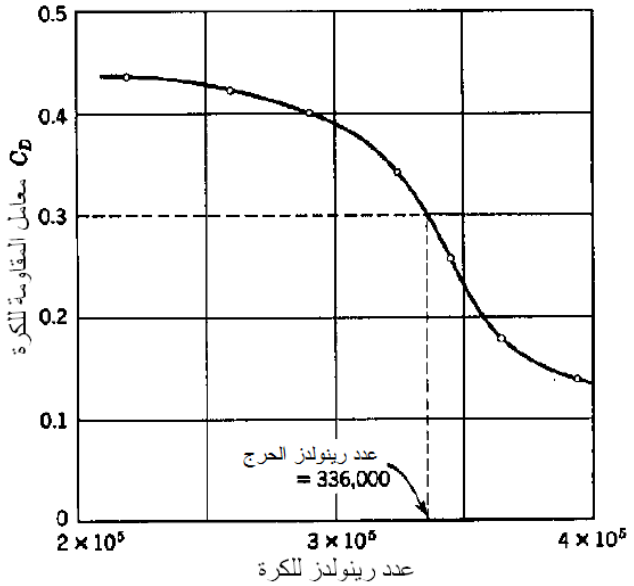


الشكل *(1.6)*: كرة قياس شدة الاضطراب *[1]*.

بعد تحديد عدد رينولدز الحرج سواء بطريقة قياس معامل المقاومة أو معامل الضغط يستخدم لإيجاد ما يسمى معامل الاضطراب TF في القناة بمقارنة عدد رينولدز الحرج للقناة مع عدد رينولدز المحسوب:

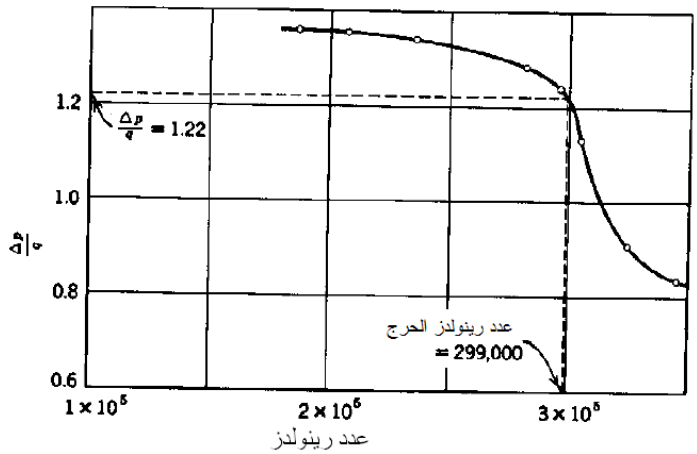
$$TF = \frac{385000}{\mathrm{Re}_{tunnel}} \qquad (1.6)$$

العلاقة بين معامل الاضطراب المعرف بالعلاقة *(1.6)* للكرة ومعامل درجة الاضطراب المعرف بالعلاقة *(1.2)* المقاس بالسلك الساخن ممثلة بيانياً في الشكل *(4.6)*.

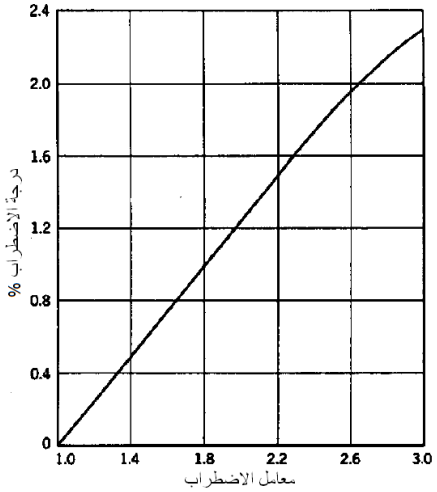


الشكل *(2.6)*: معامل المقاومة لكرة كتابع لعدد رينولدز *[1]*.

$$TF = 385{,}000/Re_{\text{tunnel}}$$



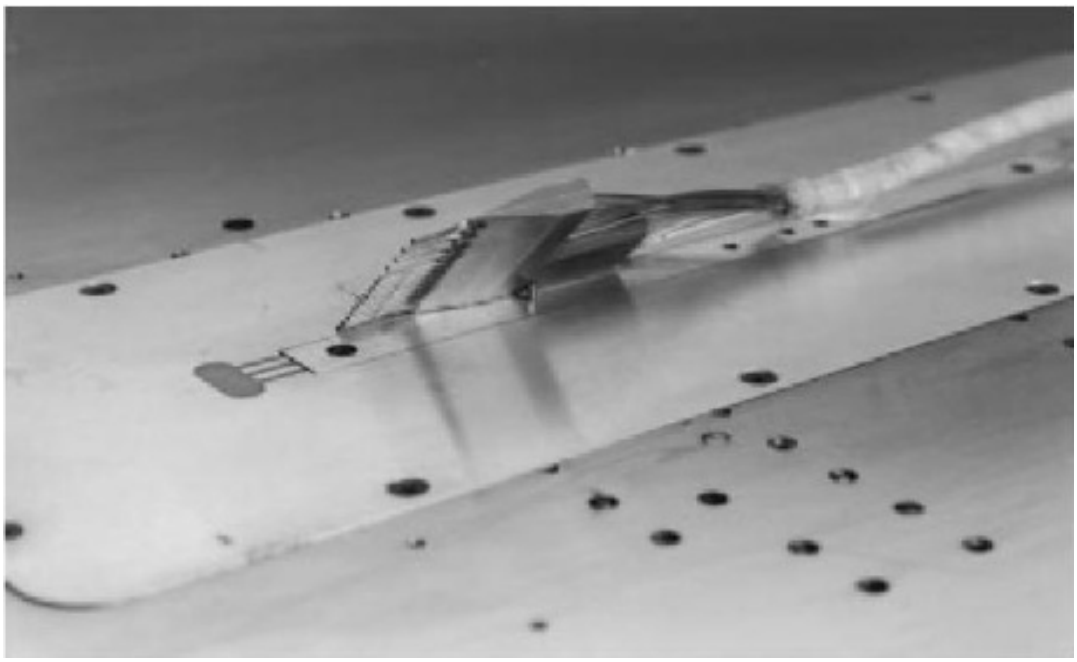
الشكل *(3.6)*: تغير معامل الضغط كتابع لعدد رينولدز من أجل كرة قياس الاضطراب *[1]*.



الشكل *(4.6)*: تغير معامل الاضطراب مع معامل درجة الاضطراب المقاس باستخدام مقياس السلك الساخن *[1]*.

3.6 نمو الطبقة الحدية على جدران القناة الهوائية

الطبقات الحدية على جدران القناة والتي تدخل في عملية معايرة القناة هي بشكل عام أكثر سماكة من الطبقة الحدية على نموذج الاختبار، الطبقات الحدية في القناة يمكن قياسها باستخدام مشط أنبوبات بيتوت خاص لقياس الطبقة الحدية *[1]* الموضح في الشكل *(5.6)*، أو باستخدام حامل يستطيع الحركة بالاتجاهات الثلاثة الشكل *(6.6)* *[30,1]*، مثبت عليه أنبوبة بيتوت أو مقياس سرعة بالسلك الساخن *[1]*. قياسات الطبقة الحدية لغرض المعايرة ضرورية من أجل معرفة أماكن الانفصام أو الأماكن التي من المرشح أن يحدث فيها انفصام.



الشكل *(5.6)*: صورة لمشط أنبوبات بيتوت يستخدم لقياس الطبقة الحدية *[74]*.



الشكل *(6.6)*: حامل لتحريك جهاز القياس *[73]*.

1.3.6 تحديد مواقع نقاط الانفصام

يمكن استخدام الخيوط الشعرية لكشف ذلك، وأيضاً من الممكن عمل تحريات أكثر دقة باستخدام الترئية أو التصوير من أجل شروط تشغيل مختلفة للقناة.

الطريقتان الأساسيتان لوصل الخيوط الشعرية على سطح ما هما إما باستخدام شريط لاصق أو بالصمغ، ويستخدم الشريط عادة من أجل لصق الخيوط على جدران القناة بعد تنظيف السطح بشكل جيد.

4.6 قياس سرعة الجريان

في حال عدم وجود نموذج داخل قسم الاختبار فإن جهاز القياس الأكثر استخداماً لقياس السرعة هو أنبوبة براندل، حيث لا يمكن استخدام أنبوبة براندل لقياس الضغط الديناميكي أو السرعة بهدف المعايرة في حال وجود نموذج تحت الاختبار لأن هذا النموذج سوف يسبب تغيرات في الجريان، يشار إلى هذه التغيرات بما يسمى الجريان المحرض.

تحدد السرعة عادة بقياس الضغط الستاتيكي بعد حجرة استقرار الجريان في بداية النفاثة المحطة L في الشكل *(7.6)* والضغط الستاتيكي في بداية قسم الاختبار في المحطة S على الشكل، بتطبيق معادلة برنولي بين المحطتين سيكون لدينا:

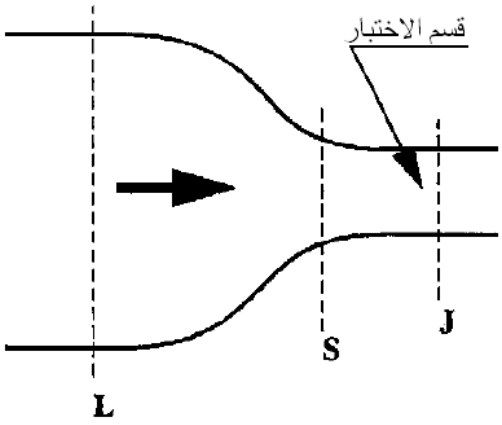
$$P_L + q_L = P_S + q_S - K_1 \cdot q_S \qquad (2.6)$$

حيث $K_1 \cdot q_S$ يمثل الفواقد بين L و S، P الضغط الستاتيكي، q الضغط الديناميكي.

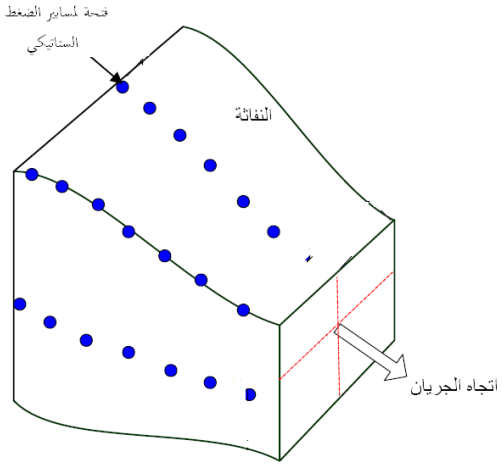
من معادلة الاستمرار وبإهمال قابلية الانضغاط:

$$A_L \cdot V_L = A_S \cdot V_S \qquad (3.6)$$

حيث A مساحة المقطع.



الشكل *(7.6)*: محطات القياس لمعايرة القناة الهوائية *[1]*.



الشكل *(a7.6)*:توزع مسابير قياس الضغط الستاتيكي على جدران النفاثة *[30]*.

بتربيع *(3.6)* وضربها بـ $\rho/2$ لإيجاد q_L:

$$\frac{\rho}{2}\cdot V_L^2 = q_L = \left(\frac{A_S}{A_L}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2}\cdot V_S^2 = \left(\frac{A_S}{A_L}\right)^2 \cdot q_S = K_2 \cdot q_S \qquad (4.6)$$

بالتبديل في *(2.6)*:

$$P_L - P_S = q_S \cdot (1 - K_1 - K_2) \qquad (5.6)$$

في حال أن مساحة المقطع المحطة S تختلف عن مساحة مقطع قسم الاختبار أي مساحة المقطع في المحطة J فبتطبيق معادلة الاستمرار بين s و j ينتج لدينا:

$$A_S \cdot V_S = A_J \cdot V_J$$

$$q_S = \frac{\rho}{2}\cdot V_s^2 = \left(\frac{A_J}{A_S}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2}\cdot V_J^2 = K_3 \cdot q_J \qquad (6.6)$$

وبالتالي:

$$P_L - P_S = (1 - K_1 - K_2)\cdot K_3 \cdot q_J \qquad (7.6)$$

في هذه المعادلة يمكن اعتبار K_1 كقيمة فقد إضافي في الضغط الكلي من المحطة S إلى مخرج النفاثة. يتم تحقيق المعايرة الفعلية للقناة بتشغيل القناة على قيم مختلفة لـــ $P_L - P_S$ بينما يتم قياس الضغط الديناميكي في قسم الاختبار باستخدام أنبوبة براندل معايرة مسبقاً، وهذا من شأنه تقييم $(1-K_1-K_2)\cdot K_3$، ومن الضروري أن يتم مسح كامل قسم الاختبار لأن السرعة ليست منتظمة تماماً في كامل قسم الاختبار، حيث أنه على الأقل يجب أن يتم مسح المستوي العمودي على مكان توضع نموذج الاختبار، ومن الأفضل أن يتم مسح كامل الحيز الذي سيشغله نموذج الاختبار.

يمكن مسح قسم الاختبار باستخدام أنبوبة براندل بسيطة أو باستخدام مشط أنابيب براندل، وعلى أية حال فإن عملية المسح عملية دقيقة ويجب أن تتم بعناية.

في حال تم مسح حيز من قسم الاختبار ووجد أن هناك تغيرات كبيرة في الضغط الديناميكي يفضل أن نأخذ معدل وسطي لقيم الضغط الديناميكي، عند اكتمال عملية معايرة الضغط الديناميكي سيكون لدينا علاقة بين $(P_L - P_S)$ و q_J في قسم الاختبار بدون وجود النموذج.

5.6 تدرج الضغط الستاتيكي الطولي في قسم الاختبار

يجب معرفة تدرج الضغط الستاتيكي على طول قسم الاختبار من أجل إجراء التصحيحات الضرورية الخاصة بالطفو الأفقي، حيث يمكن الحصول على تدرج الضغط بواسطة مسبار ضغط ستاتيكي يتم تحريكه على طول قسم الاختبار من المدخل وحتى المخرج وقراءة قيم الضغط الستاتيكي.

6.6 قياس الضغط الستاتيكي لدارة القناة

يتم قياس الضغط الستاتيكي على طول دارة القناة لحساب انخفاض الضغط في كل جزء من أجزاء القناة ومقارنتها مع الحسابات النظرية، حيث من الممكن مثلاً توصيل مانومتر مضاعف متعدد الاستعمالات مع ثقوب في الجدار لمعرفة توزع الضغط في قسم ما من أقسام القناة الهوائية. الشكل *(a7.6)* يبين توزع الثقوب لمسابير الضغط الستاتيكي على طول النفاثة.

7.6 قياس الضغط الديناميكي

يتم قياس الضغط الديناميكي عادة في مناطق مختارة من قسم الاختبار بوسائل قياس معروفة مثل أنبوبة براندل، ثم يتم حساب السرع المكانية من العلاقة التالية:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot q}{\rho}} \qquad (8.6)$$

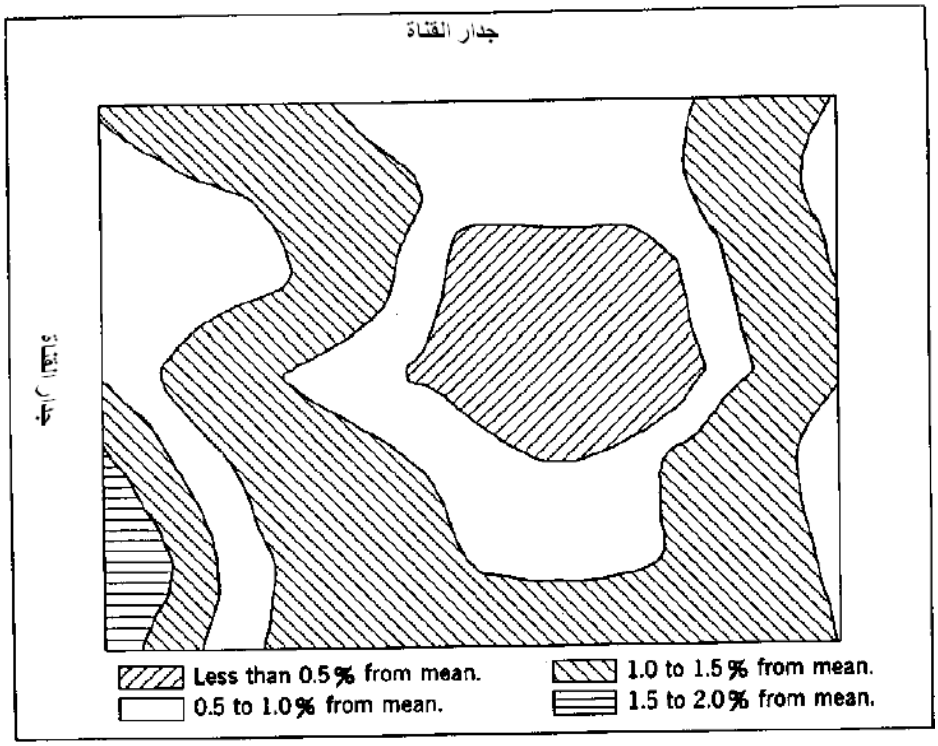
فيما بعد يتم تمثيل السرع المحسوبة أو قيم الضغوط الديناميكية بيانياً، حيث يجب أن يكون التغير في قيمة الضغط الديناميكي في الحيز العامل الذي يشغله النموذج أقل من *0.5 %* من القيمة الوسطية أو *0.25 %* في مخطط السرع. الشكل *(8.6)* يوضح توزع الضغط الدينامكي في قسم اختبار مستطيل الشكل.

يعزى السبب في تغير قيم السرع عادة إلى وجود مناطق انفصام للجريان يجب البحث عنها وتصحيحها أو إلى عدم تركيب ريش التوجيه في الأكواع بشكل صحيح، إذا كان تغير قيم السرعة له شكل حلقي فإن السبب غالباً هو المروحة، وهنا يجب تركيب مناخل إضافية في حجرة استقرار الجريان لتصحيح هذه المشكلة والشكل *(9.6)* يوضح أثر المناخل في تصحيح توزع السرعة في قسم الاختبار.

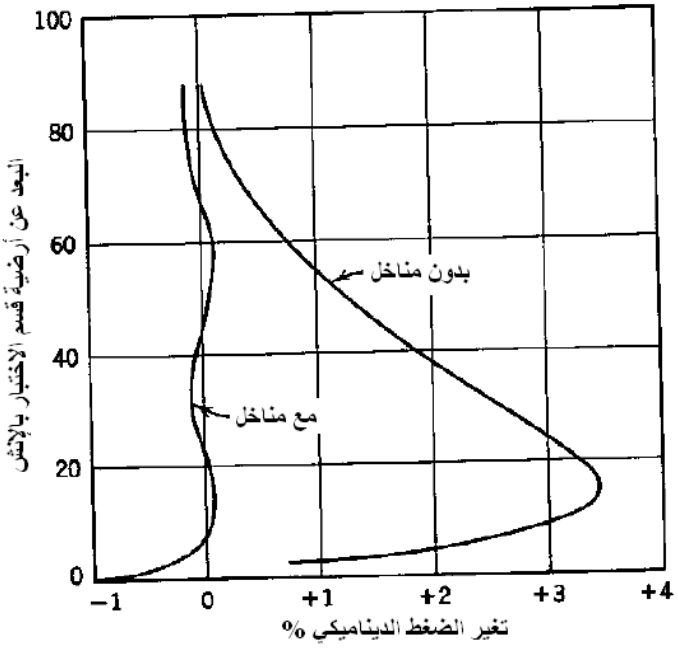
8.6 قياس مستوى الضجيج

في الوقت الحاضر تستخدم الأقنية الهوائية تحت الصوتية من أجل الاختبارات الأيروديناميكية المتعلقة بالضجيج، لذا من الواجب أن تتم معايرة الضجيج المنبعث من القناة باستخدام أجهزة خاصة لقياس الضجيج حيث يوجد ميكروفونات خاصة لعملية القياس.

أهم مصادر الضجيج في القناة صوت جريان الهواء القادم من النفاثة في حالة قسم اختبار مفتوح، إضافة إلى صوت محرك المروحة، والضجيج الذي يصدره جهاز التحكم بسرعة المروحة *Variable Frequency Driver (VFD)*، والضجيج الصادر من المروحة نفسها *[30]*.



الشكل *(8.6)*: مثال عن توزع الضغط الديناميكي في قسم الاختبار *[1]*.



الشكل *(9.6)*: تأثير المناخل على توزع السرعة في قسم الاختبار *[1]*.

9.6 نظم البيانات في الأقنية الهوائية

جودة ومزايا نظام البيانات الخاص بالقناة له تأثير كبير على استخدام القناة والاستفادة منها. يعمل النظام على تحويل القيمة الفيزيائية المقاسة إلى صيغة رقمية يتم تخزينها. بشكل مبدئي سوف نراجع الخطوات التي تنفذ بشكل يدوي ثم سنتبع

نفس الخطوات بنظام تماثلي – رقمي، فمثلاً العملية اليدوية للحصول على سرعة الهواء من قياسات أنبوبة براندل ستكون على الشكل الآتي:

1. توصيف أنابيب المانومتر الموصولة مع أنبوبة براندل.
2. قراءة ارتفاعات السائل في الأنابيب.
3. كتابة القراءات التي حصلنا عليها على ورقة خاصة.
4. عمل الحسابات اللازمة للحصول على السرعة.
5. تسجيل النتائج.
6. حفظ النتيجة النهائية بطريقة تجعل من المكن بسهولة الرجوع إليها عند الحاجة.

هذه بالضبط نفس الخطوات التي يتم عملها بواسطة نظام البيانات، أولاً يجب تحديد البارامتر المطلوب، إذا أردنا قياس الضغط فإنه يجب أن يتعرف نظام البيانات على المنافذ الموصولة لقياس الضغط، هذا التعريف عن طريق برنامج مناسب هو نفس خطوة توصيف أنابيب المانومتر، عملية التعريف بشكل يدوي يمكن أن تكون مملة وعرضة للخطأ عندما يتم تسجيل عدد كبير من الضغوط، لذا تم إيجاد برامج خاصة لهذه العملية.

الخطوة التالية هي قراءة القيمة والتي هي ليست بنفس سهولة قراءة ارتفاع السائل في أنبوب المانومتر، حيث أن هناك محولات تولد إشارات كهربائية تعتمد على قيمة البارامتر الفيزيائي، الإشارة يمكن أن تأخذ أشكالاً مختلفة، مثل أن تكون تغير في التيار أو فرق الكمون أو المقاومة، مستوى الإشارة منخفض بشكل عام ويحتاج لتضخيم، المضخمات يجب أن يكون دخلها عبارة عن فرق كمون لذا يجب أن تعمل بعض المحولات على تحويل القيمة الفيزيائية المقاسة إلى فرق كمون ويتم عمل ذلك بأجهزة خاصة لتصفية الإشارة مناسبة لنوع جهاز القياس المستخدم.

الإشارة الكهربائية القادمة من المحول تتألف من قسمين: قسم الإشارة الذي هو تابع بشكل مباشر للبارامتر الذي يتم قياسه وقسم آخر غير تابع للبارامتر الذي يتم قياسه وهو التشويش الذي يمكن أن يكون سببه كهربائي أو ميكانيكي أو أيروديناميكي، عموماً يمكن استخدام أجهزة تصفية رقمية أو تماثلية لتحسين نتائج القياس بإزالة التشويش.

فرق الكمون أو الخرج القادم من المضخمات وأجهزة التصفية يمثل قيمة الضغط أو البارامتر الذي يتم قياسه، لاستخدام هذه القيمة في الحسابات يجب أن يتم التعبير عنها برقم ثنائي أي يجب أن تأخذ شكل رقمي ***digital***، ويتم تحقيق ذلك باستخدام محول خاص يعمل على تحويل الصيغة التماثلية إلى الشكل الرقمي ***Analog to Digital Converter ADC*** *[41,1]* والذي خرجه عبارة عن رقم ثنائي، الرقم الثنائي الناتج يتم نقله إلى جهاز حاسب آلي حيث يتم تخزينه وإجراء الحسابات المطلوبة عليه.

10.6 الخلاصة والاستنتاجات

لا يمكن إجراء اختبارات ذات وثوقية في أي قناة هوائية بدون إجراء اختبار ومعايرة لها، وقد أوردنا في هذا الفصل أهم الاختبارات التي يجب عملها للتأكد من وثوقية النتائج المأخوذة من القناة، كما تعرضنا لبعض الأجهزة التي يتم استخدامها في عملية الاختبار والمعايرة.

لقد أشرنا في بداية هذا الفصل إلى أن عملية الاختبار والمعايرة تقوم بها شركات مختصة تقوم بمنح شهادة وثوقية للقناة الهوائية بعد الانتهاء من عملية المعايرة، في حالتنا من الممكن أن تقوم جامعات ألمانية تربطنا بها علاقات علمية بعملية المعايرة بعد الانتهاء من تصنيع القناة الهوائية. في الفصل القادم سنتطرق لأهم أجهزة القياس المطلوبة للاستفادة من القناة.

الفصل السابع
التجارب والاختبارات الممكن إجراؤها

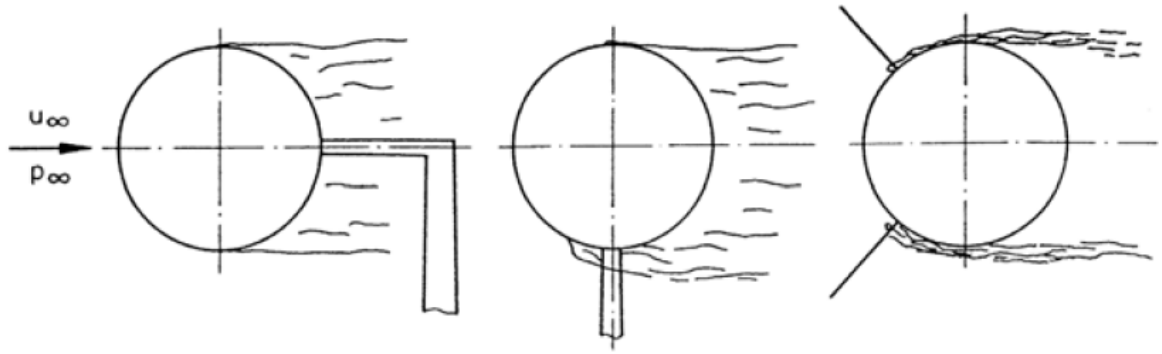
1.7 أمثلة عن التجارب والاختبارات الممكن إجراؤها في القناة الهوائية

1.1.7 قسم اختبار مفتوح

1. تجارب واختبارات على نماذج سيارات لدراسة تأثير شكل المركبة على مقاومة الهواء وبالتالي استهلاك الوقود.
2. تجارب واختبارات على نماذج لعنفات ريحية لدراسة الجريان عبر العنفة وتأثير شكل الريش وبروفيلاتها على الاستطاعة المولدة من العنفة.
3. تجارب واختبارات في مجال أيروديناميك الأبنية.
4. تجارب واختبارات متنوعة يمكن أن تطلب من مؤسسات القطاع الصناعي العام والخاص.

2.1.7 قسم اختبار مغلق

1. قياس معامل المقاومة لكرة، في هذه التجربة يمكن ملاحظة تغير معامل المقاومة مع عدد رينولدز، تأثير شدة الاضطراب وخشونة سطح الكرة. يجب الانتباه إلى أن تثبيت الكرة يجب أن يكون في منطقة الركود حتى لا تتأثر عملية القياس *[2]* كما في الشكل *(1.7)*.



الشكل*(1.7)*: كيفية تثبيت الكرة في قسم الاختبار *[2]*.

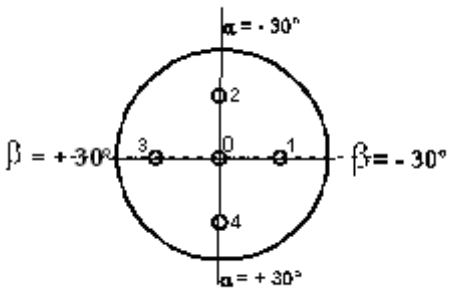
2. توزع الضغط على جناح حامل *[44]*: يتم قياس توزع الضغط على بروفيل جناح ذي امتداد محدود. الهدف من هذه التجربة هو إظهار كيفية تحديد قوة الرفع وعزم التدوير ***pitching moment*** عن طريق قياس توزع الضغط، وتأثير زاوية الورود على توزع الضغط، وتحري ظاهرة انفصام الجريان *[2]*.
3. قياس القوى الأيروديناميكية المؤثرة على جناح حامل *[2]* وتأثير الطبقة الحدية.
4. معايرة بعض أجهزة القياس مثل المسبار خماسي الثقوب.
5. التجارب والاختبارات المتعلقة بتحسين أداء حساسات التدفق الكتلي.
6. تجارب واختبارات متنوعة يمكن أن تطلب من مؤسسات القطاع الصناعي العام والخاص.

2.7 أجهزة القياس المطلوبة

1.2.7 المسبار خماسي الثقوب

يستخدم المسبار خماسي الثقوب لتحديد قيمة السرعة واتجاهها ضمن مجال زاوي لزاوية الورود α وزاوية الانحراف β مقداره $\alpha, \beta = \pm 30^{\circ}$ *[49,42]*.

رأس المسبار له شكل أسطواني ومقدمته مخروطية الشكل تحتوي على خمسة ثقوب كما في الشكل *(2.7)* أما جسم المسبار فيتكون من خمس أنبوبات متزايدة القطر كل منها موصول مع أحد الثقوب الموجودة في رأس المسبار الشكل *(3.7)*، وظيفة الأنابيب نقل قيم الضغط التي يتحسسها رأس المسبار إلى جهاز ماسح ومعالج ضغط ***Scanivalve*** موصول مع حاسب مزود ببرنامج خاص من أجل حساب قيمة السرعة واتجاهها في نقطة القياس بدلالة فروق الضغوط المقاسة كما يعمل البرنامج على تحليل شعاع السرعة لمركباته وتمثيل النتائج بيانياً *[49]*، ولإجراء عملية القياس باستخدام المسبار خماسي الثقوب يتم تثبيته على حامل يتحرك باتجاه المحاور الثلاثة.



الشكل *(2.7)*: ترقيم ثقوب رأس المسبار *[49]*

قبل استخدام المسبار يجب أن تتم معايرته *[49,42]*، حيث يتم وضعه في قناة هوائية في جريان غير مشوش سرعته معلومة واتجاهها معلوم ثم تقاس قيم الضغوط التي تتحسسها الثقوب الموجودة على رأس المسبار $P_{0...4}$ الموصولة مع ماسح ومعالج ضغط في عدد من نقاط القياس ناتجة عن تغيير كل من زاوية الورود α وزاوية الانحراف β بقيمة محددة، بعد ذلك يتم تحليل نتائج القياس ومعالجتها بالحاسوب، ونتيجة لذلك يتم تحديد سطح المعايرة، الشكل *(4.7)* يوضح سطح المعايرة لمسبار خماسي الثقوب، الذي يتضمن قيم معامل زاوية الورود K_α ومعامل زاوية الانحراف K_β المعرفين بالعلاقتين:

$$K_\alpha = \frac{P_4 - P_2}{\Delta P} \quad (1.7)$$

$$K_\beta = \frac{P_3 - P_1}{\Delta P} \quad (2.7)$$

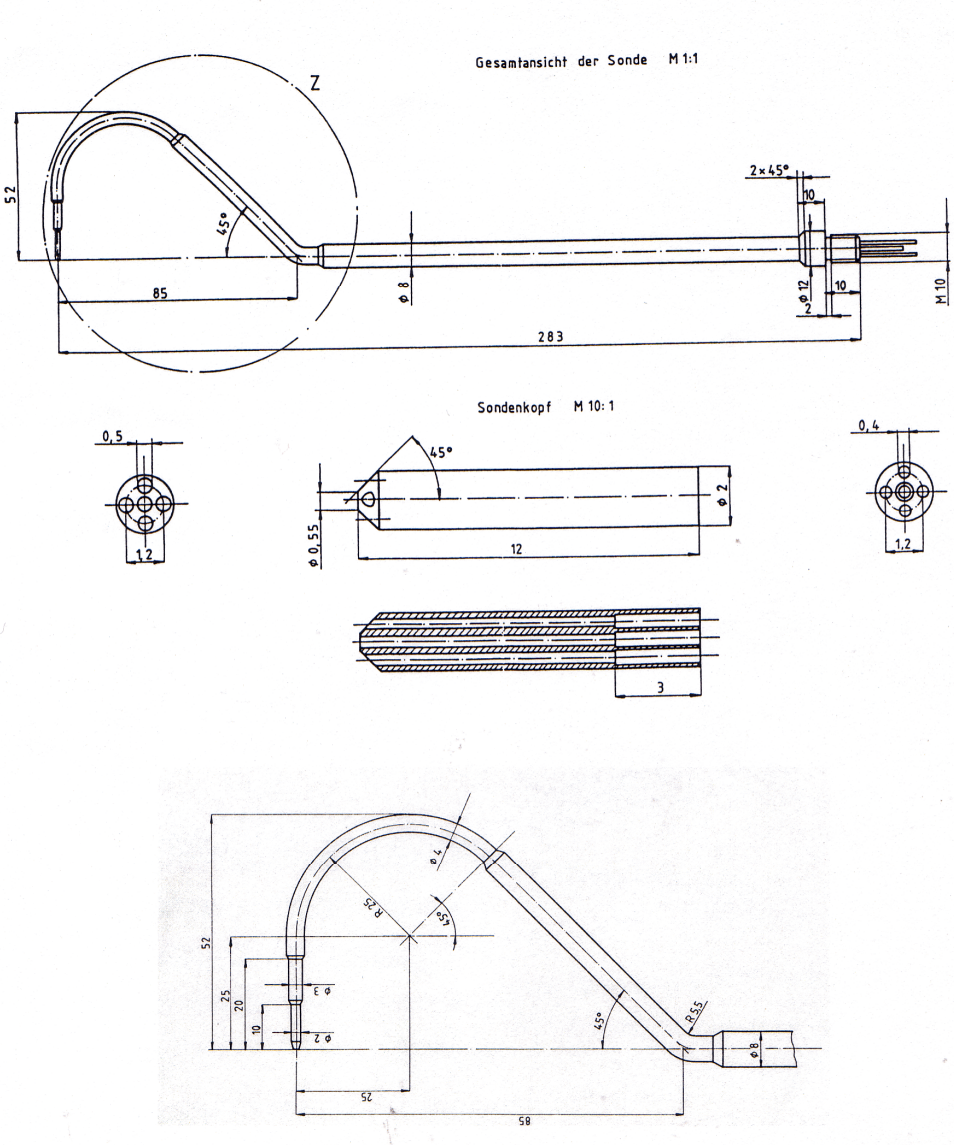
حيث $(P_4 - P_2)$ فرق الضغط بين الثقبين المتقابلين *2* و *4*، $(P_3 - P_1)$ فرق الضغط بين الثقبين *1* و *3* لرأس المسبار، ΔP فرق الضغط المتعلق بقيم الضغوط الملتقطة من الثقوب الخمسة وفق العلاقة:

$$\Delta P = \left[\frac{1}{5} \sum_{i=0}^{4} \left(P_i - \frac{\sum_{i=0}^{4} P_i}{5} \right)^2 \right]^{0.5} + \left[P_0 - \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{4} \right] \quad (3.7)$$

وبدلالة ΔP يتم حساب القيم اللابعدية لكل من الضغط الكلي والستاتيكي من العلاقتين:

$$K_{Ps} = \frac{P_0 - P_S}{\Delta P} \quad (4.7)$$

$$K_{Pt} = \frac{P_0 - P_t}{\Delta P} \quad (5.7)$$



الشكل *(3.7)*: شكل وأبعاد مسبار ضغط خماسي الثقوب *[49]*.

حيث P_0 الضغط الملتقط من الثقب *0*، P_s الضغط الستاتيكي، P_t الضغط الكلي الذين يتم قياسهما بإحدى وسائل قياس الضغط المعروفة.

عند وضع المسبار في حقل الجريان الشكل فإنه يقيس قيم الضغوط $P_{0...4}$ في نقطة القياس، من هذه القيم يمكن حساب كل من K_α و K_β. بالعودة إلى منحني المعايرة يمكن تحديد كل من الزاويتين α و β المقابلتين لقيمة كل من K_α و K_β في نقطة القياس وكذلك قيمة K_{Ps} و K_{Pt} ومن العلاقتين *(4.7)* و *(5.7)* وقياس P_0 يمكن تحديد كل من الضغط الكلي والستاتيكي حسب العلاقتين التاليتين:

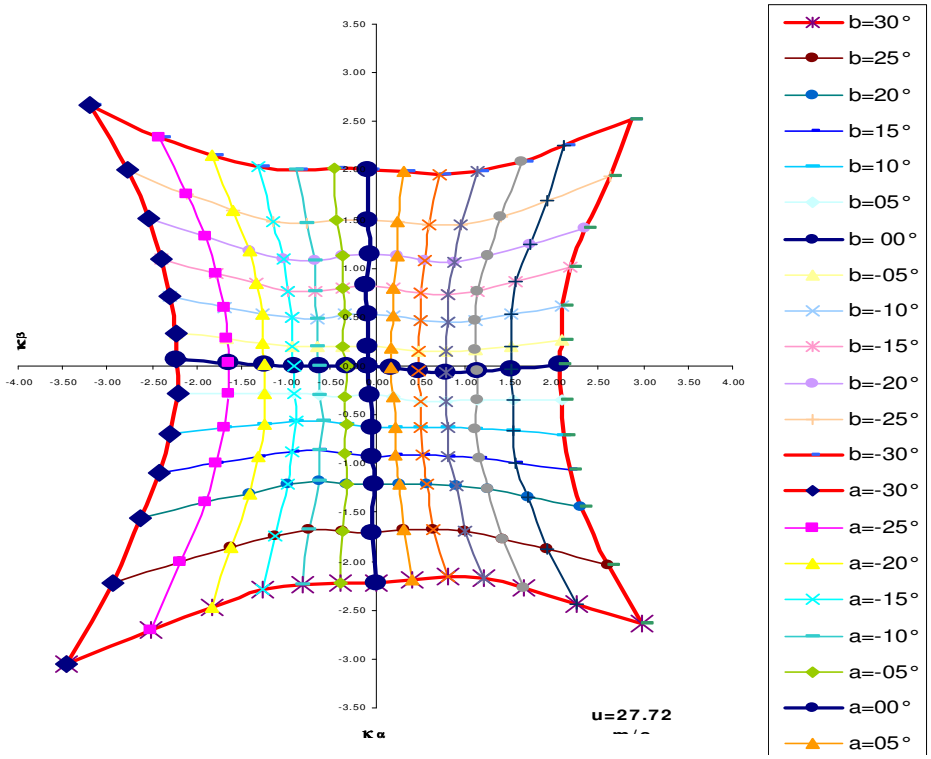
$$p_t = p_0 - K_{pt} \cdot \Delta p \quad (6.7)$$

$$p_s = p_0 - K_{ps} \cdot \Delta p \qquad (7.7)$$

وبالتالي يمكن حساب السرعة من العلاقة:

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \qquad (8.7)$$

يتم تحليل شعاع السرعة المكانية إلى مركباته w,v,u. ومن مسح كامل حقل الجريان يتم تحديد حقل السرعة وتمثيله بيانياً.



الشكل *(4.7)*: سطح المعايرة لمسبار خماسي الثقوب عند سرعة جريان $V_\infty = 27.72\ m/s$ *[49]*.

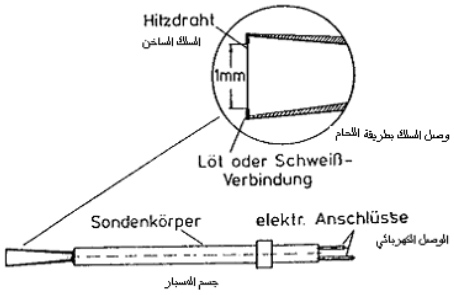
من الجدير بالإشارة أنه يتوفر في مخبر ميكانيك السوائل بكليتنا مسبار خماسي الثقوب قام بتصنيعه ومعايرته د. يحيى كشكول من خلال إعداد أطروحة الماجستير *[86]* بالتعاون مع جامعة ميونخ التقنية وبإشراف مشترك من أ.د.م انطانيوس عقل وأ.د.م بوريس لاشكا.

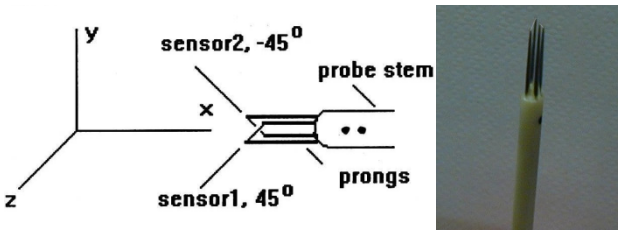
2.2.7 مسبار السلك الساخن

يستخدم مسبار السلك الساخن لقياس مركبات السرعة وتذبذباتها في حقل الجريان *[49,47]*، حيث يتم تثبيت سلك رفيع وصغير جداً مصنوع من التنغستين بطول $1mm$ وقطر $5\,\mu m$ على مسندين في رأس المسبار، الشكل *(5.7)*، ويوصل مع دارة كهربائية ممكن تغذيتها بواسطة مدخرة الشكل *(a6.7)*. وتتألف من جسر واتستون M من أجل قياس المقاومة الكهربائية للمسبار R_H ومن مقاومة متغيرة R لتعيير شدة التيار الكهربائي I_e المار بالمسبار ومن مقياس أمبير A. عند وضع السلك الذي يتم تسخينه كهربائياً في حقل الجريان سوف تنقص درجة حرارته ومن أجل استطاعة تسخين ثابتة تكون درجة حرارة السلك مقياساً لسرعة الجريان. من قوانين الانتقال الحراري (قانون كنج *King's law*) *[49]*:

$$I_e^2 \cdot R_H = (R_H - R_o)\left(A + B\sqrt{V}\right) \qquad (9.7)$$

حيث R_H مقاومة المسبار بعد التسخين، R_o مقاومة المسبار قبل التسخين، V سرعة الجريان، A و B ثوابت تختلف من مسبار لآخر وتتحدد قيمتها بتعيير المسبار عند سرعات معلومة في أقنية تعيير خاصة.





الشكل *(5.7)*: مكونات مسبار السلك الساخن *[3]*.

هناك طريقتان لتوصيل الدارة الكهربائية مع المسبار:

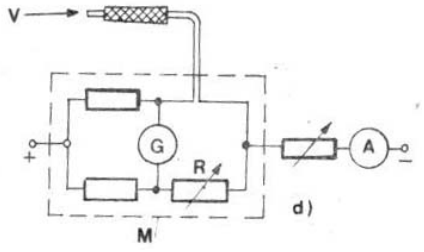
1. طريقة الجهد الثابت أو شدة التيار الثابتة *(CCA) $I = const$*.
2. طريقة درجة الحرارة الثابتة أو المقاومة الثابتة *(CTA) $R = const$*.

تتميز الطريقة الأولى أن دارة التوصيل بسيطة وتستخدم لقياس السرعات الصغيرة جداً، ولكن سيئتها أن عطالة التأشير تزداد مع ازدياد السرعة، وبالتالي تقل حساسية المسبار. وتكون فيها مقاومة المسبار R_H تابع للسرعة V حسب العلاقة *(9.7)*.

الطريقة الثانية تتطلب دارة توصيل أكثر تعقيداً الشكل *(b6.7)* وترتبط كمية الحرارة المنتقلة Q مع السرعة V وتغير درجة الحرارة ΔT بالعلاقة *[49]*:

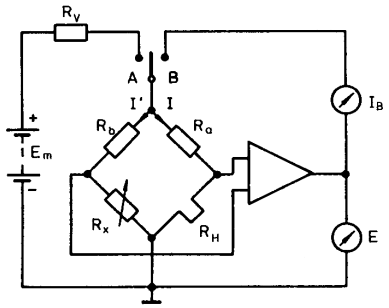
$$Q^{\bullet} = \left[A + B(\rho \cdot u)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot \Delta T \qquad (10.7)$$

حيث n,B,A ثوابت تختلف من مسبار لآخر وتتحدد قيمتها بتعيير المسبار عند سرعات معلومة، وتتميز هذه الطريقة أن حساسية تأشير المسبار لا تتأثر تقريباً بزيادة السرعة.



الشكل (*a6.7*): دارة بسيطة توضيحية لوصل مسبار السلك الساخن بطريقة *(CCA) [49]*

M جسر القياس ، G مقياس جلفاني ، A مقياس امبير، R مقاومة متغيرة



الشكل *(b6.7)*: دارة بسيطة توضيحية لوصل مسبار السلك الساخن بطريقة *(CTA) [49,47]*

R_x مقاومة متغيرة لتعيير شدة التيار الكهربائي I المار بالمسبار ، R_H مقاومة السلك ،E_m منبع تغذية ، A,B مفتاح قلاب R_V مقاومة لضبط قيمة التيار الكهربائي، E مقياس الجهد ، I_B مقياس أمبير

ميزات مقياس السلك الساخن *[47]*:

- يقيس السرعات المنخفضة التي من مرتبة $10\ cm\backslash s$ حتى مجال السرعات فوق الصوتية.
- الدقة العالية في القياس.
- يقيس المركبات الثلاثة للسرعة.
- يعطي معلومات لحظية عن السرعة.

من الجدير بالإشارة أنه يتوفر في مخبر ميكانيك السوائل بكليتنا مسبار سلك ساخن *CTA* لقياس مركبة واحدة للسرعة. ويمكن تطوير هذا النظام من أجل قياس مركبات السرعة الثلاثة.

3.2.7 مقياس السرعة الليزري الدوبلري

قدم كومينز *Cummins* و يه *Yeh* في عام *1964* أول جهاز دوبلري ليزري. الجهاز الذي يستخدم شعاعاً مزدوجاً في الوقت الراهن هو من ابتكار ليمان *Lehmann* وفوم شتاين *vom Stein* وبفايفر *Pfeifer [42]* في هذه التركيبة يستخدم شعاعا ليزر يتقاطعان بزاوية معينة ليشكلا حجم القياس والضوء المتبعثر من هذين الشعاعين يجمع بواسطة مستقبل إشارة *[42]*. تستخدم هذه التقنية على نطاق واسع في قياسات السرعة النقطية في الجريان ضمن سائل مملوء بجزيئات تتبع *[72,49]* يتراوح قطرها في حالة الهواء بين $1-10\mu m$ *[47]*. بعض الميزات الهامة لهذه التقنية التي تميزها عن المقاييس التقليدية التي تعتمد على المسابير *[47,42]* تتلخص بما يلي:

- عدم تشويش الجريان بشكل مباشر.
- لا يحتاج إلى معايرة.
- مجال القياس يتراوح بين *0* وحتى السرعات فوق الصوتية.
- الدقة العالية.

المكونات الأساسية لنظام القياس هي *[47]*:

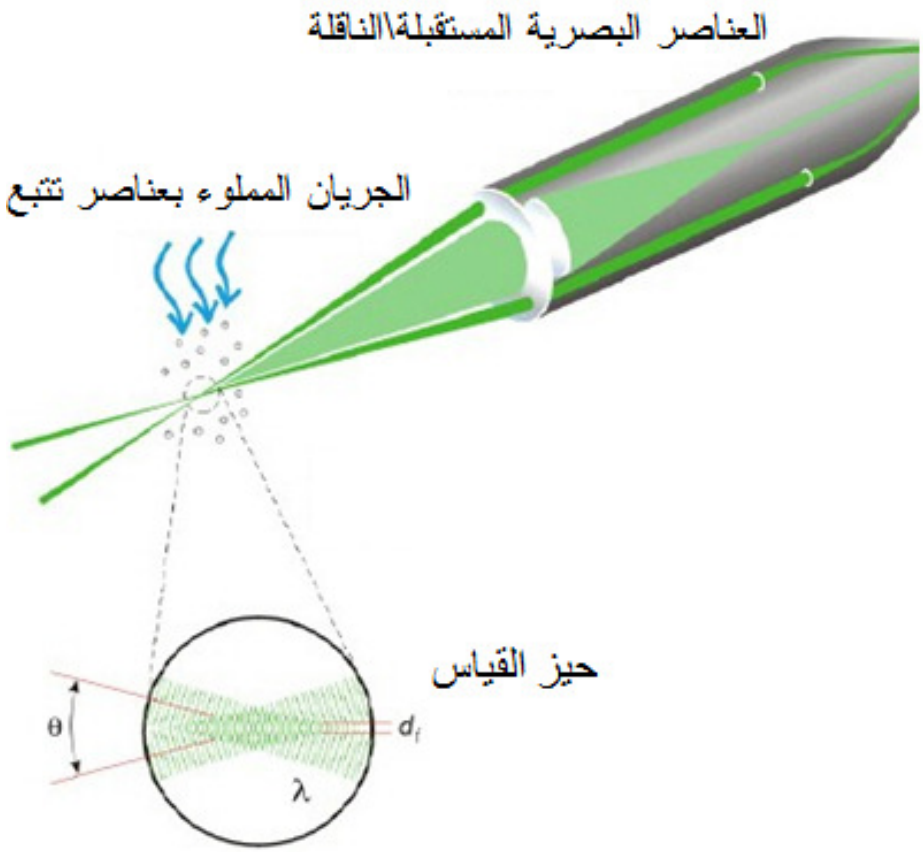
- منبع ليزري.
- العناصر البصرية الناقلة والتي تضم مقسم شعاع وعدسة مركزة.

- العناصر البصرية المستقبلة والتي تضم عدسة مركزة، مصفي إشارة *interference filter* ومستقبل إشارة.
- معالج ومقوم إشارة.
- حاسوب مع برمجيات مناسبة لتمثيل النتائج.

لتقسيم الشعاع الليزري يتم استخدام عدسة براغ *Bragg cell* والتي تصنع من الكريستال الزجاجي والشكل *(7.7)* يوضح شكل هذه العدسة، حيث يدخل إليها شعاع ويخرج منها شعاعان متساويا الشدة يتم تجميعهما بواسطة ألياف بصرية ليصلا إلى العناصر البصرية الناقلة. الشعاعان المتوازيان الخارجان من الألياف والعناصر البصرية الناقلة يتم تجميعهما بواسطة عدسة تجميع ليتقاطعا في حيز القياس *[47]* كما هو موضح في الشكل *(8.7)*.



الشكل *(7.7)*: عدسة براغ التي تستخدم لتقسيم شعاع الليزر *[47]*.



الشكل *(8.7)*: توضيح حيز القياس بتقنية *LDA [47]*.

شدة الضوء ستتغير بسبب التداخل بين الأشعة الليزرية، وهذا يولد مستويات متوازية من الشدة الضوئية العالية أو ما يسمى بالأهداب *fringes*، المسافة بين الأهداب df تحدد بمعرفة طول موجة شعاع الليزر λ والزاوية بين الأشعة θ *[47]*:

$$df = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} \qquad (11.7)$$

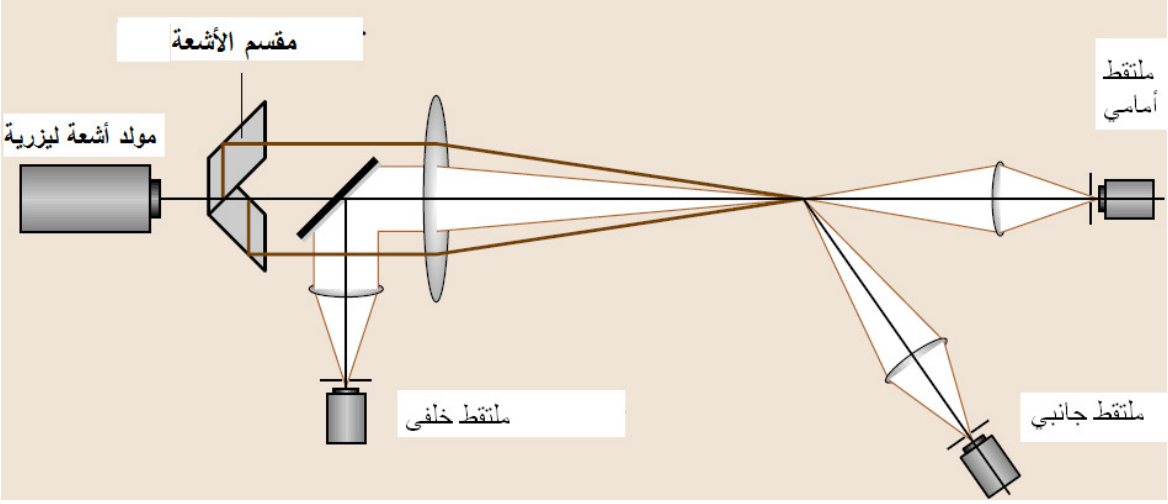
كل جزيئة تمر سوف تشتت ضوء متناسب مع شدة الضوء المكاني، البيانات اللازمة لحساب سرعة الجريان تنتج من الضوء المشتت عن جزيئات صغيرة مزروعة ومحمولة ضمن السائل عندما تتحرك في منطقة القياس، الضوء المشتت له تردد دوبلري متناسب مع مركبة السرعة العمودية على منصف الزاوية المتشكلة بين شعاعي الليزر *[47]*.

الضوء المشتت يتم تجميعه بواسطة عدسة مستقبلة ويوجه إلى مستقبل إشارة *photo-detector*، ولكن قبل ذلك يمر على عنصر تصفية وتقويم خاص *interference filter* يعمل على مرور طول الموجة المطلوب فقط إلى مستقبل الإشارة مما يؤدي لإزالة التشويش *[47]*.

يعمل مستقبل الإشارة على تحويل شدة الضوء المتذبذبة أو التأثير الدوبلري إلى إشارة كهربائية جيبية، التأثيرات الدوبلرية يتم تصفيتها وتضخيمها في معالج الإشارة الذي يحدد تردد كل جزيئة f_D. المسافة بين الأهداب df تعطي معلومات عن المسافة التي قطعتها الجزيئة، والتردد الدوبلري f_D يعطي معلومات عن الزمن $t = 1/f_D$، وبما أن السرعة تساوي المسافة مقسومة على الزمن فيمكن حساب السرعة بالعلاقة:

$$V = df \cdot f_D \qquad (12.7)$$

والشكل *(9.7)* يوضح خيارات توضيع مستقبل الإشارة.

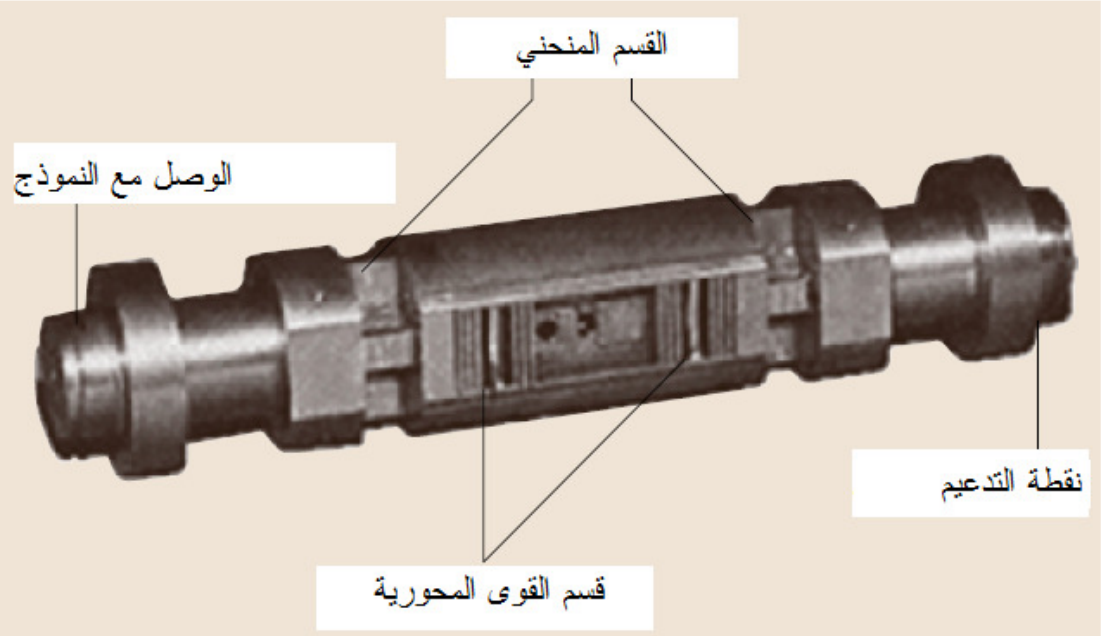


الشكل *(9.7)*: خيارات توضيع مستقبل الإشارة في تقنية قياس السرعة بالمقياس الليزري الدوبلري *[42]*.

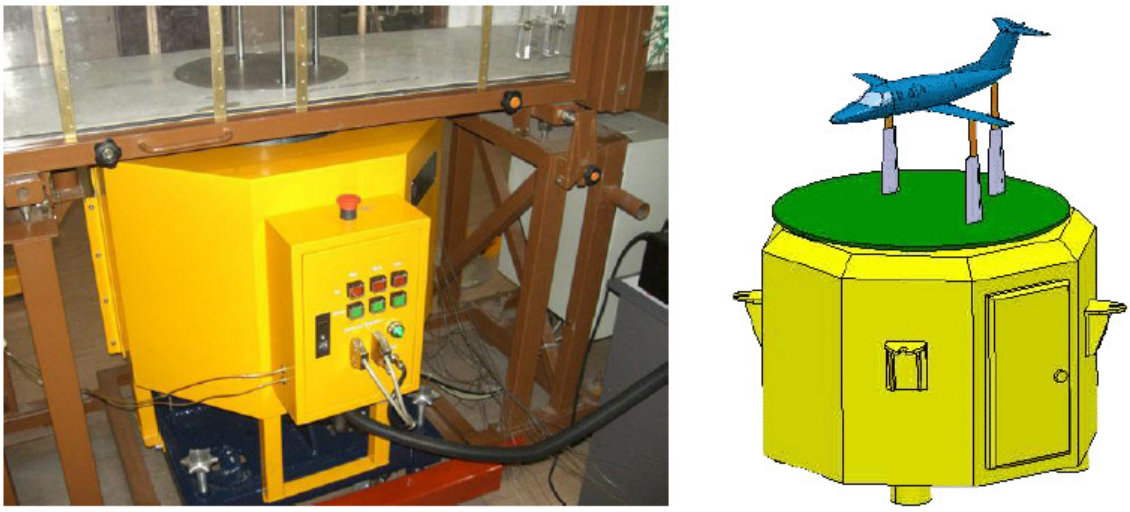
4.2.7 ميزان القوى والعزوم

تصنف موازين القوى والعزوم بحسب عدد القوى والعزوم التي يمكن أن تقيسها حيث يمكن أن نجد ميزان قوى ثلاثي المركبات وفي هذه الحالة فإنه يقيس مركبات القوى على الإحداثيات الثلاثة، وهناك ميزان سداسي المركبات يقيس ثلاث قوى وثلاثة عزوم أيضاً، كما يمكن تصنيفها بحسب مكان تركيبها، إذا تم تركيبها داخل قسم الاختبار فعندئذ يشار إليها بالموازين الداخلية *internal balances* الشكل *(10.7)*، وإذا تم تركيبها خارج قسم الاختبار يشار إليها بالموازين الخارجية *external balances* الشكل *(11.7)*.

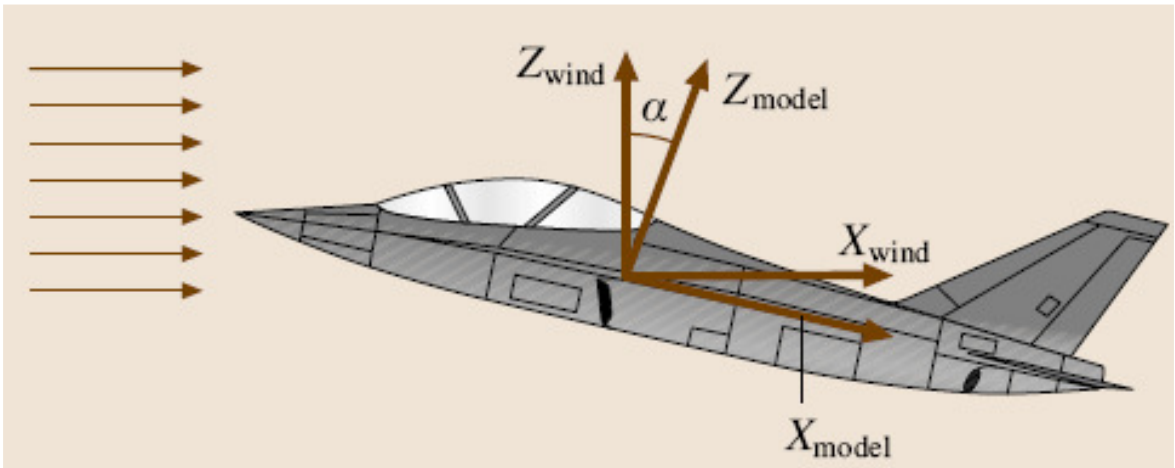
وظيفة الميزان هي قياس الأحمال الأيروديناميكية التي تؤثر على النموذج أو على أحد مكوناته، تستخدم كلمة الأحمال لتوصيف كل من القوى والعزوم المطبقة، حيث يوجد ست مركبات مختلفة للأحمال الأيروديناميكية وهي ثلاث قوى باتجاه المحاور الديكارتية وثلاثة عزوم حول هذه المحاور، يتم قياس هذه المركبات بنظام إحداثيات محدد ممكن أن يكون منسوباً للنموذج أو للقناة الهوائية، كما في الشكل *(12.7)*.



الشكل *(10.7)*: ميزان داخلي *[42]*.

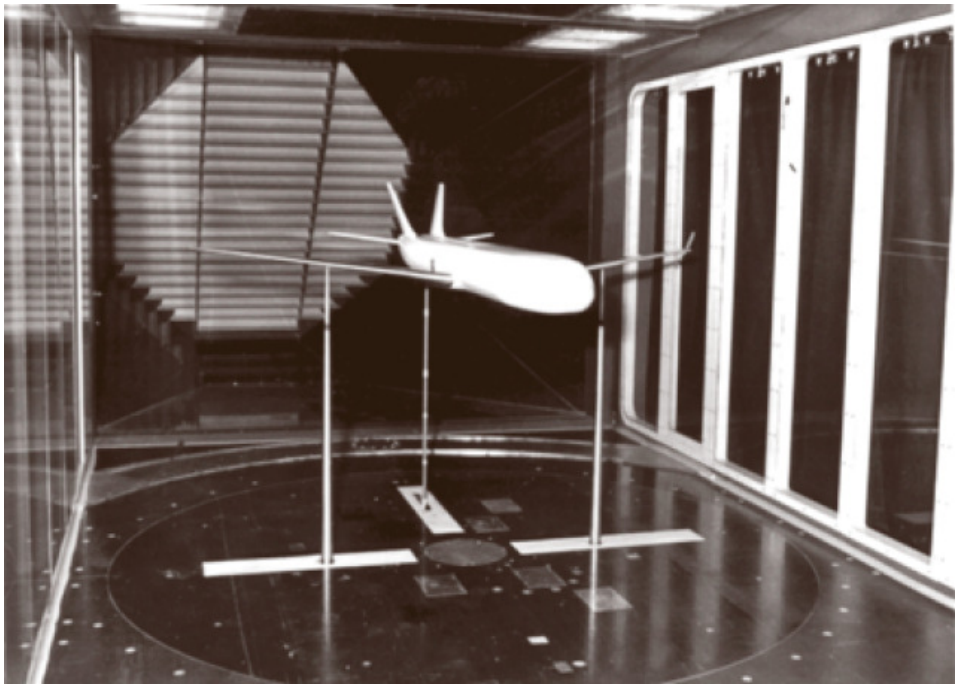


الشكل *(11.7)*: ميزان قوى خارجي *[80]*.

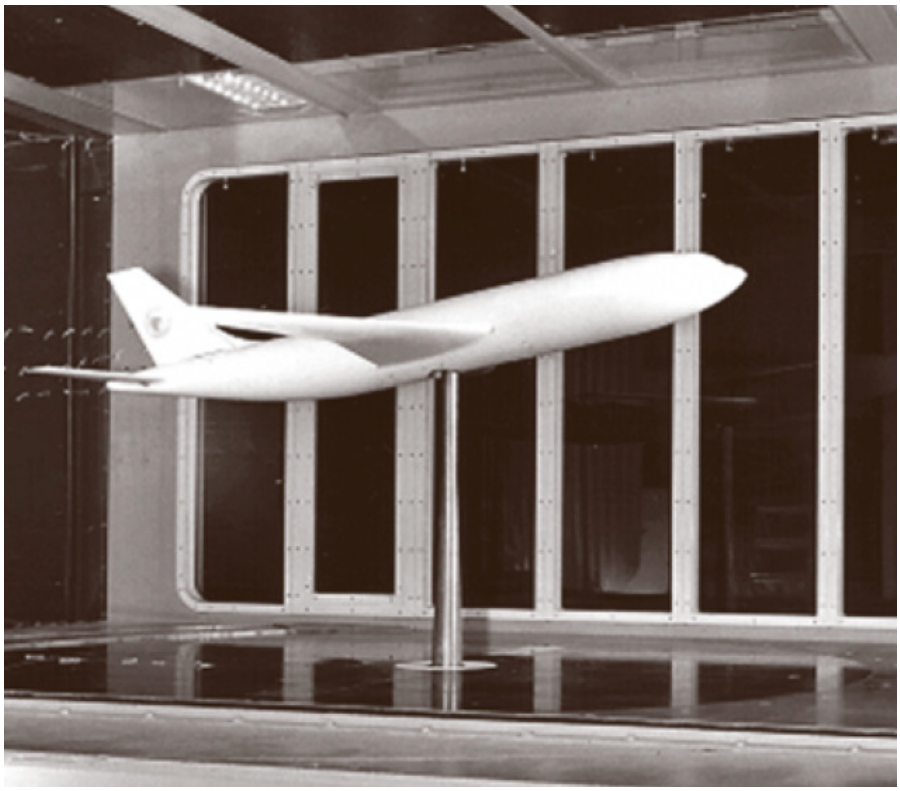


الشكل *(12.7)*: المحاور الإحداثية في حال اختيارها بالنسبة للنموذج أو للقناة *[42]*.

عند استخدام الموازين الخارجية يوجد إمكانيات مختلفة لتوصيلها مع النماذج، على سبيل المثال يمكن تدعيم نموذج طائرة بثلاثة دعامات كما في الشكل *(13.7)* أو دعامة مركزية واحدة كما في الشكل *(14.7)*، من أجل السيارات والمباني يتم استخدام أكثر من ثلاثة دعامات، نظام التدعيم الخاص بالميزان الخارجي يجب أن يقدم احتمالات متعددة للتثبيت.



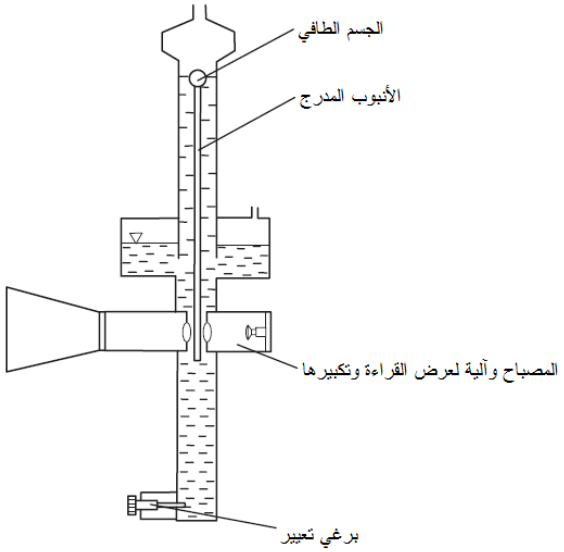
الشكل *(13.7)*: تدعيم النموذج بثلاثة دعامات *[42]*.



الشكل *(14.7)*: تدعيم النموذج بدعامة مركزية *[42]*.

5.2.7 ميكرومانومتر بيتس

يستخدم ميكرومانومتر بيتس لقياس الضغوط الصغيرة جداً أو فروقها بدقة عالية، الشكل *(15.7)* يوضح ميكرومانومتر بيتس الذي يعمل بطريقة مشابهة لعمل المانومترات بشكل حرف *U* لقياس فرق الضغط. التغير في ضغط السائل سوف يؤدي إلى تغير في وضعية الجسم الطافي وسوف يؤدي إلى تحركه ضمن أنبوب القياس بشكل متناسب مع قيمة فرق الضغط، وتحت الجسم الطافي يوجد أنبوب زجاجي مدرج، خلف هذا الأنبوب المدرج يوجد مصباح عندما يضيء سيعمل على تكبير القيمة حتى تتم قراءتها *[79,76]*.



الشكل *(15.7)*: ميكرومانومتر بيتس *[79]*.

تجدر الإشارة أنه يتوفر في مخبر ميكانيك السوائل في كليتنا جهاز ميكرومانومتر بيتس يحتاج فقط لعملية صيانة ليصبح جاهزاً للاستعمال.

6.2.7 مانومترات مضاعفة متعددة لقياس توزع الضغط الستاتيكي

يمكن باستخدام المانومتر قياس الضغط في نقطة من السائل كفرق بين قيمته وقيمة ضغط قياسي معروف وذلك بمعرفة فرق الارتفاع بين طرفي المانومتر *[78,3]*. في المانومترات المتعددة يوجد حوض تجميع ***sump*** له مساحة مقطع كبيرة مقارنة مع مساحة مقطع أنابيب المانومتر يكون فيه الضغط معروف، مستوى السائل في حوض التجميع يستخدم كمرجع ويستخدم عدد من الأنابيب يمكن أن يصل عددها إلى *200* أنبوب *[1]* مملوءة بسائل ذو كثافة محددة لتشكل المانومتر المتعدد الذي يمكن استخدامه لقياس الضغط في أكثر من نقطة واحدة بنفس الوقت مثل تحديد توزع الضغط على سطح نموذج ما تحت الاختبار *[78,1]*.

الشكل *(16.7)* يوضح مانومتراً متعدد الاستعمالات يتكون من *36* أنبوبة من صنع شركة ***TecQuepment*** لقياس توزع الضغط في نقاط محددة على النموذج في قسم الاختبار. في هذا المانومتر يتم استخدام الماء كسائل مقياس ويتم تزويده بلون لتسهيل أخذ القراءات، ويوجد مسطرة مدرجة مشتركة في المنتصف لقراءة ارتفاع السائل في الأنابيب، حيث يتم وصل كل أنبوب مع نقطة ما يراد معرفة الضغط فيها *[77]*.



الشكل *(16.7)*: مانومتر مضاعف متعدد الاستعمالات صنع شركة ***TecQuepment*** *[77]*.

3.7 الخلاصة والاستنتاجات

تطرقنا في هذا الفصل لأهم التجارب الممكن إجراؤها في القناة وأهم أجهزة القياس المطلوبة للقناة الهوائية والتي تضم المسبار خماسي الثقوب ومسبار السلك الساخن ومقياس السرعة الليزري الدوبلري وحيد البعد، وقد شرحنا مبدأ عمل كل منهم والدارة التي يتألف منها وأهم العلاقات الرياضية الناظمة لعمل كل منهم، حيث أنه بدون هذه الأجهزة لا يمكن الاستفادة من القناة الهوائية، لذا يجب تأمينها بعد الانتهاء من تصنيع القناة.

8. الخاتمة والاستنتاجات والاقتراحات المستقبلية

تركز الهدف الرئيس للبحث المشمول بهذه الأطروحة من جهة على الدراسة الأيروديناميكية للجريان خلال قناة هوائية تحت صوتية من النوع المغلق من طراز جوتنجن وإجراء الحسابات الأيروديناميكية وحساب الفواقد واستطاعة المروحة اللازمة لهذه القناة، ومن جهة ثانية على وضع المخططات التصميمية التنفيذية اللازمة لعملية التصنيع وفق القواعد والأصول التصميمية المعروفة لتصميم هذا النوع من الأقنية. وإضافة لذلك فقد تم بحث وتحري الإمكانات المتوفرة لتصنيع هذه القناة محلياً إما في ورشات الكلية أو في ورشات السوق المحلية وذلك للضرورة الماسة لوجود هذه القناة في مختبر ميكانيك السوائل في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق وبذلك يمكن توفير مبالغ طائلة مقارنة مع تكاليف شراء قناة مماثلة واستيرادها من خارج القطر.

تتألف الأطروحة من سبعة فصول وثلاثة ملاحق تتضمن باختصار شديد مايلي:

الفصل الأول بعنوان مقدمة وكرس لتوضيح مبررات اختيار موضوع الأطروحة وأهداف المشروع، وتم التطرق فيه للتطور التاريخي للأقنية الهوائية بدءاً من أول قناة تم بناؤها من قبل فرانسيس وينهام وحتى الأقنية الهوائية الموجودة حالياً في الجامعات ومراكز الأبحاث العالمية. كذلك سلطنا الضوء على تصنيف الأقنية الهوائية حسب سرعة الجريان داخل قسم الاختبار فيها وحسب الغرض من القناة.

ويعرض هذا الفصل نتائج الدراسة المرجعية المعمقة والتصورات التي توصلنا إليها من الاطلاع على مواصفات عدد من الأقنية الهوائية العاملة في عدد من الجامعات والمخابر البحثية والتي خلصنا بنتيجتها إلى اختيار وتحديد المؤشرات الأيروديناميكية والمواصفات الفنية والتقنية للقناة التي نريد دراستها وتصميمها وتحديد مخطط أولي لهذه القناة متضمناً الأبعاد والمكونات الرئيسة لها.

الفصل الثاني يتضمن الدراسة الأيروديناميكية التفصيلية لكل عنصر من عناصر القناة ابتداءً بقسم الاختبار ومروراً بالناشرات الأربع والأكواع وريش التوجيه المركبة بداخلها ونهاية بالنفاثة التي تسبق قسم الاختبار. إضافة لتوضيح القوانين والعلاقات الضرورية لحساب معامل الفقد لكل عنصر، حيث تم الاستناد إلى ثلاثة مراجع أساسية لوضع العلاقات اللازمة لحساب معامل الفقد، وقد تم إجراء الحسابات الأيروديناميكية اللازمة لحساب استطاعة المروحة المناسبة للقناة استناداً للمراجع الثلاثة، حيث لاحظنا وجود فرق واضح بين نتائج الطرق الثلاثة وقمنا بالتالي باختيار الحل الأفضلي حسب المرجع *[30]*.

الفصل الثالث مكرس لتصميم عناصر القناة الأساسية التي تشمل قسم الاختبار والناشرات، الأكواع وريش التوجيه والنفاثة حسب القواعد التصميمية المعروفة. وقد أولينا تصميم النفاثة اهتماماً خاصاً لما لها من تأثير كبير على مواصفات الجريان في قسم الاختبار حيث أنها القسم الأخير الذي يعبره الجريان قبل قسم الاختبار، وعليه فإن التصميم الجيد للنفاثة يضمن الحصول على السرعة المطلوبة داخل قسم الاختبار وبمعامل درجة الاضطراب المطلوبة وتحقيق الحصول على جريان منتظم لضمان وثوقية نتائج الاختبارات. لذا فقد قمنا بتصميم النفاثة حسب ثلاثة طرق مختلفة لاختيار الحل الأفضل منها واعتماده وذلك حسب الطريقة المتبعة في المرجع *[30]* مع اعتماد طول النفاثة حسب بورجر *[67]*.

الفصل الرابع يتضمن عرضاً لمراحل النمذجة والمحاكاة، ابتداءً من توليد الشبك الحسابي ووضع الشروط الحدية والابتدائية، وصولاً لمعالجة البيانات الرقمية الناتجة عن عملية النمذجة وذلك لأجل قيمة للسرعة تساوي *60 m/s* في قسم الاختبار للقناة الهوائية. كما قمنا بإجراء عملية نمذجة ومحاكاة من أجل التصاميم الثلاثة للنفاثة أي حسب طريقة بورجر، وطريقة

كثيري الحدود المتلاقيين وحسب معادلة جامعة روستوك. وقد أكدت النتائج أن تصميم النفاثة حسب بورجر *[67]* أو حسب طريقة كثيري الحدود المتلاقيين *[30]* أفضل من تصميمها حسب معادلة جامعة روستوك *[71]* وذلك حسب عدة معايير قمنا بوضعها كأساس لعملية المقارنة. كما أكدت النتائج أن تصميم القناة بشكل عام هو تصميم جيد لأننا حصلنا على جريان منتظم في قسم الاختبار وبمعامل درجة اضطراب قيمته *0.5 %*، كما تم التأكد من عدم وجود مناطق انفصام للطبقة الحدية في أي قسم من أقسام القناة.

الفصل الخامس يعالج كيفية تصنيع كل عنصر من عناصر القناة التي تشمل قسم الاختبار، الناشرات، الأكواع وريش التوجيه، قسم المروحة، المقطع الانتقالي، النفاثة والهيكل المعدني الحامل للقناة. وحددت خواص المادة التي نود تصنيع القناة منها وهي إما ستانلس ستيل بسماكة *3 mm*، أو صفائح فولاذية مغلفنة بسماكة *3 mm*، وبروفيلات فولاذية مفرغة للهيكل المعدني، كما قمنا بعرض أهم الورشات التي قمنا بزيارتها لبحث إمكانية تصنيع القناة محلياً، وتم تحديد الكلفة التقديرية لذلك.

الفصل السادس يعرض أهم القيم التي يجب التأكد منها لاختبار ومعايرة القناة بعد تصنيعها مثل انتظام الجريان وسماكة الطبقة الحدية وسرعة الجريان في قسم الاختبار والتحقق من عدم وجود مناطق انفصام في قسم الاختبار، علماً بأن عملية الاختبار والمعايرة تقوم بها شركات مختصة وتعطي شهادة للتأكد من وثوقية النتائج التي نحصل عليها.

الفصل السابع يوضح بعض التجارب الممكن إجراؤها في القناة وأجهزة القياس التي ننوي استخدامها لإجراء تجارب في القناة. وتم توضيح مبدأ القياس لعدد من هذه الأجهزة مثل: مسبار الضغط خماسي الثقوب، مسبار السلك الساخن ومقياس دوبلر الليزري وحيد البعد. هذه الأجهزة يتوجب شراؤها من شركات مختصة مثل شركة دانتك *Dantec* وذلك بعد بناء القناة. وتجدر الإشارة بأنه يتوفر لدينا في مخبر ميكانيك السوائل في الكلية مسبار خماسي الثقوب ونظام لمسبار السلك الساخن يجب تحديثه للاستفادة منه.

لقد أدرجت في نهاية الأطروحة ثلاثة ملاحق تتضمن مايلي:

- الملحق *A*: الحسابات الأيروديناميكية التفصيلية لمعامل الفقد لكل من عناصر القناة وصولاً إلى حساب الاستطاعة المطلوبة للمروحة وذلك حسب ثلاثة مراجع علمية اختصاصية، علماً أن القيمة النهائية لمعاملات الفقد مدرجة في متن النص، الفصل الثاني.
- الملحق *B*: المخططات التنفيذية لتصنيع عناصر القناة والهيكل المعدني الحامل لها.
- الملحق *C*: الكلفة التقديرية لتصنيع القناة محلياً ومقارنة النتيجة مع الأسعار التي حصلنا عليها في حال تم استيراد قناة مماثلة.

وختاماً نلخص أهم النتائج والاستنتاجات التي حصلنا عليها في نهاية العمل والمتمثلة بما يلي:

1. من خلال دراسة مرجعية معمقة لأهم المراجع العلمية الاختصاصية بموضوع البحث تم تحديد منطلقات التصميم وأسس الدراسة الأيروديناميكية للجريان عبر قناة هوائية تحت صوتية من النوع المغلق طراز جوتنجن.
2. تم اختيار المعطيات التصميمية والأيروديناميكية لقسم لاختبار من حيث شكل وأبعاد المقطع وإمكانية استخدامه مغلقاً أو مفتوحاً، وأيضاً من حيث السرعة الأعظمية المطلوبة ودرجة اضطراب الجريان، وذلك استهداءاً بمواصفات أقنية هوائية مماثلة في جامعات متعددة، ومن خلال تصورنا لإمكانات استخدام القناة لأغراض البحث العلمي الأساسي والتطبيقي. انطلاقاً من ذلك تم تحديد أشكال مكونات القناة وأبعادها الأساسية.

3. تم إعداد دراسة أيروديناميكية تفصيلية تناولت شرح وتوضيح أهم العوامل المؤثرة على مواصفات الجريان في قسم الاختبار وتضمنت الحسابات التفصيلية لفواقد الجريان لكل من مكونات القناة ومنها تم حساب خسارة الضغط الإجمالية والاستطاعة المطلوبة للمروحة ومحركها. وقد أجريت الحسابات وفق ثلاثة مراجع علمية مختلفة وتبين وجود فروق واضحة في نتائج الحسابات. وقد اخترنا ما ارتأيناه الأصح منها.
4. تم إنجاز المخططات التصميمية التفصيلية لجميع مكونات القناة إضافة للهيكل المعدني الحامل للقناة والتي يمكن اعتمادها كمخططات تنفيذية لتصنيع القناة.
5. نظراً لأهمية قسم النفاثة وتأثيرها على الجريان في قسم الاختبار فقد أولينا تصميمها اهتماماً خاصاً واعتمدنا على ثلاثة طرق مختلفة للتصميم حسب *[71,30,67]*، واخترنا التصميم الأفضلي وفقاً لنتائج نمذجة ومحاكاة الجريان في النفاثة بنظام ثلاثي البعد *3D*.
6. تم تصميم النفاثة باستخدام برنامج الأوتوكاد *AutoCAD* الأمر الذي يعني أنه يمكن تصدير التصميم لأي نوع من آلات التشغيل المؤتمتة، مثل الفارزة المؤتمتة، للحصول على تصنيع دقيق لنموذج خشبي للنفاثة يفي بمتطلبات التصميم الدقيقة نقوم فيما بعد بصب طبقة من الفيبرجلاس بسماكة مناسبة للحصول على النفاثة بشكلها النهائي.
7. يمكن تصنيع غالبية عناصر القناة بما فيه قسم النفاثة محلياً ولكن بعض العناصر مثل قسم المروحة والمناخل وخلايا عش النحل وريش التوجيه في الأكواع يفضل شراؤها من شركات مختصة.
8. تمت نمذجة ومحاكاة الجريان لكامل دارة القناة الهوائية وكأنها في **حالة تشغيل فعلي** وذلك باستخدام برنامج *Fluent*، كما قمنا بإجراء نمذجة ومحاكاة لثلاثة تصاميم مختلفة للنفاثة لاختيار التصميم الأفضلي منها.
9. إن نتائج النمذجة والمحاكاة تؤكد:

- أن التصميم الذي توصلنا إليه هو تصميم جيد قابل للتصنيع، حيث حصلنا على مواصفات الجريان المحددة مسبقاً في قسم الاختبار من حيث السرعة، وانتظام الجريان ودرجة الاضطراب.
- أنه لا وجود لأية مناطق انفصام في عناصر القناة المختلفة.
- أن اختيار التصميم الأفضلي للنفاثة من خلال الدمج بين طريقة بورجر *[67]* باعتماد طول النفاثة المحسوب وفقها وطريقة كثيري الحدود المتلاقيين لتحديد شكل منحنيات جدران النفاثة هو اختيار صحيح.

10. تم تحديد التجارب المطلوبة لاختبار ومعايرة القناة بعد تركيبها، إضافة لتحديد أجهزة القياس الضرورية المتوجب تأمينها لتشغيل القناة.
11. الكلفة التقديرية للتصنيع المحلي *4,616,000* ل.س. تضاف إليها أجور التجميع والتركيب في المخبر بواقع *20* % من الكلفة الإجمالية. تكلفة استيراد قناة مماثلة حوالي *25,300,000* ل.س. يضاف لها أجور تركيب وتشغيل وتدريب بمبلغ *35,000* دولار أي مايعادل *2,800,000* ل.س.

اقتراحات مستقبلية:

لاستكمال العمل البحثي نقترح:

1. يجب الانتباه إلى أن عملية النمذجة والمحاكاة لا تعد بديلاً عن التجارب الفعلية المطلوبة لاختبار ومعايرة القناة بعد تصنيعها وتركيبها لأن نتائج النمذجة والمحاكاة تبقى ذات طابع نظري وتحتاج لتأكيد وثوقيتها ودقتها إلى تجارب عملية من خلال معايرة القناة.
2. وجود القناة الهوائية في مخبر ميكانيك السوائل يفتح المجال لأبحاث علمية ذات مستوى عالٍ في الكلية، لذا نأمل استكمال هذا العمل بتصنيع القناة وتركيبها في المخبر والتي ستفتح مجالاً كبيراً للتعاون بين الكلية والمؤسسات الصناعية المختلفة.
3. نقترح تصنيع القناة محلياً وشراء بعض المكونات التي يصعب تصنيعها محلياً مثل قسم المروحة وريش التوجيه في الأكواع والمناخل وخلايا عش النحل إضافة لأجهزة القياس.

9. المراجع العلمية

[1] Jewel B. Barlow, William H. Rae, Alan Pope : Low-Speed Wind Tunnel Testing, 3rd Edition, WILEY , March 1999.

[2] E. Krause: Fluid Mechanics with Problems and Solutions, and an Aerodynamic Laboratory, Springer, 2005.

[3] A.Ackl: Technical Fluid Mechanics. Vol.II, Damascus University press, 1983, in arabic.

[4] G. B. Schubauer and W. G. Spangenberg, Effect of Screens in Wide-Angle Diffusers. NACA TN NO.1610, 1948.

[5] : A report on wind tunnel design and testing (Homework Assignment), www.iaa.ncku.edu.tw, 19/11/2008.

[6] S.M. Gorlin, L.L. Slezinger, Wind Tunnels and their Instrumentation. NASA, 1966.

[7] Dryden, H. L., Reduction of Turbulence in Wind Tunnel, NACA Report 392, 1931.

[8] Andronicos E. Filios, Dionisios P. Margaris, Dimitrios G. Papanikas, Michalis Gr. Vrachopoulos: Direct and inverse design calculations for a settling chamber contraction arrangement, Proceedings of First Nat. Conf. on Recent Advances in Mech.Eng. , 2001, Patras, Greece.

[9] M. Abbaspour; M. N. Shojaee: Innovative approach to design a new national low speed wind tunnel, IRSEN, CEERS, IAU, 2008.

[10] James H. Bell and Rabindra D. Mehta: Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels, Stanford University, 1988.

[11] Carl E.Hanson: The Design, Development and Construction of Low-turbulence, Low-noise Wind Tunnel, University of Minnesota, 1965.

[12] Todd David Walker: Re-Design of a Drive System for a Low-Speed Wind Tunnel, Texas Tech University, 1998.

[13] Dipl.-Ing., MBA Jens Magenheimer, Windkanaltechnik - Aufbau und Vergleich der verschiedenen Windkanalbauarten, Maschinenbau, 2006.

[14] James H. Bell and Rabindra D. Mehta: Design and Calibration of the Mixing Layer and Wind Tunnel, Stanford University Department of Aeronautics and Astronautics Stanford, CA 94305, MAY 1989

[15] J.H. Bell and R.D. Mehta: Boundary-Layer Predictions for small low-speed contraction, AIAA Journal, March 1989.

[16] Yong O. Han, William K. George, Johan Hjarne: Effect of a Contraction on Turbulence. PartI: Experiment, AIAA paper, January, 2005.

[17] Blake W.,Corson Jr.: The Aerodynamic of Wind Tunnel Fan, National Advisory Committee for Aerodynamics, 1941, Washington.

[18] Edward Sliberman: Secondary Flows in Guide Vane Bends with some Notes on the Primary Tow-Dimensional Flow, University of Minnesota, 1953.

[19] R.D. Mehta: Turbulent Boundary Layer Perturbed by a Screen, AIAA Journal, 1985.

[20] Eckert,W.T. , Mort,K.W. , and Jope,J. : Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance , NASA TN D-8243 , Oct. 1976.

[21] H. Schlichting: Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill Book comp., New York, 1960.

[22] H. L. Dryden and A. M. Kuethe: Effect of Turbulence in Wind Tunnel Measurements, NACA, Report No.342, 1929.

[23] Peter Moonen, Bert Blocken, Jan Carmeliet, Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel , Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95 1289–1314, 2007.

[24] Robert J. Poole, Manuel A. Alves: Velocity overshoots in gradual contraction flows, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 160 47–54, June 2009.

[25] H. Fellouah, C.G. Ball, A. Pollard: Reynolds number effects within the development region of a turbulent round free jet, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 3943–3954, 2009.

[26] A.F. Zahm: Horizontal Buoyancy in Wind Tunnels, NACA-tn-23, 1920.

[27] D.Althaus: Tunnel-Wall Corrections at the Laminar Wind Tunnel, , 2004.

[28] Kevin Cooper: Bluff-Body Blockage Corrections in Closed- and Open-Test-Section Wind Tunnels, , .

[29] NASA: Wind Tunnel Report, www.grc.nasa.gov, 28/10/2008.

[30] Jose Mathew: Design, Fabrication, and Characterization of an Anechoic Wind Tunnel Facility, University of Florida, 2006.

[31] Bjorn Lindgren & Arne V. Johansson : Design and Evaluation of a Low-Speed Wind-Tunnel with Expanding Corners, Technical Reports from Royal Institute of Technology Department of Mechanics SE-100 44 Stockholm, Sweden , 2002.

[32] Nathan Tatman : Wind Tunnel Design and Operation , www.runet.edu,10/2/2009.

[33] Roald A.Wigeland, Jimmy Tan-atichat and Hassan M.Najib: Evaluation of a New Concept for Reducing Free-Stream Turbulence in Wind Tunnels, Illinois institute of Technology, 1979.

[34] C. Salter, and W. G. Rayme: Notes and Comments on some particular Features of Wind-Tunnel Design following Measurements of Flow Distribution, Wall Pressures etc. in the N.P.L. 7 ft (Low Turbulence) Wind Tunnel, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, London, 1965.

[35] J.E. Sargison, G.J. Walker and R. Rossi: Design and calibration of a wind tunnel with a two dimensional contraction, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference the University of Sydney, 13-17 December 2004.

[36] R.D. Mehta and P.Bradshaw, Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels, the Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, 1979.

[37] T.F. Gelder, R.D. Moore, J.M. Sam, and EX. McFariand: Wind Tunnel Turning Vanes of Modern Design, NASA, 1986.

[38] John Callan and Ivan Marusic: The Effect of a Changing Aspect Ratio through a Wind Tunnel Contraction, University of Minnesota, June 2000.

[39] Con J. Doolan and Rick C. Morgans: Numerical Evaluation and Optimization of Low Speed Wind Tunnel Contractions, University of Adelaide, Adelaide, Australia, 2005.

[40] Peter Moonen, Bert Blocken, Staf Roels, Jan Carmeliet: Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94 699–723, 2006.

[41] D.Bergmann, U.Kaiser, S.Wagner: Reduction of low-frequency pressure fluctuations in wind tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 543–550, 2003.

[42] Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, John F. Foss (Eds.): Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Springer, 2007.

[43] S.Lämmlein:LaboratoryWindTunnel/Flow Measurements , University of Applied Sciences Regensburg , 2008.

[44] B. Bottin, M. Carbonaro & W. Schröder : First Runs of the Adaptive Wind Tunnel T'3 at VKI: Calibration and Application of a Flexible Wall Adaptation Technique on a NACA0012 AIRFOIL , van Karman Institute for Fluid Dynamics , 1997.

[45] NACA: Wind Tunnels of NASA, hq.nasa.gov, 28/10/2008.

[46] TLT: www.tlt.de, 2009

[47] DANTEC: www.dantecdynamics.com, 2009

[48] Ingenieurbüro Mathias Lippold: www.Windkanalkonstruktion.de, 2009

[49] Y.Kachkoul: Vergleichende experimentelle und numerischeAnalyse des komplexen Strömungsfeldes an einem Zylindermodell, doctorate thesis, Universität Rostock, 2007.

[50] **رجا أبو عقل**: دراسة وتصميم محطة ريحية-شمسية نموذجية للاستخدام المنزلي باعتماد منطلقات تصميمية حديثة للعنفة الريحية مستلهمة من علم البيونيك التقني , مشروع أعد لنيل شهادة الماجستير في ميكانيك الموائع, إشراف الأستاذ الدكتور المهندس إنطانيوس عقل, جامعة دمشق, 2011-2010.

[51] http://www.lboro.ac.uk/departments/tt/research/aerodynmics/wind-tunnel.html.

[52] http://www-htgl.stanford.edu/bradshaw/tunnel.html.

[53] Philip Hahn: NACA 0012 Airfoil Aerodynamic Analysis, AIAA 2004-0505, 2004.

[54] NACA: The Development of Wind Tunnel Technology, history.nasa.gov, 28/10/2008.

[55]: Massachusetts Institute of Technology: Wright Brothers – Wind Tunnel, www.solarnavigator.net, 1/1/2010.

[56]: NASA: History of Wind Tunnels, awt.grc.nasa.gov/students_TunnelHistory.aspx, 1/1/2010.

[57] University of Minnesota: AEM Low speed wind tunnels, www.aem.umn.edu/facilities/windtunnel, 21/2/2009.

[58] Lehrstuhl für Flugdynamik: Windkanal,www.dynamik.rwth.aachen.de, 21/2/2009.

[59] Malinda Goodrich Jenele Gorham Wm. Noel Ivey Sarah Kim Marieke Lewis Carl Minkus: Wind Tunnels of The Eastern Hemisphere, Library of Congress, 2008.

[60] KatarinaDavid Jenele Gorham Sarah Kim Patrick Miller CarlMinkus: Aeronautical Wind Tunnels Europe & Asia, Library of Congress, 2006.

[61] ESPI Metals: Stainless Steel, www.espimetals.com/tech/stainlesssteel.pdf, 16/8/2011.

[62] Bo'sun Supplies Co.: Stainless Steel Info, http://www.bosunsupplies.com/stainlessinfo2.cfm, 16/8/2011.

[63] AS KZN: Grades of Stainless Steel - Grade 304, http://www.fanagalo.co.za/tech/tech_grade_304.htm, 16/8/2011.

[64] Global Metals: Stainless Steel - Grade 304/304L, www.globalmetals.com.au, 16/8/2011.

[65] AALCO: Stainless Steels - Stainless 304 Properties,Fabrication and Applications, Supplier Data by Aalco, http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2867, 2004.

[66] AvestaPolarit: Stainless steels – their properties
and their suitability for welding, www.avestapolarit.com/welding, 16/8/2011.

[67] G.G. Boerger: The Optimization of Wind Tunnel Contractions for The Subsonic Range, NASA TT F-16899, 1976.

[68] T. Morel: Comprehensive Design of axisymmetric wind tunnel contractions, Journal of Fluid Mechanics, 1975.

[69] Yao-xi Su: Flow Analysis and Design of Three-Dimensional Wind Tunnel Contractions, AIAA Journal Vol. 29 No. 11, 1991.

[70] FLUENT 6.3 User's Guide, Copyright c 2006 by Fluent Inc.

[71] M. Brede, personal information to Prof. Ackl, 2011.

[72]: holomap, Laser Doppler Anemometry (LDA) / Laser Doppler Velocimetry (LDV), www.holomap.com/lda.htm, 18/4/2012.

[73] Aerolab: Test Section Traverse Systems, www.aerolab.com, 28/12/2011

[74] Jeffrey D. Flamm and Floyd J. Wilcox,Jr.: Drag Measurements of an Axisymmetric Nacelle Mounted on a Flat Plate at Supersonic Speeds, NASA TM4660, 1995.

[75] Frank P.Bleier, Fan Handbook Selection, Application, Design, McGraw Hill, 1998.

[76] Prof. Dr.-Ing. Th. Carolus, Messtechnik-Labor Versuch V1 Druckmessung, Universitaet Siegen.

[77] TecQuipment, Multitube Manometer, www.tecquipment.com, 31/7/2012.

[78] Ethirajan Rathakrishnan, Applied Gas Dynamics, John Wiley & Sons, 2010.

[79] Franz Durst, Fluid Mechanics-An Introduction to the Theory of Fluid Flows, Springer, 2008.

[80] Chroma Company: www.chromaintegrated.com, 3/8/2012.

[81] Shaiq U.R. Khan, Design Tables for steel columns BS449, Techno Consultants Ltd, 1998.

[82] Technische Universitaet Braunschweig, KWB – Kleiner Windkanal Braunschweig, www.tu-braunschweig.de/ism/institut/wkanlagen/kwb, 27/11/2012.

[83] Witt & Sohn, Experience and know-how for wind tunnels in testing facilities, www.wittfan.de/download/presentation/Axial%20fans%20in%20 wind %20tunnels_en.pdf, 28/11/2012.

[84] Gambit 2.3 Tutorial Guide, Copyright c 2006 by Fluent Inc.

[85] AK Steel, Product Data Sheet 304/304L Stainless Steel, AK Steel Corporation, 2007.

[86] Kachkoul, Y.; Konstruktion, Fertigung und Kalibrierung einer 5-Loch-Sonde für die Messung des Geschwindigkeits- und Drucksfels in der Nachlaufströmung eines Automodells, Msc- Arbeit (arabisch), FMEE der Universität Damaskus, 1999.

[87] efunda, Properties of Steels, www.efunda.com, 1/12/2012.

10. قائمة الرموز والاختصارات والمصطلحات العلمية المستخدمة

1.10 قائمة الرموز العلمية المستخدمة مع الواحدات

الرمز	المعنى	واحدة القياس
A	المساحة	$[m^2]$
AR	نسبة توسع الناشرة	
B	عرض قسم الاختبار	$[m]$
c	طول وتر الريشة	$[m]$
C_L	معامل الرفع	
CR	نسبة التضيق للنفاثة	
d	قطر سلك المنخل	$[m]$
D	القطر	$[m]$
df	المسافة بين الأهداب	$[m]$
H	ارتفاع قسم الاختبار	$[m]$
H	الارتفاع	$[m]$
h	المسافة الفاصلة بين ريشتين متتاليتين	$[m]$
k	عامل تصحيح لعدم انتظام توزع السرعة عند مدخل الناشرة	
L	الطول	$[m]$
M	طول ضلع فتحة المنخل	$[m]$
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	$[kg/s]$
n	عدد الدورات	$[rpm]$
p_s	الضغط الستاتيكي	$[Pa]$
p_t	الضغط الكلي	$[Pa]$
q	الضغط الديناميكي	$[Pa]$
Q_{EVS}	انحراف المساحة المكافئ	
R	نصف القطر	$[m]$
Re	عدد رينولدز	
S	مساحة عنصر الشبك	$[m^2]$

S_{eq}	المساحة الأعظمية لخلية متساوية الأضلاع نصف قطر الدائرة المحيطة بها خارجاً مطابقة لنصف قطر الدائرة المحيطة بالعنصر الشبكي	*[m2]*
t	سماكة الريشة	*[m]*
TF	معامل الاضطراب	
Tu	معامل درجة الاضطراب	
$\acute{u}$	تذبذب السرعة بالاتجاه x	*[m/s]*
V	السرعة	*[m/s]*
$\acute{v}$	تذبذب السرعة بالاتجاه y	*[m/s]*
$\overline{V}$	السرعة الوسطية زمنياً	*[m/s]*
W	السرعة النسبية	*[m/s]*
$\acute{w}$	تذبذب السرعة بالاتجاه z	*[m/s]*
z_B	عدد ريش المروحة	
α	زاوية الورود	*درجة*
α	نصف زاوية انفراج الناشرة من أجل البعد الصغير	*درجة*
β	زاوية الانحراف	*درجة*
β	المسامية	
Δ	ارتفاع الخشونة السطحية	*[m]*
δ	زاوية انعطاف الكوع	*درجة*
ΔE	الطاقة المهدورة	*[J]*
ΔP	خسارة الضغط	*[Pa]*
ζ	معامل الفقد	
ζ_d	معامل فقد الانعطاف	
ζ_{ex}	معامل الفقد الناتج عن التوسع	
$\zeta_e(\theta)$	معامل تابع لزاوية انفراج الناشرة	
ζ_f	معامل الفقد الاحتكاكي	
θ	نصف زاوية انفراج الناشرة	*درجة*
θ	الزاوية بين الأشعة	*درجة*
λ	معامل الاحتكاك	
λ	طول موجة شعاع الليزر	*[m]*

ν	اللزوجة الحركية	$[m^2.s^{-1}]$
ρ	الكثافة	$[kg/m^3]$
ρ_m	كثافة شبكة المنخل	
σ	الصلادة	
ψ	معامل المقاومة للأكواع	
φ_{ex}	معامل الفقد الصدمي	

2.10 قائمة أهم الأدلة المستخدمة

الرمز	المعنى المشار إليه
SC	المنخل
TS	قسم الاختبار
D	الناشرة
out	مقطع الخروج
in	مقطع الدخول
c	الكوع
SD	حجرة تهدئة واستقرار الجريان
h	خلايا عش النحل
n	النفاثة

3.10 قائمة الاختصارات المستخدمة

الرمز	معنى الاختصار	
	باللغة الانكليزية	**باللغة العربية**
ADC	*Analog to Digital Converter*	محول خاص يعمل على تحويل الصيغة التماثلية إلى الشكل الرقمي
CAD	*Computer Assisted Design*	التصميم بمساعدة الحاسب
CCA	*Constant Current Anemometer*	مقياس السلك الساخن بثبات شدة التيار الكهربائي
CTA	*Constant Temperature Anemometer*	مقياس السلك الساخن بثبات درجة الحرارة
NACA	*National Advisory Committee for Aeronautics*	الهيئة الوطنية الأمريكية للاستشارات الفضائية
RANS	*Reynolds averaged Navier-Stokes equations*	معادلات نافير ستوكس الوسطية حسب رينولدز
SST	*Shear-Stress Transport*	نقل إجهادات القص
VFD	*Variable Frequency Driver*	جهاز التحكم بسرعة المروحة

4.10 قائمة المصطلحات العلمية المستخدمة

analysis solver	الحل التحليلي
Angularity	التزاوي
Boundary conditions	الشروط الحدية
cross-flow	الجريان العرضي
Density-Based Solver	مولد الحلول المرتكز على الكثافة
Digital	رقمي
down-flow	الجريان العمودي للأسفل
fan zone	منطقة المروحة
Fringes	الأهداب
Horizontal Buoyancy	الطفو الأفقي
Hypersonic wind tunnels	الأقنية فو ق الصوتية العالية
interference filter	مصفي إشارة
iteration	الحل بخطوات مقاربة
Mesh generation	توليد الشبك
Post-processing	مرحلة ما بعد الحل
Pre-processing	مرحلة ما قبل الحل
Pressure	الضغط
Pressure-Based Solver	مولد الحلول المرتكز على الضغط
Propulsion Wind Tunnel	قناة هوائية دافعة
Scanivalve	جهاز ماسح ومعالج ضغط
Skewed	متخالفة الجوانب
skewness	التشوه
Solid Blockage	الانسداد الصلب
Streamline Curvature	تقوس خطوط التيار
Structured Mesh	شبك ذو بنية
Subsonic wind-tunnels	الأقنية تحت الصوتية
Supersonic wind tunnels	الأقنية فوق الصوتية
Transonic wind tunnels	أقنية الهواء الانتقالية (تحت الصوتية – صوتية – فوق الصوتية)

Unstructured mesh	شبك عديم البنية
up-flow	الجريان العمودي للأعلى
Velocity	السرعة
Wake Blockage	انسداد أثر المخر
Whirling Arms	أذرع التدويم

11. الملاحق

1.11 الملحق *A*

حساب فواقد الجريان لمكونات القناة الهوائية

1.1.11 حساب معاملات الفقد لعناصر القناة الهوائية واستطاعة المروحة في حال كون قسم الاختبار مغلقاً 149
1.1.1.11 قسم الاختبار (1) 149
2.1.1.11 الناشرات (2) 150
1.2.1.1.11 الناشرة (2.1) 150
1.1.2.1.1.11 المجمع (2.1.1) 153
2.2.1.1.11 الناشرة (2.2) 153
3.2.1.1.11 الناشرة (2.3) 157
4.2.1.1.11 الناشرة (2.4) 159
3.1.1.11 الأكواع (3) 163
1.3.1.1.11 الكوع (3.1) 163
2.3.1.1.11 الكوع (3.2) 163
3.3.1.1.11 الكوع (3.3) 163
4.3.1.1.11 الكوع (3.4) 164
4.1.1.11 قسم وصل (5) 164
5.1.1.11 قسم المروحة (6) 165
6.1.1.11 معامل مقاومة المروحة 166
7.1.1.11 المقطع الانتقالي (7) 166
8.1.1.11 حجرة تهدئة واستقرار الجريان (8) 169
9.1.1.11 خلايا عش النحل (8.1) 170
10.1.1.11 المناخل (8.2) 171
11.1.1.11 النفاثة (9) 172
12.1.1.11 حساب الاستطاعة المطلوبة للمروحة واستطاعة محركها 173
2.1.11 حساب معاملات الفقد لعناصر القناة الهوائية واستطاعة المروحة في حال كون قسم الاختبار مفتوحاً 175
1.2.1.11 قسم الاختبار (1) 175
2.2.1.11 الناشرات (2) 175
1.2.2.1.11 الناشرة (2.1) 175
1.2.2.1.1.11 المجمع (2.1.1) 178
2.2.2.1.11 الناشرة (2.2) 179
3.2.2.1.11 الناشرة (2.3) 182
4.2.2.1.11 الناشرة (2.4) 185
3.2.1.11 الأكواع (3) 188

1.3.2.1.11 الكوع (3.1) 188
2.3.2.1.11 الكوع (3.2) 188
3.3.2.1.11 الكوع (3.3) 188
4.3.2.1.11 الكوع (3.4) 189
4.2.1.11 قسم وصل (5) 189
5.2.1.11 قسم المروحة (6) 190
6.2.1.11 معامل مقاومة المروحة 191
7.2.1.11 المقطع الانتقالي (7) 191
8.2.1.11 حجرة تهدئة واستقرار الجريان (8) 194
9.2.1.11 خلايا عش النحل (8.1) 195
10.2.1.11 المناخل (8.2) 196
11.2.1.11 النفاثة (9) 197
12.2.1.11 حساب الاستطاعة المطلوبة للمروحة واستطاعة محركها 198

في هذا الملحق سيتم حساب فواقد الجريان في مكونات القناة الهوائية كافة من أجل حساب الاستطاعة المطلوبة للمروحة، حيث سيتم حساب معاملات الفقد في كل عنصر من عناصر القناة الهوائية حسب المراجع الثلاثة *[30,6,1]*. وقد تم تحويل قيم معاملات الفقد ζ المحسوبة حسب المراجع المذكورة إلى قيم منسوبة للسرعة الأعظمية في قسم الاختبار وذلك لوضع أساس مشترك للمقارنة بينها وتبسيط عملية حساب خسارة الضغط الإفرادية في عناصر القناة ومن ثم حساب خسارة الضغط الإجمالية للقناة تمهيداً لحساب الاستطاعة المطلوبة للمروحة وتحديد استطاعة محركها، وذلك من أجل حالتين: الأولى لقسم الاختبار مغلق والثانية لقسم الاختبار مفتوح.

1.1.11 حساب معاملات الفقد لعناصر القناة الهوائية واستطاعة المروحة في حال كون قسم الاختبار مغلقاً

1.1.1.11 قسم الاختبار *(1)*

يحسب القطر الهيدروليكي للمقاطع غير الدائرية من العلاقة:

$$D=\frac{4\cdot A}{U} \qquad (A.1)$$

$$D=\frac{4\cdot 0.6\cdot 0.5}{2\cdot(0.6+0.5)}=\frac{1.2}{2.2}=0.545m$$

يحسب عدد رينولدز من العلاقة:

$$\mathrm{Re}=\frac{V\cdot D}{\nu} \qquad (A.2)$$

$$\mathrm{Re}=\frac{60\cdot 0.545}{15.1\cdot 10^{-6}}=2.165\cdot 10^{6}$$

حساب معامل الفقد في قسم الاختبار منسوباً للسرعة فيه حسب *[1]*:

يحسب معامل الاحتكاك في قسم الاختبار المغلق من العلاقة *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.0103}}=2\cdot\lg\left(2.165\cdot 10^{6}\cdot\sqrt{0.0103}\right)-0.8$$

$$9.8=9.8$$

$$\lambda=0.01$$

يحسب معامل الفقد من العلاقة *(2.2)*:

$$\zeta_{TS}=0.01\cdot\frac{1.6}{0.545}=0.0293$$

حساب معامل الفقد في قسم الاختبار منسوباً للسرعة فيه حسب *[6]*:

تعطى قيمة معامل الاحتكاك للأقنية ذات الجدران الملساء بالعلاقة:

$$\lambda=\frac{0.303}{(\lg\mathrm{Re}-0.9)^{2}} \qquad (A.3)$$

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 2.165 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.01$$

وبالتالي حسب *(2.2)*:

$$\zeta_{TS} = 0.01 \cdot \frac{1.6}{0.545} = 0.0293$$

حساب معامل الفقد في قسم الاختبار منسوباً للسرعة فيه حسب *[30]*:

يحسب معامل الاحتكاك في قسم الاختبار المغلق من العلاقة *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log\left[\frac{6.9}{2.165 \cdot 10^6} + \left(\frac{0.0016 \Big/ 0.545}{3.7} \right)^{1.11} \right] \right)^2 = 0.0261$$

يحسب معامل الفقد من العلاقة *(2.2)*:

$$\zeta_{TS} = 0.0261 \cdot \frac{1.6}{0.545} = 0.0766$$

يؤخذ معامل فقد النموذج منسوباً للسرعة في قسم الاختبار حسب *[6]* $\zeta_M = 0.014$.

2.1.1.11 الناشرات *(2)*

1.2.1.1.11 الناشرة *(2.1)*

مقطع الدخول: *0.6 X 0.5 m*، مقطع الخروج: *0.91 X 0.74 m*، نصف زاوية انفراج الناشرة $\theta = 3^\circ$ ، الطول: *2.58 m*.

و باعتبار أن عدد رينولدز عند المدخل $2.165 \cdot 10^6$ نفس القيمة المحسوبة في قسم الاختبار وباتباع نفس الخطوات المجراة لحساب معامل الاحتكاك في قسم الاختبار يمكن الحصول على نفس قيمة معامل الاحتكاك منسوباً لسرعة المدخل حسب *[6,1]* وهي *0.01*.

حساب معامل الفقد حسب *[1]* منسوباً للسرعة عند المدخل:

$$AR = \frac{A_{out}}{A_{in}} = \frac{0.91 \cdot 0.74}{0.5 \cdot 0.6} = 2.24$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{(2.24)^2}) . \frac{0.01}{8 . \sin 3^\circ} = 0.019$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta) = 0.1222 - 0.04590 \cdot 3 + 0.02203 \cdot 3^2 + 0.003269 \cdot 3^3$$
$$- 0.0006145 \cdot 3^4 - 0.00002800 \cdot 3^5 + 0.00002337 \cdot 3^6 = 0.231$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.231 . \left(\frac{2.24 - 1}{2.24} \right)^2 = 0.07$$

من *(13.2)* نجد معامل الفقد الإجمالي منسوباً لسرعة المدخل:

$$\zeta_{D1} = 0.019 + 0.07 = 0.089$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_i = \zeta_i \cdot \left(\frac{A_{TS}}{A_i} \right)^2 \qquad (A.4)$$

$$\zeta'_{D1} = 0.089 \cdot \left(\frac{0.3}{0.3} \right)^2 = 0.089$$

حسب *[6]*

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)* نجد:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg\, 3)^{5/4} = 0.155$$

من الشكل *(4.2)* نقرأ *k = 1.2*. والتالي نجد

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.155 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{0.5 \cdot 0.6}{1 \cdot 0.83})^2 = 0.076$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المخرج:

من *(A.1)*

$$D = \frac{4 \cdot 0.91 \cdot 0.74}{2 \cdot (0.91 + 0.74)} = 0.816\, m$$

السرعة عند المخرج:

$$V = \frac{Q}{A} \qquad (A.5)$$

$$V = \frac{18}{0.91 \cdot 0.74} = 26.73\, m \setminus s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{26.73 \cdot 0.816}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.444 \cdot 10^{6}$$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 1.444 \cdot 10^{6} - 0.9\right)^{2}} = 0.01$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.01 + 0.01}{2} = 0.01$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = f' = \frac{1}{\sin 3} = 19.1 \quad , \qquad e = 1 - \left(\frac{0.5 \cdot 0.6}{0.91 \cdot 0.74}\right)^{2} = 0.445$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_{f} = \frac{0.01}{16} \cdot 0.445.(2 \cdot 19.1) = 0.01$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D1} = 0.01 + 0.076 = 0.086$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D1} = 0.086 \cdot \left(\frac{0.3}{0.3}\right)^{2} = 0.086$$

حسب *[30]*:

وباعتبار أن عدد رينولدز = $2.165 \cdot 10^{6}$ نفس القيمة المحسوبة في قسم الاختبار.

حساب معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة من *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log\left[\frac{6.9}{2.165 \cdot 10^{6}} + \left(\frac{0.0016 \Big/ 0.545}{3.7}\right)^{1.11}\right]\right)^{2} = 0.026$$

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المخرج $D = 0.816\, m$

السرعة عند المخرج $V = 26.73\, m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج $\mathrm{Re} = 1.444 \cdot 10^6$

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{1.444 \cdot 10^6} + (\frac{0.0016 \Big/ 0.816}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.023$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل والمخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.026 + 0.023}{2} = 0.0245$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(18.2)*:

$$\zeta_{D1} = \left[\frac{0.0245}{8 \cdot \tan(3)} + 0.6 \cdot \tan(3) \right] \cdot \left[1 - \frac{(0.545)^4}{(0.816)^4} \right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(0.545)^4} = 0.072$$

1.1.2.1.1.11 المجمع *(2.1.1)*

يحسب معامل الفقد له منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من العلاقة *(2.2) [30,6,1]*، حيث القطر الهيدروليكي مساوي للقطر الهيدروليكي لقسم الاختبار $D = 0.545\,m$ والسرعة في هذا القسم مساوية للسرعة في قسم الاختبار وبالتالي فتكون قيمة معامل الاحتكاك نفسها حسب *[1,6]* $\lambda = 0.01$ وحسب *[30]* $\lambda = 0.0261$. طول المجمع يبلغ *0.23 m* وبهذا تكون قيمة معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار حسب *[6,1]*:

$$\zeta_B = \frac{0.01 \cdot 0.23}{0.545} = 0.004$$

حسب *[30]*

$$\zeta_B = \frac{0.0261 \cdot 0.23}{0.545} = 0.011$$

2.2.1.1.11 الناشرة *(2.2)*

مقطع الدخول: *0.91 X 0.74 m*، مقطع الخروج: $D = 1m$ ، طول الناشرة: *1.76 m* ، زوايا الناشرة $\theta = 1^\circ , \alpha = 4^\circ$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار حسب *[1]*

يحسب القطر الهيدروليكي لمقطع الدخول من العلاقة *(A.1)*:

$$D = \frac{4 \cdot 0.91 \cdot 0.74}{2 \cdot (0.91 + 0.74)} = 0.816\,m$$

حساب السرعة عند مقطع الدخول من *(A.5)*:

$$V = \frac{18}{0.91 \cdot 0.74} = 26.73\,m \setminus s$$

حساب عدد رينولدز عند المدخل من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{26.73 \cdot 0.816}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.444 \cdot 10^{6}$$

حساب معامل الاحتكاك من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.011}} = 2 \cdot \lg\left(1.444 \cdot 10^{6} \cdot \sqrt{0.011}\right) - 0.8$$

$$9.5 = 9.5$$

$$\lambda = 0.011$$

$$AR = \frac{\pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2}}{0.91 \cdot 0.74} = 1.166$$

حساب معامل الفقد الاحتكاكي من *(14.2)*:

$$\zeta_{f} = (1 - \frac{1}{(1.166)^{2}}).\frac{0.011}{8.\sin 4} = 0.005$$

حساب المعامل الخاص بزاوية انفراج الناشرة من *(17.2)*:

$$\zeta_{e}(\theta) = 0.1222 - 0.04590 \cdot 4 + 0.02203 \cdot 4^{2} + 0.003269 \cdot 4^{3}$$
$$- 0.0006145 \cdot 4^{4} - 0.00002800 \cdot 4^{5} + 0.00002337 \cdot 4^{6} = 0.15$$

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.15.\left(\frac{1.166 - 1}{1.166}\right)^{2} = 0.003$$

حساب معامل الفقد الكلي للناشرة الثانية منسوباً للسرعة عند المدخل من *(13.2)*:

$$\zeta_{D2} = 0.003 + 0.005 = 0.008$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D2} = 0.008 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74}\right)^{2} = 0.002$$

حسب *[6]*:

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg\,4)^{5/4} = 0.223$$

من الشكل *(4.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.223 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{0.91 \cdot 0.74}{\pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2})^2 = 0.005$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.1)* $\lambda_{D1out} = 0.01$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج:

من *(A.5)*:

$$V = \frac{18}{\pi\left(\frac{1}{2}\right)^2} = 22.9\,m \setminus s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{22.9 \cdot 1}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.516 \cdot 10^6$$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 1.516 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.01$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.01 + 0.01}{2} = 0.01$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = \frac{1}{\sin 4} = 14.33 \quad , \quad f' = \frac{1}{\sin 1} = 57.3 \quad , \qquad e = 1 - \left(\frac{0.91 \cdot 0.74}{\pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2} \right)^2 = 0.265$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.01}{16} \cdot 0.265.(14.33 + 57.3) = 0.012$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D2} = 0.005 + 0.012 = 0.017$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D2} = 0.017 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (1/2)^2} \right)^2 = 0.002$$

حسب *[30]*

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة *(2.2)* هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.1)* $\lambda_{D1out} = 0.023$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج من *(A.5)*: $V = 22.9 m \setminus s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = 1.516 \cdot 10^6$$

من *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{1.516 \cdot 10^6} + (\frac{0.0016 \diagup 1}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.0222$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.023 + 0.0222}{2} = 0.0226$$

من *(18.2)*:

$$\zeta_{D2} = \left[\frac{0.0226}{8 \cdot \tan(4)} + 0.6 \cdot \tan(4) \right] \cdot \left[1 - \frac{(0.816)^4}{(1)^4} \right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(0.816)^4} = 0.009$$

3.2.1.1.11 الناشرة *(2.3)*

مقطع الدخول: $D_{in} = 1m$ ، مقطع الخروج: $D_{out} = 1.05\,m$ ، $\theta = 1^{\circ}$

حسب *[1]*

من *(A.5)*:

$$V = \frac{18}{\pi\left(\frac{1}{2}\right)^2} = 22.9\,m \setminus s$$

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{22.9 \cdot 1}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.516 \cdot 10^6$$

حساب معامل الاحتكاك من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.0109}} = 2 \cdot \lg\left(1.516 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0.0109}\right) - 0.8$$

$$9.5 = 9.5$$

$$\lambda = 0.0109$$

$$AR = \frac{A_{exit}}{A_{inlet}} \frac{(1.05)^2}{(1)^2} = 1.1$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{(1.1)^2}).\frac{0.0109}{8.\sin 1} = 0.014$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta) = 0.09632 - 0.004152 \cdot 1 = 0.092$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.092.\left(\frac{1.1-1}{1.1}\right)^2 = 0.0007$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D3} = 0.014 + 0.0007 = 0.0147$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D3} = 0.0147 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (1)^2 / 4}\right)^2 = 0.002$$

حسب *[6]*:

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 3.2 \cdot (tg1)^{5/4} = 0.02$$

من الشكل *(4.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.02 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{(1)^2}{(1.05)^2})^2 = 0.0002$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.2)* $\lambda_{D2in} = 0.01$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج:

من *(A.5)*:

$$V = \frac{18}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2} = 20.8\, m/s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{20.8 \cdot 1.05}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.446 \cdot 10^6$$

من *(A.3)*:

$$\lambda_{D3out} = \frac{0.303}{\left(\lg 1.446 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.01$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.01 + 0.01}{2} = 0.01$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = f' = \frac{1}{\sin 1} = 57.3 \quad , \quad e = 1 - \left(\frac{(1)^2}{(1.05)^2}\right)^2 = 0.18$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.01}{16} \cdot 0.18.(2 \cdot 57.3) = 0.013$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D3} = 0.0002 + 0.013 = 0.0132$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D3} = 0.0132 \cdot \left(\frac{0.3}{\frac{\pi}{4} \cdot (1)^2} \right)^2 = 0.002$$

حسب *[30]*:

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.2)* $\lambda_{D3in} = 0.0222$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج: $V = 20.8 m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج: $\mathrm{Re} = 1.446 \cdot 10^6$

من *(19.2)*:

$$\lambda_{D3out} = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{1.446 \cdot 10^6} + (\frac{0.0016 \Big/ 1.05}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.0219$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.0222 + 0.0219}{2} = 0.022$$

من *(18.2)*:

$$\zeta_{D3} = \left[\frac{0.022}{8 \cdot \tan(1)} + 0.6 \cdot \tan(1) \right] \cdot \left[1 - \frac{(1)^4}{(1.05)^4} \right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(1)^4} = 0.0026$$

4.2.1.1.11 الناشرة *(2.4)* القصيرة

مقطع الدخول: *1.25 X 1.05 m* ، مقطع الخروج: *1.5 X 1.25 m* ، نصف زاوية الانفراج من أجل البعد الصـــغير للناشرة $\alpha = 8^\circ$ ، ونصف زاوية الانفراج من أجل البعد الكبير للناشرة $\theta = 9^\circ$.

حسب *[1]*

حساب سرعة الدخول من *(A.5)*:

$$V = \frac{18}{1.05 \cdot 1.25} = 13.7 m/s$$

القطر الهيدروليكي لمقطع الدخول من *(A.1)*:

$$D = \frac{4 \cdot 1.05 \cdot 1.25}{2 \cdot (1.05 + 1.25)} = 1.141 m$$

عدد رينولدز عند مقطع الدخول من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{13.5 \cdot 1.141}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.035 \cdot 10^{6}$$

حساب معامل الاحتكاك من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.0117}} = 2 \cdot \lg\left(1.035 \cdot 10^{6} \cdot \sqrt{0.0117}\right) - 0.8$$

$$9.\ 2 = 9.2$$

$$\lambda = 0.0115$$

$$AR = \frac{1.5 \cdot 1.25}{1.05 \cdot 1.25} = 1.4$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{(1.4)^2}).\frac{0.0117}{8.\sin 9} = 0.004$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta) = -0.01322 + 0.05866 \cdot 9 = 0.514$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.514.\left(\frac{1.4-1}{1.4}\right)^2 = 0.041$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D4} = 0.004 + 0.041 = 0.045$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D4} = 0.045 \cdot \left(\frac{0.3}{1.05 \cdot 1.25}\right)^2 = 0.002$$

حسب *[6]*

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg\,9)^{5/4} = 0.619$$

من الشكل *(4.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.619 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{1.25 \cdot 1.05}{1.25 \cdot 1.5})^2 = 0.067$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

حساب معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المدخل $D = 1.141 mm$

السرعة عند المدخل $V = 13.7 m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الدخول من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{13.7 \cdot 1.141}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.035 \cdot 10^6$$

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 1.035 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.012$$

القطر الهيدروليكي عند المخرج:

من *(A.1)*:

$$D = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 1.25}{2 \cdot (1.5 + 1.25)} = 1.363 m$$

السرعة عند المخرج:

من *(A.5)*:

$$V = \frac{18}{1.5 \cdot 1.25} = 9.6 m/s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{9.6 \cdot 1.363}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 866543$$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 866543 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.012$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.012 + 0.012}{2} = 0.012$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = \frac{1}{\sin 9} = 6.4 \quad , \quad f' = \frac{1}{\sin 8} = 7.185 \qquad e = 1 - \left(\frac{1.25 \cdot 1.05}{1.25 \cdot 1.5}\right)^2 = 0.091$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.012}{16} \cdot 0.91.(6.4 + 7.185) = 0.009$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*: $\zeta_{D4} = 0.067 + 0.009 = 0.076$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D4} = 0.076 \cdot \left(\frac{0.3}{1.25 \cdot 1.05} \right)^2 = 0.004$$

حسب *[30]*

حساب معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المدخل $D = 1.141 mm$

السرعة عند المدخل $V = 13.7 m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الدخول $\mathrm{Re}_D = \frac{13.7 \cdot 1.141}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.035 \cdot 10^6$

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{865549} + (\frac{0.0016 \Big/ 0.954}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.0225$$

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المخرج $D = 1.363 m$

السرعة عند المخرج $V = 9.6 m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج $\mathrm{Re}_D = \frac{9.6 \cdot 1.363}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 866543$

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{866543} + (\frac{0.0016 \Big/ 1.363}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.02$$

حســـاب معامـــل

الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.0225 + 0.02}{2} = 0.0212$$

$$\zeta_{D4} = \left[\frac{0.0212}{8 \cdot \tan(9)} + 0.6 \cdot \tan(9) \right] \cdot \left[1 - \frac{(0.954)^4}{(1.363)^4} \right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(0.954)^4} = 0.009$$

3.1.1.11 فواقد الأكواع *(3)*

حسب ***[30,1]:***

يعطى معامل الفقد منسوباً للسرعة في الكوع بالعلاقة *(27.2)*.

1.3.1.1.11 الكوع *(3.1)*

قياس مقطع الكوع: *0.91 X 0.74 m*، طول وتر ريشة التوجيه *97 mm*.

حساب عدد رينولدز استناداً لطول وتر الريشة:

$$\mathrm{Re}_c = \frac{26.73 \cdot 0.097}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 171709$$

من *(27.2)*:

$$\zeta_{c1} = 0.1 + \frac{4.55}{(\lg 171709)^{2.58}} = 0.163$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c1} = 0.163 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74} \right)^2 = 0.032$$

2.3.1.1.11 الكوع *(3.2)*

قياس مقطع الكوع *(3.2)* نفس قياس مقطع الكوع *(3.1)*: *0.91 X 0.74 m* ، و بالتالي يملك نفس معامل الفقد:

$$\zeta_{c2} = 0.163$$

معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار:

$$\zeta'_{c2} = 0.032$$

3.3.1.1.11 الكوع *(3.3)*

قياس مقطع الكوع: *1.25 X 1.05 m*، طول وتر ريشة التوجيه *136 mm*.

$$\mathrm{Re}_c = \frac{13.7 \cdot 0.136}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 123390$$

$$\zeta_{c3} = 0.1 + \frac{4.55}{(\lg 123390)^{2.58}} = 0.17$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c3} = 0.17 \cdot \left(\frac{0.3}{1.25 \cdot 1.05} \right)^2 = 0.009$$

4.3.1.1.11 الكوع *(3.4)*

قياس مقطع الكوع *(3.4)* نفس قياس مقطع الكوع *(3.3)*: *1.05 X 1.25 m* ، و بالتالي له نفس معامل الفقد:

$$\zeta_{c4} = 0.17$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c4} = 0.152 \cdot \left(\frac{0.3}{1.25 \cdot 1.05} \right)^2 = 0.009$$

حسب *[6]*:

من الجدول *(3.2)* يمكن تحديد معامل الفقد في الأكواع منسوباً للسرعة في الكوع استناداً إلى *[6]*.

الأكواع الأربعة في دارة القناة الهوائية مستطيلة المقطع وريش التوجيه التي نود استخدامها هي بشكل جناح حامل و النسبة $\frac{r}{b_0} = 0 - 1$ ، و بالتالي فإنه حسب الجدول *(3.2)* قيمة معامل الفقد في الأكواع المستخدمة هي

$$\zeta_{C1} = \zeta_{C2} = \zeta_{C3} = \zeta_{C4} = 0.33$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c1} = \zeta'_{c2} = 0.33 \cdot \left(\frac{0.3}{0.83} \right)^2 = 0.043$$

$$\zeta'_{c3} = \zeta'_{c4} = 0.33 \cdot \left(\frac{0.3}{1.05 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.017$$

4.1.1.11 قسم وصل *(5)*

و هو ذو مقطع مستطيل أبعاده *0.91 X 0.74 m* وطوله *L=1 m*.

القطر الهيدروليكي هو نفس القطر الهيدروليكي لمدخل الناشرة *(2.2) D = 0.816 m*

يحسب معامل الفقد من العلاقة:

$$\zeta_1 = \lambda \cdot \frac{L}{D}$$

معامل الاحتكاك لهذا القسم هو نفس معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة *(2.2)* وهو حسب *[1]* $\lambda = 0.011$ وحسب *[6]* $\lambda = 0.01$ وحسب *[30]* $\lambda = 0.023$.

حسب *[1]*

$$\zeta_1 = 0.011 \cdot \frac{1}{0.816} = 0.013$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_1 = 0.013 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74} \right)^2 = 0.003$$

حسب *[6]*

$$\zeta_1 = 0.01 \cdot \frac{1}{0.816} = 0.0122$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_1' = 0.0122 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74} \right)^2 = 0.0024$$

حسب *[30]*

$$\zeta_1 = 0.023 \cdot \frac{1}{0.816} = 0.028$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_1' = 0.028 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74} \right)^2 = 0.0055$$

5.1.1.11 قسم المروحة *(6)*

وهو ذو مقطع دائري بقطر $D = 1\ m$ وطوله $L=1.8\ m$.

معامل الاحتكاك في هذا القسم هو نفس معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة *(2.3)* ويساوي حسب *[1] 0.0109* وحسب *[6]* يساوي *0.01*، وحسب *[30]* يساوي *0.0222*.

حساب معامل الفقد **حسب *[1]***:

$$\zeta = 0.0109 \cdot \frac{1.8}{1} = 0.02$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.02 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (0.5)^2} \right)^2 = 0.003$$

حسب *[6]*:

$$\zeta = 0.01 \cdot \frac{1.8}{1} = 0.018$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.018 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (0.5)^2} \right)^2 = 0.0026$$

حسب *[30]*:

$$\zeta = 0.0222 \cdot \frac{1.8}{1} = 0.03996$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.03996 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (0.5)^2} \right)^2 = 0.006$$

6.1.1.11 معامل مقاومة المروحة

يحسب معامل مقاومة المروحة المركبة داخل القناة حسب *[6]* من العلاقة:

$$\zeta_f = C_{xf} \cdot \frac{S_{med\,f}}{F_f} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{S_{med\,f}}{F_f}\right)^3} \qquad (A.6)$$

حيث: C_{xf} معامل المقاومة للمروحة المركبة وبشكل عام يأخذ القيمة *0.25*، $\frac{S_{med\,f}}{F_f}$ نسبة الانسداد للمروحة المركبة و عادة تأخذ القيمة *0.4*. بالتعويض في العلاقة *(A.5)*:

$$\zeta_f = 0.25.0.4 \cdot \frac{1}{(1-0.4)^3} = 0.463$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.463 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot \left(\frac{1.08}{2}\right)^2} \right)^2 = 0.045$$

7.1.1.11 مقطع انتقالي *(7)*

أبعاد مقطع الدخول (دائري): $D = 1.05\ m$ ، أبعاد مقطع الخروج (مستطيل): $1.25\ X\ 1.05\ m$ ، الطول: $2.3\ m$، $\theta = 2^\circ$

حسب *[1]*:

من *(A.5)* نجد السرعة عند مدخل القسم الانتقالي:

$$V = \frac{18}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2} = 20.8\, m/s$$

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{20.8 \cdot 1.05}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.446 \cdot 10^6$$

حساب معامل الاحتكاك من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.011}} = 2 \cdot \lg\left(1.446 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0.011}\right) - 0.8$$

$$9.5 = 9.5$$

$$\lambda = 0.011$$

$$AR = \frac{1.25 \cdot 1.05}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2} = 1.516$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{(1.516)^2}).\frac{0.011}{8.\sin 2} = 0.022$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta) = 0.1222 - 0.04590 \cdot 2 + 0.02203 \cdot 2^2 + 0.003269 \cdot 2^3$$
$$- 0.0006145 \cdot 2^4 - 0.00002800 \cdot 2^5 + 0.00002337 \cdot 2^6 = 0.127$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.127.\left(\frac{1.516 - 1}{1.516}\right)^2 = 0.015$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D2} = 0.022 + 0.015 = 0.037$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D2} = 0.037 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2}\right)^2 = 0.004$$

حسب [6]

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg\,2)^{5/4} = 0.093$$

من الشكل *(6.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.093 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2}{1.25 \cdot 1.05})^2 = 0.036$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

معامل الاحتكاك عند مدخل المقطع هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.3)* $\lambda = 0.01$.

معامل الاحتكاك عند مخرج المقطع هو نفسه المحسوب عند مدخل الناشرة *(2.4)* $\lambda = 0.012$.

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.01 + 0.012}{2} = 0.011$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = \frac{1}{\sin 2} = 28.65 \quad , \qquad e = 1 - \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2} \right)^2}{1.25 \cdot 1.05} \right)^2 = 0.564$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.011}{16} \cdot 0.564 . (28.65) = 0.011$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D2} = 0.036 + 0.011 = 0.047$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D2} = 0.047 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (1.05/2)^2} \right)^2 = 0.006$$

حسب *[30]*:

تحسب الزاوية المكافئة من العلاقة:

(A.7)

$$\theta = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{D_{in} - D_{out}}{2L} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1.05 - 0.954}{2 \cdot 2.3} \right) = 1.2^\circ$$

معامل الاحتكاك عند مدخل المقطع هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.3)* $\lambda = 0.0219$.

معامل الاحتكاك عند مخرج المقطع هو نفسه المحسوب عند مدخل الناشرة *(2.4)* $\lambda = 0.0225$.

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.0219 + 0.0225}{2} = 0.0222$$

من *(18.2)*:

$$\zeta_{D4} = \left[\frac{0.0222}{8\cdot\tan(1.2)} + 0.6\cdot\tan(1.2)\right]\cdot\left[1-\frac{(0.954)^4}{(1.05)^4}\right]\cdot\frac{(0.545)^4}{(0.954)^4} = 0.005$$

8.1.1.11 حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*

أبعادها: *1.5 X 1.25* بطول *1.266 m*

حسب *[1]*:

حساب القطر الهيدروليكي من *(A.1)*:

$$D = \frac{4\cdot1.5\cdot1.25}{2\cdot(1.5+1.25)} = 1.363m$$

حساب السرعة من *(A.5)*:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{18}{1.5\cdot1.25} = 9.6m/s$$

حساب عدد رينولدز من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{9.6\cdot1.363}{15.1\cdot10^{-6}} = 866543$$

حساب معامل الاحتكاك من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.012}} = 2\cdot\lg\left(866543\cdot\sqrt{0.012}\right) - 0.8$$

$$9.1 = 9.1$$

$$\lambda = 0.012$$

$$\zeta_{sd} = 0.012\cdot\frac{1.266}{1.363} = 0.011$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{sd} = 0.011\cdot\left(\frac{0.3}{1.5\cdot1.25}\right)^2 = 0.0003$$

حسب *[6]*:

القطر الهيدروليكي هو نفس القطر الهيدروليكي لمخرج الناشرة *(2.4) D = 1.363 m*

معامل الاحتكاك لهذا القسم هو نفس معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة *(2.4)* وهو $\lambda = 0.012$.

$$\zeta_{sd} = 0.012\cdot\frac{1.266}{1.363} = 0.011$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{sd} = 0.011 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.0003$$

حسب *[30]*:

حساب معامل الاحتكاك من *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{866543} + (\frac{0.0016 \Big/ 1.363}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.02$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_{sd} = 0.02 \cdot \frac{1.266}{1.363} \cdot \left(\frac{0.545}{1.363} \right)^4 = 0.0004$$

9.1.1.11 خلايا عش النحل *(8.1)*

حسب *[30,1]*:

من أجل خلايا عش نحل فيها نسبة عمق الخلية إلى قطرها $\frac{L_h}{D_h} = 6$ فإن قيمة معامل الفقد $\zeta_h = 0.2$. حيث العمق *10.4 cm* والقطر الهيدروليكي *1.73 cm*.

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_h = 0.2 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.005$$

حسب *[6]*:

يعطى معامل الفقد في خلايا عش النحل منسوباً للسرعة في حجرة تهدئة واستقرار الجريان بالعلاقة *(33.2)* ومعامل الاحتكاك بالعلاقة *(35.2)* وبالتالي:

$$\lambda_h = 0.214 \cdot \left(\frac{0.0016}{0.0173} \right)^{0.4} = 0.0825$$

المسامية $\beta_h = 0.7$:

$$\zeta_h = 0.0825 \cdot (6 + 0.3) \cdot (0.7)^2 + (0.7 - 1)^2 = 0.344$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_h = 0.344 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.009$$

10.1.1.11 المناخل *(8.2)*

حسب *[1]*:

سوف نستخدم مناخل ذات مسامية $\beta = 0.65$ ، و بالتالي $\sigma = 1 - \beta = 1 - 0.65 = 0.35$

و قطر سلك المنخل المستخدم $d = 94\,\mu m$ فإن:

$$\mathrm{Re}_w = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{9.6 \cdot 94 \cdot 10^{-6}}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 59.76$$

باستخدام سلك معدني دائري فإنه حسب *[1]* $\zeta_{mesh} = 1.3$

من *(43.2)*:

$$\zeta_{Rn} = \left[0.785 \cdot \left(1 - \frac{59.76}{354} \right) + 1.01 \right] = 1.662$$

من *(42.2)*:

$$\zeta_{sc} = 1.3 \cdot 1.662 \cdot 0.35 \ + \frac{(0.35)^2}{(0.65)^2} = 0.22$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{sc} = 0.22 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.005$$

باستخدام منخلين:

$$\zeta'_{sc\,tot} = 0.005 \cdot 2 = 0.01$$

حسب *[6]*:

من *(48.2)*:

$$\zeta_{sc} = 1.3 \cdot (1 - 0.65) + \left(\frac{1}{0.65} - 1 \right)^2 = 0.745$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{sc} = 0.745 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.019$$

باستخدام منخلين:

$$\zeta'_{sc\,tot} = 0.019 \cdot 2 = 0.038$$

حسب *[30]*:

من *(44.2)*:

$$\frac{V_{SC} \cdot d_{SC}}{\beta \cdot \nu} = \frac{9.6 \cdot 94 \cdot 10^{-6}}{0.65 \cdot 15.1 \cdot 10^{-6}} = 92$$

$$\zeta_{SC} = 6.5 \cdot \frac{(1-0.65)}{0.65^{5/3}} \cdot (92)^{-1/3} \cdot (\frac{0.545}{1.363})^4 = 0.026$$

باستخدام منخلين:

$$\zeta'_{sc\,tot} = 0.026 \cdot 2 = 0.052$$

11.1.1.11 النفاثة (9)

طول النفاثة L_n يساوي *1.384 m*.

حسب *[1]*:

عدد رينولدز عند مدخل النفاثة هو نفس عدد رينولدز لحجرة استقرار الجريان لأن السرعة وأبعاد المقطع عند المدخل هي نفسها لحجرة استقرار الجريان وباعتبار أن سطح النفاثة يجب أن يكون أملساً فإن ارتفاع الخشونة سيكون نفسه، و بالتالي فإن معامل الاحتكاك عند مدخل النفاثة هو نفسه لحجرة استقرار الجريان وهو: $\lambda = 0.012$. ومعامل الاحتكاك عند مخرجها هو نفسه لقسم الاختبار وهو: $\lambda = 0.01$

حسب *[30,1]* فإن معامل الاحتكاك هو متوسط عاملي الاحتكاك عند مدخل النفاثة ومخرجها.

حسب *[1]* نجد:

$$\lambda = \frac{0.01 + 0.012}{2} = 0.011$$

من *(55.2)*:

$$\zeta_n = 0.32 \cdot 0.011 \cdot \frac{1.384}{0.545} = 0.009$$

حسب *[6]*

يعطى معامل الفقد في النفاثة بالعلاقة *(56.2)*:

طول النفاثة L_n يساوي *1.384 m*، c نسبة التضيق تساوي *6.25*

معامل الاحتكاك عند مدخل النفاثة هو نفسه لحجرة استقرار الجريان وهو: $\lambda = 0.012$. و معامل الاحتكاك عند مخرجها هو نفسه لقسم الاختبار وهو: $\lambda = 0.01$

$$\lambda = \frac{0.01 + 0.012}{2} = 0.011$$

من *(56.2)*: عند المدخل:

$$\zeta_{nin} = \frac{4}{9} \cdot 0.011 \cdot \frac{1.384}{1.363} \cdot \frac{(6.25)^{9/2} - 1}{(6.25)^{5/2} \cdot (6.25-1)} = 0.037$$

عند المخرج:

$$\zeta_{nout} = \frac{4}{9} \cdot 0.011 \cdot \frac{1.384}{0.545} \cdot \frac{(6.25)^{9/2} - 1}{(6.25)^{5/2} \cdot (6.25-1)} = 0.092$$

سنعتمد قيمة وسطية بين المدخل و المخرج

$$\zeta_n = \frac{\zeta_{nin} + \zeta_{nout}}{2} = \frac{0.037 + 0.092}{2} = 0.0645$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_n = 0.0645 \cdot \left(\frac{0.3}{\frac{0.3 + (1.5 \cdot 1.25)}{2}} \right)^2 = 0.005$$

حسب *[30]*:

معامل الاحتكاك عند المدخل هو نفسه لحجرة استقرار الجريان ويساوي $\lambda = 0.02$ ، لحساب معامل الاحتكاك عند مخرج النفاثة نطبق العلاقة *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log\left[\frac{6.9}{2.165 \cdot 10^6} + \left(\frac{0.0016 \Big/ 0.545}{3.7} \right)^{1.11} \right] \right)^2 = 0.0261$$

معامل الاحتكاك الوسطي بين مدخل ومخرج النفاثة:

$$\lambda = \frac{0.02 + 0.0261}{2} = 0.023$$

من *(55.2)*:

$$\zeta_n = 0.32 \cdot 0.023 \cdot \frac{1.384}{0.545} = 0.0186$$

12.1.1.11 حساب الاستطاعة المطلوبة للمروحة واستطاعة محركها

تحسب استطاعة المروحة اللازمة من العلاقة:

$$N = \Delta Pv_{tot} \cdot Q \quad [W] \qquad (A.8)$$

يعطى انخفاض الضغط الكلي بالعلاقة:

$$\Delta Pv_{tot} = \Sigma \zeta'_i \cdot \frac{\rho}{2} V_{TS}^2 \qquad (A.9)$$

$$\Sigma \zeta'_i = \zeta_{TS} + \zeta'_M + \zeta'_{D1} + \zeta_B + \zeta'_{D2} + \zeta'_{D3} + \zeta'_{D4} + \zeta'_{c1} + \zeta'_{c2} + \zeta'_{c3} + \zeta'_{c4} + \zeta'_1 + \zeta'_{f\,\mathrm{sec}} + \zeta'_f + \zeta'_2 + \zeta'_{SD} + \zeta'_h + \zeta'_{sc} + \zeta'_n \qquad (A.10)$$

تحسب استطاعة المحرك من العلاقة:

$$P = \frac{N}{\eta} [kW] \qquad (A.11)$$

حيث η مردود المروحة ويساوي *0.68* حسب *[46]*.

حسب *[1]*:

من *(A.10)*:

$$\Sigma\zeta_i' = 0.0293 + 0.014 + 0.089 + 0.004 + 0.002 + 0.002 + 0.002 + 0.032 + 0.032 + 0.009$$
$$+ 0.009 + 0.003 + 0.003 + 0.045 + 0.004 + 0.0003 + 0.005 + 0.01 + 0.009 = 0.3036$$

من *(A.9)*:

$$\Delta Pv_{tot} = 0.3036 \cdot \frac{1.23}{2}(60)^2 = 672.17\ pa$$

من *(A.8)*:

$$N = 672.17 \cdot 18 = 12099\ W = 12.099\ kW$$

من *(A.11)*:

$$P = \frac{12.099}{0.68} = 17.8[kW]$$

حسب *[6]*:

من *(A.10)*:

$$\Sigma\zeta_i' = 0.0293 + 0.014 + 0.086 + 0.004 + 0.002 + 0.002 + 0.004 + 0.043 + 0.043 + 0.017$$
$$+ 0.017 + 0.0024 + 0.0026 + 0.045 + 0.006 + 0.0003 + 0.009 + 0.038 + 0.005 = 0.3696$$

من *(A.9)*:

$$\Delta Pv_{tot} = 0.3696 \cdot \frac{1.23}{2}(60)^2 = 818.3\ pa$$

من *(A.8)*:

$$N = 818.3 \cdot 18 = 14.729\ W = 14.729\ kW$$

من *(A.11)*:

$$P = \frac{14.729}{0.68} = 21.66[kW]$$

حسب *[30]*:

من *(A.10)*:

$$\Sigma\zeta_i' = 0.0766 + 0.014 + 0.072 + 0.011 + 0.009 + 0.0026 + 0.009 + 0.032 + 0.032 + 0.009$$
$$+ 0.009 + 0.0055 + 0.006 + 0.045 + 0.005 + 0.0004 + 0.005 + 0.052 + 0.0186 = 0.4137$$

من *(A.9)*:

$$\Delta Pv_{tot} = 0.4137 \cdot \frac{1.23}{2}(60)^2 = 915.9\ pa$$

من *(A.8)*:

$$N = 915.9 \cdot 18 = 16486\ W = 16.486 kW$$

من *(A.11)*:

$$P = \frac{16.486}{0.68} = 24.24[kW]$$

2.1.11 حساب معاملات الفقد في عناصر القناة الهوائية واستطاعة المروحة في حال كون قسم الاختبار مفتوحاً

1.2.1.11 قسم الاختبار *(1)*

تم اعتماد سرعة أعظمية في قسم الاختبار المفتوح $V_{max} = 55\ m/s$.

حسب ***[30,1]***:

يمكن حساب معامل الفقد لقسم اختبار مفتوح من العلاقة *(2.2)* وقيمة معامل الاحتكاك في هذه الحالة *0.08* *[30,11,1]*:

$$\zeta_{TS} = 0.08 \cdot \frac{1.4}{0.545} = 0.206$$

حسب ***[6]***:

يعطى معامل الفقد لقسم الاختبار المفتوح بالعلاقة *(4.2)*:

$$\zeta_{TS} = 0.0845 \cdot \frac{1.4}{0.545} - 0.0053 \cdot \left(\frac{1.4}{0.545}\right)^2 = 0.182$$

2.2.1.11 الناشرات *(2)*

1.2.2.1.11 الناشرة *(2.1)*

مقطع الدخول: $0.6\ X\ 0.5\ m$، مقطع الخروج: $0.91\ X\ 0.74\ m$ ، $\theta = 3^{\circ}$ ، الطول: $2.58\ m$

حسب ***[1]***:

حساب عدد رينولدز عند مدخل الناشرة حيث السرعة هي نفس السرعة في قسم الاختبار المفتوح *55 m/s*:

من *(A.1)*

$$\mathrm{Re} = \frac{55 \cdot 0.545}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.985 \cdot 10^{6}$$

معامل الاحتكاك يحسب من قانون براندل للجريان الأملس العلاقة *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.0104}} = 2 \cdot \lg\left(1.985 \cdot 10^{6} \cdot \sqrt{0.0104}\right) - 0.8$$

$$9.8 = 9.8$$

$$\lambda = 0.01$$

$$AR=\frac{0.91\cdot 0.74}{0.5\cdot 0.6}=2.24$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f=(1-\frac{1}{(2.24)^2}).\frac{0.01}{8.\sin 3}=0.019$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta)=0.1222-0.04590\cdot 3+0.02203\cdot 3^2+0.003269\cdot 3^3$$
$$-0.0006145\cdot 3^4-0.00002800\cdot 3^5+0.00002337\cdot 3^6=0.231$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex}=0.231.\left(\frac{2.24-1}{2.24}\right)^2=0.07$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D1}=0.019+0.07=0.089$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D1}=0.089\cdot\left(\frac{0.3}{0.3}\right)^2=0.089$$

حسب *[6]*:

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex}=6.2\cdot(tg3)^{5/4}=0.155$$

من الشكل *(4.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex}=0.155\cdot 1.2\cdot(1-\frac{0.5\cdot 0.6}{1\cdot 0.83})^2=0.076$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

حساب معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة:

من *(A.3)*:

$$\lambda=\frac{0.303}{(\lg 1.985\cdot 10^6-0.9)^2}=0.01$$

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المخرج:

من *(A.1)*:

$$D=\frac{4\cdot 0.91\cdot 0.74}{2\cdot(0.91+0.74)}=0.816\,m$$

السرعة عند المخرج من *(A.5)*:

$$V = \frac{16.5}{0.91 \cdot 0.74} = 24.5 m \setminus s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{24.5 \cdot 0.816}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.324 \cdot 10^{6}$$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 1.324 \cdot 10^{6} - 0.9\right)^{2}} = 0.011$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل والمخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.01 + 0.011}{2} = 0.0105$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = f' = \frac{1}{\sin 3} = 19.1 \quad , \qquad e = 1 - \left(\frac{0.5 \cdot 0.6}{0.91 \cdot 0.74}\right)^{2} = 0.445$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_{f} = \frac{0.0105}{16} \cdot 0.445 . \left(2 \cdot 19.1\right) = 0.01$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D1} = 0.01 + 0.076 = 0.086$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D1} = 0.086 \cdot \left(\frac{0.3}{0.3}\right)^{2} = 0.086$$

حسب *[30]*:

حساب معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة من *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{1.985 \cdot 10^6} + (\frac{0.0016 \Big/ 0.545}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.026$$

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المخرج: $D = 0.816\,m$

السرعة عند المخرج: $V = 24.5\,m \setminus s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

$$\mathrm{Re} = 1.324 \cdot 10^6$$

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{1.324 \cdot 10^6} + (\frac{0.0016 \Big/ 0.816}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.023$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.026 + 0.023}{2} = 0.0245$$

من *(18.2)*:

$$\zeta_{D1} = \left[\frac{0.0245}{8 \cdot \tan(3)} + 0.6 \cdot \tan(3) \right] \cdot \left[1 - \frac{(0.545)^4}{(0.816)^4} \right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(0.545)^4} = 0.072$$

1.2.2.1.1.11 المجمع *(2.1.1)*

يحسب معامل الفقد له من العلاقة *(2.2) [30,6,1]*، حيث القطر الهيدروليكي مساوي للقطر الهيدروليكي لقسم الاختبار $D = 0.545\,m$ والسرعة في هذا القسم مساوية للسرعة في قسم الاختبار $V = 55\ m/s$. طول المجمع مع فوهة التجميع الجرسية يبلغ $0.43\ m$.

حسب *[6,1]*:

قيمة معامل الاحتكاك في هذا القسم مساوية لقيمة معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة *(2.1)* $\lambda = 0.01$

يحسب معامل الفقد من العلاقة *(2.2)*:

$$\zeta = \frac{0.01 \cdot 0.43}{0.545} = 0.008$$

حسب *[30]*:

قيمة معامل الاحتكاك في هذا القسم مساوية لقيمة معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة *(2.1)* $\lambda = 0.026$

يحسب معامل الفقد من العلاقة *(2.2)*:

$$\zeta_{TS} = 0.026 \cdot \frac{1.6}{0.545} = 0.0763$$

2.2.2.1.11 الناشرة *(2.2)*

مقطع الدخول: *0.91 X 0.74 m* ، مقطع الخروج: $D = 1m$ ، طول الناشرة: *1.76 m* ، $\theta = 1^\circ, \alpha = 4^\circ$

حسب *[1]*:

يحسب القطر الهيدروليكي لمقطع الدخول من العلاقة *(A.1)*:

$$D = \frac{4 \cdot 0.91 \cdot 0.74}{2 \cdot (0.91 + 0.74)} = 0.816m$$

$$V = \frac{16.5}{0.91 \cdot 0.74} = 24.5 m \setminus s$$

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{24.5 \cdot 0.816}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.324 \cdot 10^6$$

حساب معامل الاحتكاك من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.0111}} = 2 \cdot \lg\left(1.324 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0.0111}\right) - 0.8$$

$$9.4 = 9.4$$

$$\lambda = 0.011$$

$$AR = \frac{\pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2}{0.91 \cdot 0.74} = 1.166$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{(1.166)^2}) . \frac{0.011}{8 . \sin 4} = 0.005$$

من *(17.5)*:

$$\zeta_e(\theta) = 0.1222 - 0.04590 \cdot 4 + 0.02203 \cdot 4^2 + 0.003269 \cdot 4^3$$
$$- 0.0006145 \cdot 4^4 - 0.00002800 \cdot 4^5 + 0.00002337 \cdot 4^6 = 0.15$$

من *(15.4)*:

$$\zeta_{ex} = 0.15.\left(\frac{1.166-1}{1.166}\right)^2 = 0.003$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D2} = 0.003 + 0.005 = 0.008$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D2} = 0.008 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74}\right)^2 = 0.002$$

حسب [6]:

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg\,4)^{5/4} = 0.223$$

من الشكل *(4.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.223 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{0.91 \cdot 0.74}{\pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2})^2 = 0.005$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.1)* $\lambda_{D2in} = 0.011$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج:

من *(A.5)*:

$$V = \frac{16.5}{\pi\left(\frac{1}{2}\right)^2} = 21 m \setminus s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{21 \cdot 1}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.39 \cdot 10^6$$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 1.39 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.011$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.011 + 0.011}{2} = 0.011$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = \frac{1}{\sin 4} = 14.33 \quad , \quad f' = \frac{1}{\sin 1} = 57.3 \quad , \qquad e = 1 - \left(\frac{0.91 \cdot 0.74}{\pi \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^2} \right)^2 = 0.265$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.011}{16} \cdot 0.265 .(14.33 + 57.3) = 0.013$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*: $\zeta_{D2} = 0.005 + 0.013 = 0.018$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D2} = 0.018 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74} \right)^2 = 0.002$$

حسب *[30]*:

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.1)* $\lambda_{D2in} = 0.023$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج: $V = 21 m \setminus s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج: $\mathrm{Re} = 1.39 \cdot 10^6$

حساب معامل الاحتكاك من *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{1.39 \cdot 10^6} + (\frac{0.0016 \diagup 1}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.0222$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.023 + 0.0222}{2} = 0.0226$$

من *(18.2)*:

$$\zeta_{D2}=\left[\frac{0.0226}{8\cdot\tan(4)}+0.6\cdot\tan(4)\right]\cdot\left[1-\frac{(0.816)^4}{(1)^4}\right]\cdot\frac{(0.545)^4}{(0.816)^4}=0.009$$

3.2.2.1.11 الناشرة *(2.3)*

مقطع الدخول: $D_{in}=1m$ ، مقطع الخروج: $D_{out}=1.05\,m$ ، $\theta=1^\circ$

حسب *[1]*:

حساب السرعة عند مقطع الدخول:

من *(A.5)*:

$$V=\frac{16.5}{\pi\left(\frac{1}{2}\right)^2}=21m\setminus s$$

حساب عدد رينولدز عند مقطع الدخول:

$$\mathrm{Re}=\frac{21\cdot1}{15.1\cdot10^{-6}}=1.39\cdot10^6$$

حساب معامل الاحتكاك من علاقة براندل *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.01}}=2\cdot\lg\left(1.39\cdot10^6\cdot\sqrt{0.01}\right)-0.8$$

$$9.5 = 9.5$$

$$\lambda=0.01$$

$$AR=\frac{(1.05)^2}{(1)^2}=1.1$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f=(1-\frac{1}{(1.1)^2}).\frac{0.01}{8.\sin 1}=0.014$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta)=0.09632-0.004152\cdot1=0.092$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex}=0.092.\left(\frac{1.1-1}{1.1}\right)^2=0.0007$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D3}=0.014+0.0007=0.0147$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D3} = 0.0147 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (1)^2 / 4} \right)^2 = 0.002$$

حسب *[6]*:

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 3.2 \cdot (tg1)^{5/4} = 0.02$$

من الشكل *(4.2)*: $k = 1.2$.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.02 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{(1)^2}{(1.05)^2})^2 = 0.0002$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.2)* $\lambda_{D2in} = 0.011$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج:

من *(A.5)*:

$$V = \frac{16.5}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2} \right)^2} = 19\, m/s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج:

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{19 \cdot 1.05}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.321 \cdot 10^6$$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 1.321 \cdot 10^6 - 0.9 \right)^2} = 0.011$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.011 + 0.011}{2} = 0.011$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = f' = \frac{1}{\sin 1} = 57.3 \quad , \quad e = 1 - \left(\frac{(1)^2}{(1.05)^2} \right)^2 = 0.18$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.011}{16} \cdot 0.18.(2 \cdot 57.3) = 0.014$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D3} = 0.0002 + 0.014 = 0.0142$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D3} = 0.0142 \cdot \left(\frac{0.3}{\frac{\pi}{4} \cdot (1)^2} \right)^2 = 0.002$$

حسب *[30]*:

معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.2)* $\lambda_{D2in} = 0.0222$.

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

السرعة عند المخرج: $V = 19 m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج: $\mathrm{Re} = 1.321 \cdot 10^6$

من *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{1.321 \cdot 10^6} + (\frac{0.0016 \Big/ 1.05}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.0219$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل والمخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.0222 + 0.0219}{2} = 0.022$$

من *(18.2)*:

$$\zeta_{D3} = \left[\frac{0.022}{8 \cdot \tan(1)} + 0.6 \cdot \tan(1) \right] \cdot \left[1 - \frac{(1)^4}{(1.05)^4} \right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(1)^4} = 0.0026$$

4.2.2.1.11 الناشرة القصيرة *(2.4)*:

مقطع الدخول: *1.25 X 1.05 m* ، مقطع الخروج: *1.5 X 1.25 m* ، نصف زاوية انفراج الناشرة من أجل البعد الصغير $\alpha = 8^\circ$ ، ونصف زاوية انفراج الناشرة من أجل البعد الكبير $\theta = 9^\circ$.

حسب *[1]*:

حساب السرعة عند مقطع الدخول:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{16.5}{1.05 \cdot 1.25} = 12.6 m/s$$

حساب القطر الهيدروليكي لمقطع الدخول:

$$D = \frac{4 \cdot A}{U} = \frac{4 \cdot 1.05 \cdot 1.25}{2 \cdot (1.05 + 1.25)} = 1.141 m$$

حساب عدد رينولدز عند مقطع الدخول:

$$\mathrm{Re} = \frac{12.6 \cdot 1.141}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 0.952 \cdot 10^6$$

حساب معامل الاحتكاك من علاقة براندل *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.011}} = 2 \cdot \lg\left(0.952 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0.011}\right) - 0.8$$

$$9.4 = 9.4$$

$$\lambda = 0.011$$

$$AR = \frac{1.5 \cdot 1.25}{1.05 \cdot 1.25} = 1.4$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{(1.4)^2}) . \frac{0.011}{8 . \sin 9} = 0.004$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta) = -0.01322 + 0.05866 \cdot 9 = 0.514$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.514 . \left(\frac{1.4 - 1}{1.4}\right)^2 = 0.041$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D4} = 0.004 + 0.041 = 0.045$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D4} = 0.045 \cdot \left(\frac{0.3}{1.05 \cdot 1.25}\right)^2 = 0.002$$

حسب *[6]*:

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg9)^{5/4} = 0.619$$

من الشكل *(4.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.619 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{1.25 \cdot 1.05}{1.25 \cdot 1.5})^2 = 0.067$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

حساب معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المدخل: $D = 1.141m$

السرعة عند المدخل: $V = 12.6m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج: $\mathrm{Re} = 0.952 \cdot 10^6$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 796052 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.012$$

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المخرج:

من *(A.1)*:

$$D = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 1.25}{2 \cdot (1.5 + 1.25)} = 1.363m$$

السرعة عند المخرج من *(A.5)*:

$$V = \frac{16.5}{1.5 \cdot 1.25} = 8.8m/s$$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{8.8 \cdot 1.363}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 794331$$

من *(A.3)*:

$$\lambda = \frac{0.303}{\left(\lg 794331 \cdot 10^6 - 0.9\right)^2} = 0.012$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.012 + 0.012}{2} = 0.012$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = \frac{1}{\sin 9} = 6.4 \quad , \quad f' = \frac{1}{\sin 8} = 7.185 \qquad e = 1 - \left(\frac{1.25 \cdot 1.05}{1.25 \cdot 1.5} \right)^2 = 0.091$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.012}{16} \cdot 0.91.(6.4 + 7.185) = 0.009$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D4} = 0.067 + 0.009 = 0.076$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D4} = 0.076 \cdot \left(\frac{0.3}{1.25 \cdot 1.05} \right)^2 = 0.004$$

حسب *[30]*:

حساب معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المدخل: $D = 1.141m$

السرعة عند المدخل: $V = 12.6m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الدخول: $\mathrm{Re} = 0.952 \cdot 10^6$

من *(19.2)*:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{796052} + (\frac{0.0016 \Big/ 0.954}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.0225$$

حساب معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة:

القطر الهيدروليكي عند المخرج: $D = 1.363m$

السرعة عند المخرج: $V = 8.8m/s$

عدد رينولدز المحسوب استناداً لسرعة الخروج: $\mathrm{Re} = 794331$

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{794331} + (\frac{0.0016 \Big/ 1.363}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.02$$

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.0225 + 0.02}{2} = 0.021$$

من (18.2):

$$\zeta_{d4} = \left[\frac{0.021}{8 \cdot \tan(9)} + 0.6 \cdot \tan(9)\right] \cdot \left[1 - \frac{(0.954)^4}{(1.363)^4}\right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(0.954)^4} = 0.008$$

3.2.1.11 الأكواع *(3)*

حسب *[30,1]*:

1.3.2.1.11 الكوع *(3.1)*

قياس مقطع الكوع: *0.91 X 0.74 m.*

$$V = \frac{16.5}{0.91 \cdot 0.74} = 24.5 m \setminus s$$

من (A.2):

$$\mathrm{Re} = \frac{24.5 \cdot 0.136}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 220662$$

من (27.2):

$$\zeta_{c1} = 0.1 + \frac{4.55}{(\lg 220662)^{2.58}} = 0.16$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c1} = 0.16 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74}\right)^2 = 0.0317$$

2.3.2.1.11 الكوع *(3.2)*

قياس مقطع الكوع *(3.2)* نفس قياس مقطع الكوع *(3.1)*: *0.91 X 0.74 m* ، و بالتالي يملك نفس معامل الفقد:

$$\zeta_{c2} = 0.16$$

معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار:

$$\zeta'_{c2} = 0.0317$$

3.3.2.1.11 الكوع *(3.3)*

قياس مقطع الكوع: *1.25 X 1.05 m.*

السرعة هي نفس السرعة عند مدخل الناشرة القصيرة *(2.4)* وتساوي $12.6 m/s$

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{12.6 \cdot 0.136}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 113483$$

من (27.2):

$$\zeta_{c3} = 0.1 + \frac{4.55}{(\lg 113483)^{2.58}} = 0.17$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c3} = 0.17 \cdot \left(\frac{0.3}{1.25 \cdot 1.05}\right)^2 = 0.009$$

4.3.2.1.11 الكوع *(3.4)*

قياس مقطع الكوع *(3.4)* نفس قياس مقطع الكوع *(3.3)*: *1.05 X 1.25 m* ، و بالتالي يملك نفس معامل الفقد:

$$\zeta_{c4} = 0.17$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c4} = 0.152 \cdot \left(\frac{0.3}{1.25 \cdot 1.05}\right)^2 = 0.009$$

حسب *[6]*:

من الجدول *(3.2)* و بما أن الأكواع الأربعة في دارة القناة الهوائية مستطيلة وريش التوجيه التي نود استخدامها هي بشكل جناح حامل و النسبة $\frac{r}{b_0} = 0 - 1$ ، و بالتالي فإنه حسب الجدول *(3.2)* قيمة معامل الفقد في الأكواع المستخدمة هي

$$\zeta_{C1} = \zeta_{C2} = \zeta_{C3} = \zeta_{C4} = 0.33$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{c1} = \zeta'_{c2} = 0.33 \cdot \left(\frac{0.3}{0.83}\right)^2 = 0.043$$

$$\zeta'_{c3} = \zeta'_{c4} = 0.33 \cdot \left(\frac{0.3}{1.05 \cdot 1.25}\right)^2 = 0.017$$

4.2.1.11 قسم وصل *(5)*

وهو ذو مقطع مستطيل أبعاده *0.91 X 0.74 m* و طوله *L=1 m*.

القطر الهيدروليكي هو نفس القطر الهيدروليكي لمدخل الناشرة *(2.2) D = 0.816 m*

معامل الاحتكاك لهذا القسم هو نفس معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة *(2.2)* وهـــو حســـب *[6,1]* $\lambda = 0.011$ وحسب *[30]* $\lambda = 0.023$.

حسب *[6,1]*

$$\zeta_1 = 0.011 \cdot \frac{1}{0.816} = 0.013$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_1' = 0.013 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74} \right)^2 = 0.003$$

حسب *[30]*

$$\zeta_1 = 0.023 \cdot \frac{1}{0.816} = 0.028$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_1' = 0.028 \cdot \left(\frac{0.3}{0.91 \cdot 0.74} \right)^2 = 0.0055$$

5.2.1.11 قسم المروحة *(6)*

وهو ذو مقطع دائري بقطر $D = 1\ m$ وطوله $L=1.8\ m$.

معامل الاحتكاك في هذا القسم هو نفس معامل الاحتكاك عند مدخل الناشرة *(2.3)* ويساوي حسب *[1] 0.01* وحسب *[6]* يساوي *0.011*، وحسب *[30]* يساوي *0.0222*.

حساب معامل الفقد **حسب *[1]***:

$$\zeta = 0.01 \cdot \frac{1.8}{1} = 0.018$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.018 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (0.5)^2} \right)^2 = 0.0026$$

حسب *[6]*:

$$\zeta = 0.011 \cdot \frac{1.8}{1} = 0.0198$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.0198 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (0.5)^2} \right)^2 = 0.0028$$

حسب *[30]*:

$$\zeta = 0.0222 \cdot \frac{1.8}{1} = 0.03996$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.03996 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (0.5)^2} \right)^2 = 0.006$$

6.2.1.11 معامل مقاومة المروحة حسب *[6]*

من *(A.6)* نجد معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم المروحة:

$$\zeta_f = 0.25.0.4 \cdot \frac{1}{(1-0.4)^3} = 0.463$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta' = 0.463 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot \left(\frac{1.08}{2} \right)^2} \right)^2 = 0.045$$

7.2.1.11 مقطع انتقالي *(7)*

أبعاد مقطع الدخول (دائري): $D = 1.05\ m$، أبعاد مقطع الخروج (مستطيل): $1.25\ X\ 1.05\ m$، الطـــول: $2.3\ m$،

$\theta = 2^\circ$

حسب *[1]*:

حساب معامل الاحتكاك عند مقطع الدخول:

من *(A.5)*:

$$V = \frac{16.5}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2} \right)^2} = 19\, m \setminus s$$

من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re} = \frac{19 \cdot 1.05}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 1.321 \cdot 10^6$$

من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.0111}} = 2 \cdot \lg\left(1.321 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0.0111}\right) - 0.8$$

$$9.4 = 9.4$$

$$\lambda = 0.011$$

$$AR = \frac{1.25 \cdot 1.05}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2} = 1.516$$

من *(14.2)*:

$$\zeta_f = (1 - \frac{1}{(1.516)^2}).\frac{0.011}{8.\sin 2} = 0.022$$

من *(17.2)*:

$$\zeta_e(\theta) = 0.1222 - 0.04590 \cdot 2 + 0.02203 \cdot 2^2 + 0.003269 \cdot 2^3$$
$$- 0.0006145 \cdot 2^4 - 0.00002800 \cdot 2^5 + 0.00002337 \cdot 2^6 = 0.127$$

من *(15.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.127.\left(\frac{1.516 - 1}{1.516}\right)^2 = 0.015$$

من *(13.2)*:

$$\zeta_{D2} = 0.022 + 0.015 = 0.037$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{D2} = 0.037 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2}\right)^2 = 0.004$$

حسب [6]:

حساب معامل الفقد الناتج عن التوسع:

من *(21.2)*:

$$\varphi_{ex} = 6.2 \cdot (tg\, 2)^{5/4} = 0.093$$

من الشكل *(4.2)*: *k = 1.2*.

من *(20.2)*:

$$\zeta_{ex} = 0.093 \cdot 1.2 \cdot (1 - \frac{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2}\right)^2}{1.25 \cdot 1.05})^2 = 0.036$$

حساب معامل الفقد الناتج عن الاحتكاك:

معامل الاحتكاك عند مدخل المقطع هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.3)* $\lambda = 0.011$.

معامل الاحتكاك عند مخرج المقطع هو نفسه المحسوب عند مدخل الناشرة *(2.4)* $\lambda = 0.012$.

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.011 + 0.012}{2} = 0.0115$$

حساب المعاملات e ، f ، f' :

من *(24.2)*:

$$f = \frac{1}{\sin 2} = 28.65 \quad , \qquad e = 1 - \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{1.05}{2} \right)^2}{1.25 \cdot 1.05} \right)^2 = 0.564$$

من *(23.2)*:

$$\zeta_f = \frac{0.0115}{16} \cdot 0.564.(28.65) = 0.012$$

معامل الفقد الكلي منسوباً للسرعة عند المدخل:

من *(13.2)*:

$$\zeta_2 = 0.036 + 0.012 = 0.048$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_2' = 0.048 \cdot \left(\frac{0.3}{\pi \cdot (1.05/2)^2} \right)^2 = 0.006$$

حسب [30]:

حساب الزاوية المكافئة من *(A.7)*:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1.05 - 0.954}{2 \cdot 2.3} \right) = 1.2^\circ$$

معامل الاحتكاك عند مدخل المقطع هو نفسه المحسوب عند مخرج الناشرة *(2.3)* $\lambda = 0.0219$.

معامل الاحتكاك عند مخرج المقطع هو نفسه المحسوب عند مدخل الناشرة *(2.4)* $\lambda = 0.0225$.

حساب معامل الاحتكاك الوسطي بين المدخل و المخرج:

$$\lambda = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{2} = \frac{0.0219 + 0.0225}{2} = 0.0222$$

$$\zeta = \left[\frac{0.0222}{8 \cdot \tan(1.2)} + 0.6 \cdot \tan(1.2) \right] \cdot \left[1 - \frac{(0.954)^4}{(1.05)^4} \right] \cdot \frac{(0.545)^4}{(0.954)^4} = 0.005$$

8.2.1.11 حجرة تهدئة واستقرار الجريان *(8)*

أبعادها: *1.25 X 1.5* بطول *1.266 m*

حسب *[1]*:

حساب القطر الهيدروليكي من *(A.1)*:

$$D = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 1.25}{2 \cdot (1.5 + 1.25)} = 1.363 m$$

حساب السرعة:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{16.5}{1.5 \cdot 1.25} = 8.8 m/s$$

حساب عدد رينولدز من *(A.2)*:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{8.8 \cdot 1.363}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 794331$$

حساب معامل الاحتكاك من *(4.2)*:

$$\frac{1}{\sqrt{0.0121}} = 2 \cdot \lg\left(794331 \cdot \sqrt{0.0121}\right) - 0.8$$

$$9 = 9$$

$$\lambda = 0.012$$

$$\zeta_{sd} = 0.012 \cdot \frac{1.266}{1.363} = 0.011$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{sd} = 0.011 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25}\right)^2 = 0.0002$$

حسب *[6]*:

القطر الهيدروليكي هو نفس القطر الهيدروليكي لمخرج الناشرة *(2.4) D = 1.363 m*

معامل الاحتكاك لهذا القسم هو نفس معامل الاحتكاك عند مخرج الناشرة *(2.4)* و هو $\lambda = 0.012$

$$\zeta_1 = 0.012 \cdot \frac{1.266}{1.363} = 0.011$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_1' = 0.011 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.0003$$

حسب *[30]*:

حساب معامل الاحتكاك:

$$\lambda = \left(1 \Big/ -1.8 \cdot \log[\frac{6.9}{794331} + (\frac{0.0016 \Big/ 1.363}{3.7})^{1.11}] \right)^2 = 0.02$$

$$\zeta_{sd} = 0.02 \cdot \frac{1.266}{1.363} \cdot \left(\frac{0.545}{1.363} \right)^4 = 0.0004$$

9.2.1.11 خلايا عش النحل *(8.1)*

حسب *[30,1]*:

من أجل خلايا عش نحل فيها النسبة:

$$\frac{L_h}{D_h} = 6$$

فإن قيمة معامل الفقد منسوبة للسرعة في حجرة تهدئة واستقرار الجريان:

$$\zeta_h = 0.2$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_h' = 0.2 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.005$$

حسب *[6]*:

من *(35.2)*:

$$\lambda_h = 0.214 \cdot \left(\frac{0.0016}{0.0173} \right)^{0.4} = 0.0825$$

$\beta_h = 0.7$ ، و بالتالي من *(33.2)*:

$$\zeta_h = 0.0825 \cdot (6 + 0.3) \cdot (0.7)^2 + (0.7 - 1)^2 = 0.344$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_h' = 0.344 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.009$$

10.2.1.11 المناخل *(8.2)*

حسب *[1]*:

سوف نستخدم مناخل ذات مسامية $\beta = 0.65$ ، و بالتالي $\sigma = 1 - \beta = 1 - 0.65 = 0.35$

و قطر سلك المنخل المستخدم $d = 94\,\mu m$ فإن:

$$\mathrm{Re}_w = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{8.8 \cdot 94 \cdot 10^{-6}}{15.1 \cdot 10^{-6}} = 54.78$$

باستخدام سلك معدني دائري فإنه حسب *[1]* $\zeta_{mesh} = 1.3$

من *(43.2)*:

$$\zeta_{Rn} = \left[0.785 \cdot \left(1 - \frac{54.78}{354} \right) + 1.01 \right] = 1.67$$

من *(42.2)*:

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta_{sc} = 1.3 \cdot 1.67 \cdot 0.35 \ + \frac{(0.35)^2}{(0.65)^2} = 0.29$$

$$\zeta'_{sc} = 0.29 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.007$$

من أجل منخلين:

$$\zeta'_{sctot} = 0.005 \cdot 2 = 0.014$$

حسب *[6]*:

من *(48.2)*:

$$\zeta_{sc} = 1.3 \cdot (1 - 0.65) + \left(\frac{1}{0.65} - 1 \right)^2 = 0.745$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_{sc} = 0.745 \cdot \left(\frac{0.3}{1.5 \cdot 1.25} \right)^2 = 0.019$$

من أجل منخلين:

$$\zeta'_{sctot} = 0.019 \cdot 2 = 0.038$$

حسب *[30]*:

$$V_{SC} = {V_{TS}}/{CR} = \frac{55}{6.25} = 8.8\,m/s$$

على اعتبار أننا سوف نستخدم مناخل ذات مسامية $\beta = 0.65$ ، و قطر سلك المنخل المستخدم $d = 94\,\mu m$ فإن:

$$\frac{V_{SC}\cdot d_{SC}}{\beta\cdot\nu}=\frac{8.8\cdot 94\cdot 10^{-6}}{0.65\cdot 15.1\cdot 10^{-6}}=84$$

من *(44.2)*:

$$\zeta_{SC}=6.5\cdot\frac{(1-0.65)}{0.65^{5/3}}\cdot(84)^{-1/3}\cdot(\frac{0.545}{1.363})^4=0.026$$

من أجل منخلين:

$$\zeta'_{sc\,tot}=0.026\cdot 2=0.052$$

11.2.1.11 النفاثة *(9)*

حسب *[1]*:

معامل الاحتكاك عند مدخل النفاثة هو نفسه لحجرة استقرار الجريان وهو: $\lambda=0.012$. و معامل الاحتكاك عند مخرجها هو نفسه لقسم المجمع ويساوي $\lambda=0.01$

حسب *[1]* فإن معامل الاحتكاك في هو متوسط معاملي الاحتكاك عند مدخل النفاثة و مخرجها.

$$\lambda=\frac{0.01+0.012}{2}=0.011$$

من *(55.2)*:

$$\zeta_n=0.32\cdot 0.011\cdot\frac{1.384}{0.545}=0.009$$

حسب *[6]*:

معامل الاحتكاك عند مدخل النفاثة هو نفسه لحجرة استقرار الجريان وهو: $\lambda=0.012$. و معامل الاحتكاك عند مخرجها هو نفسه لقسم الاختبار وهو: $\lambda=0.01$

$$\lambda=\frac{0.01+0.012}{2}=0.011$$

من *(56.2)* عند المدخل:

$$\zeta_{nin}=\frac{4}{9}\cdot 0.011\cdot\frac{1.384}{1.363}\cdot\frac{(6.25)^{9/2}-1}{(6.25)^{5/2}\cdot(6.25-1)}=0.037$$

عند المخرج:

$$\zeta_{nout}=\frac{4}{9}\cdot 0.011\cdot\frac{1.384}{0.545}\cdot\frac{(6.25)^{9/2}-1}{(6.25)^{5/2}\cdot(6.25-1)}=0.092$$

سنعتمد قيمة وسطية بين المدخل و المخرج:

$$\zeta_n = \frac{\zeta_{nin} + \zeta_{nout}}{2} = \frac{0.037 + 0.092}{2} = 0.0645$$

حساب معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار من *(A.4)*:

$$\zeta'_n = 0.0645 \cdot \left(\frac{0.3}{\frac{0.3 + (1.5 \cdot 1.25)}{2}} \right)^2 = 0.005$$

حسب [30]:

معامل الاحتكاك عند مدخل النفاثة هو نفسه لحجرة استقرار الجريان وهو: $\lambda = 0.02$. و معامل الاحتكاك عند مخرجها هو نفسه لقسم المجمع ويساوي $\lambda = 0.026$

حسب *[30]* فإن معامل الاحتكاك في هو متوسط معاملي الاحتكاك عند مدخل النفاثة و مخرجها.

$$\lambda = \frac{0.02 + 0.026}{2} = 0.023$$

من *(55.2)*:

$$\zeta_n = 0.32 \cdot 0.023 \cdot \frac{1.384}{0.545} = 0.0186$$

12.2.1.11 حساب الاستطاعة المطلوبة للمروحة واستطاعة محركها

حسب [1]:

من *(A.10)*:

$$\Sigma\zeta'_i = 0.206 + 0.014 + 0.089 + 0.008 + 0.002 + 0.002 + 0.002 + 0.0317 + 0.0317 + 0.009 + 0.009 + 0.003 + 0.026 + 0.045 + 0.004 + 0.0002 + 0.005 + 0.014 + 0.009 = 0.4872$$

من *(A.9)*:

$$\Delta Pv_{tot} = 0.4872 \cdot \frac{1.23}{2}(55)^2 = 906.3\ pa$$

من *(A.8)*:

$$N = 906.3 \cdot 16.5 = 14953\ W = 14.953\ kW$$

من *(A.11)*:

$$P = \frac{14.953}{0.68} = 21.98[kW]$$

حسب *[6]*:

من *(A.10)*:

$$\Sigma\zeta_i' = 0.182 + 0.014 + 0.086 + 0.008 + 0.002 + 0.002 + 0.004 + 0.043 + 0.043 + 0.017 + 0.017 + 0.003 + 0.0028 + 0.045 + 0.006 + 0.0003 + 0.009 + 0.038 + 0.005 = 0.5271$$

من *(A.9)*:

$$\Delta Pv_{tot} = 0.5271 \cdot \frac{1.23}{2}(55)^2 = 980.6\ pa$$

من *(A.8)*:

$$N = 980.6 \cdot 16.5 = 16179\ W = 16.179\ kW$$

من *(A.11)*:

$$P = \frac{16.179}{0.68} = 23.8[kW]$$

حسب *[30]*:

من *(A.10)*:

$$\Sigma\zeta_i' = 0.206 + 0.014 + 0.072 + 0.0763 + 0.009 + 0.0026 + 0.008 + 0.0317 + 0.0317 + 0.009 + 0.009 + 0.0055 + 0.006 + 0.045 + 0.005 + 0.0004 + 0.005 + 0.052 + 0.0186 = 0.6068$$

من *(A.9)*:

$$\Delta Pv_{tot} = 0.6068 \cdot \frac{1.23}{2}(55)^2 = 1128.8\ pa$$

من *(A.8)*:

$$N = 1128.8 \cdot 16.5 = 18625\ W = 18.625\ kW$$

من *(A.11)*:

$$P = \frac{18.625}{0.68} = 27.3[kW]$$

والجدول *(A.1)* يوضح نتائج الحسابات للتمكن من مقارنتها.

مع مراعاة تغير المردود والاستطاعة خلال فترة تشغيلها الطويلة ولضمان تشغيل القناة بالشروط المطلوبة فإننا سنختار مجموعة المحرك والمروحة بحيث تكون استطاعة المحرك بحدود *35 kW – 30* وتزايد الضغط الذي تولده المروحة بحدود *1400 Pa – 1300*. هذه القيم متقاربة مع قيم استطاعة المحركات المركبة في عدد من الأقنية الهوائية المماثلة (جامعة ريجنزبورغ، شركة كروما، جامعة روستوك).

الجدول *(A.1)*: نتائج الحسابات الأيروديناميكية:

العنصر	معامل الفقد منسوباً للسرعة في قسم الاختبار					
	حسب *[1]*		حسب *[6]*		حسب *[30]*	
	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق	مفتوح	مغلق
قسم الاختبار *(1)*	*0.206*	*0.0293*	*0.182*	*0.0293*	*0.206*	*0.0766*
النموذج	*0.014*	*0.014*	*0.014*	*0.014*	*0.014*	*0.014*
الناشرة *(2.1)*	*0.089*	*0.089*	*0.086*	*0.086*	*0.072*	*0.072*
المجمع *(2.1.1)*	*0.008*	*0.004*	*0.008*	*0.004*	*0.0763*	*0.011*
الناشرة *(2.2)*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.009*	*0.009*
الناشرة *(2.3)*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.002*	*0.0026*	*0.0026*
الناشرة القصيرة *(2.4)*	*0.002*	*0.002*	*0.004*	*0.004*	*0.008*	*0.009*
الكوع *(3.1)*	*0.0317*	*0.032*	*0.043*	*0.043*	*0.0317*	*0.032*
الكوع *(3.2)*	*0.0317*	*0.032*	*0.043*	*0.043*	*0.0317*	*0.032*
الكوع *(3.3)*	*0.009*	*0.009*	*0.017*	*0.017*	*0.009*	*0.009*
الكوع *(3.4)*	*0.009*	*0.009*	*0.017*	*0.017*	*0.009*	*0.009*
قسم وصل *(5)*	*0.003*	*0.003*	*0.0024*	*0.003*	*0.0055*	*0.0055*
قسم المروحة *(6)*	*0.0026*	*0.003*	*0.0026*	*0.0028*	*0.006*	*0.006*
المروحة	*0.045*	*0.045*	*0.045*	*0.045*	*0.045*	*0.045*
مقطع انتقالي *(7)*	*0.004*	*0.004*	*0.006*	*0.006*	*0.005*	*0.005*
حجرة استقرار الجريان *(8)*	*0.0002*	*0.0003*	*0.0003*	*0.0003*	*0.0004*	*0.0004*
خلايا عش النحل *(8.1)*	*0.005*	*0.005*	*0.009*	*0.009*	*0.005*	*0.005*
المناخل *(8.2)*	*0.014*	*0.01*	*0.038*	*0.038*	*0.052*	*0.052*
النفاثة *(9)*	*0.009*	*0.009*	*0.005*	*0.005*	*0.0186*	*0.0186*
مجموع معاملات الفقد	*0.4872*	*0.3036*	*0.3696*	*0.5271*	*0.6068*	*0.4137*
انخفاض الضغط الكلي *[Pa]*	*906.3*	*672.17*	*818.3*	*980.6*	*1128.8*	*915.9*
الاستطاعة المطلوبة للمروحة *[kW]*	***14.953***	***12.099***	***14.729***	***16.179***	***18.625***	***16.486***
الاستطاعة المطلوبة للمحرك *[kW]*	***21.98***	***17.8***	***21.66***	***23.8***	***27.3***	***24.24***

2.11 الملحق *B*

المخططات التنفيذية لتصنيع القناة الهوائية

1.2.11 منظور القناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مغلقاً 202

1.1.2.11 مسقط أمامى للقناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مغلقاً 203

2.2.11 منظور القناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مفتوحاً 204

1.2.2.11 مسقط أمامى للقناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مفتوحاً 205

3.2.11 منظور الهيكل الحامل للقناة الهوائية 206

1.3.2.11 تثبيت القناة على الحامل 207

4.2.11 مخططات قسم الاختبار 208

1.4.2.11 تثبيت دواليب حامل قسم الاختبار وتثبيت القناة بالأرض 211

5.2.11 مخططات المجمع 212

1.5.2.11 منظور فوهة التجميع الخاصة بقسم الاختبار المفتوح 214

6.2.11 مخططات الناشرة الأولى 216

7.2.11 مخططات الكوع الأول والثاني 218

1.7.2.11 ريش التوجيه في الكوع الأول والثاني 223

8.2.11 مخططات الناشرة الثانية 225

1.8.2.11 منظور قسمى الناشرة الثانية 226

9.2.11 مخططات قسم المروحة 228

10.2.11 مخططات الناشرة الثالثة 230

11.2.11 مخططات المقطع الانتقالى 232

12.2.11 مخططات الكوع الثالث والرابع 235

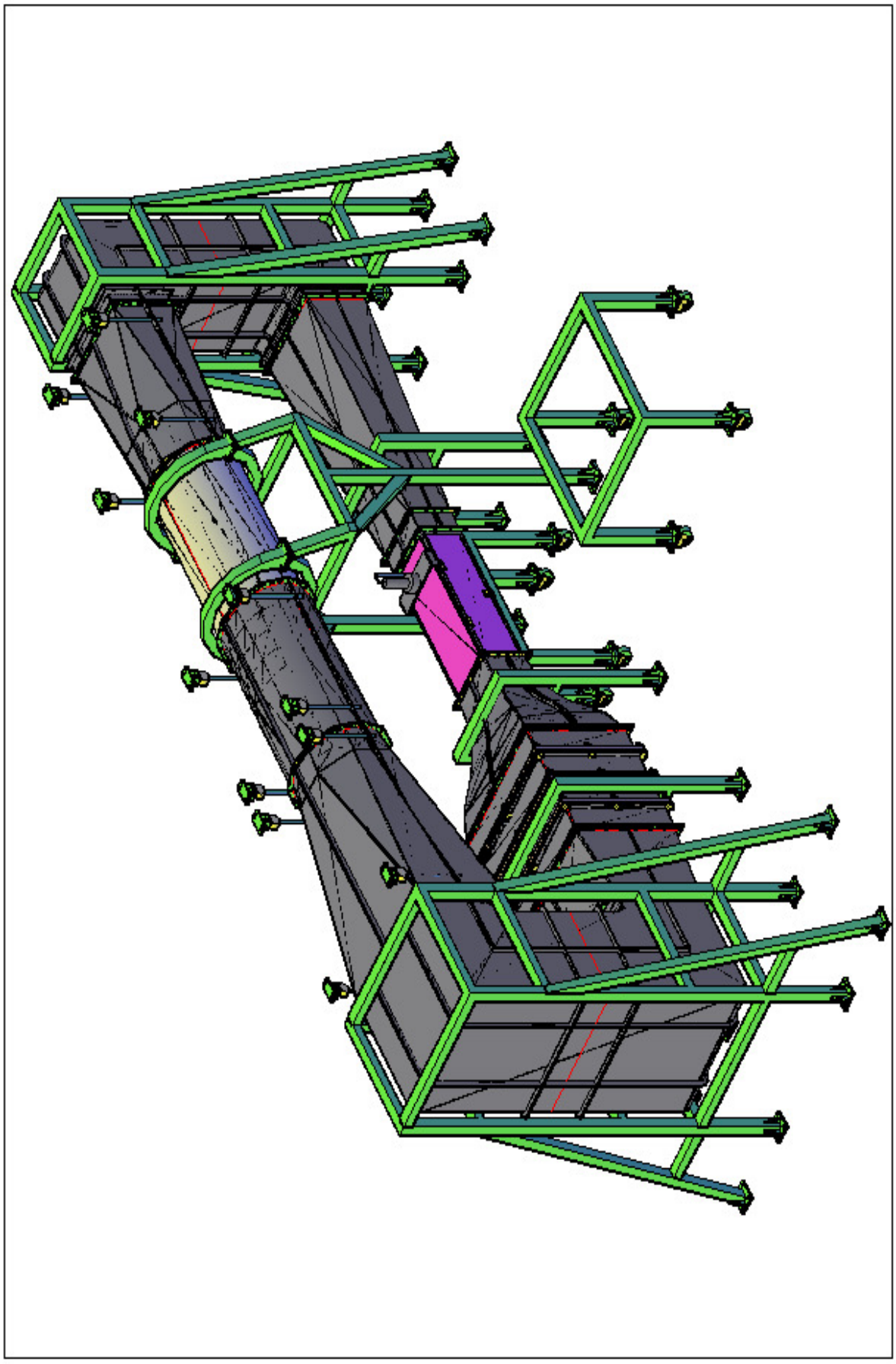
1.12.2.11 ريش التوجيه في الكوع الثالث والرابع 240

13.2.11 مخططات الناشرة القصيرة 242

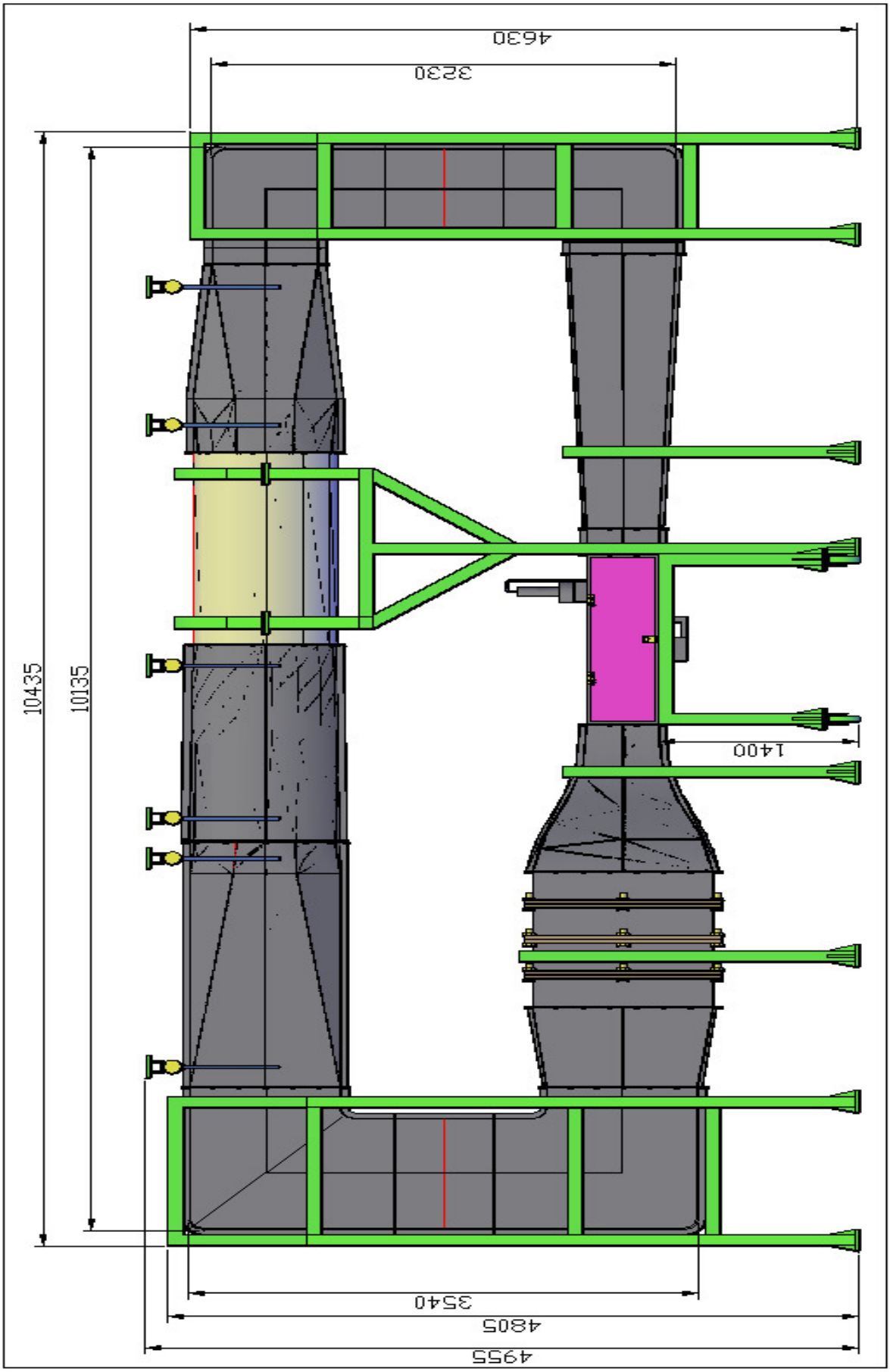
14.2.11 مخططات حجرة تهدئة واستقرار الجريان 244

15.2.11 مخططات النفاثة 246

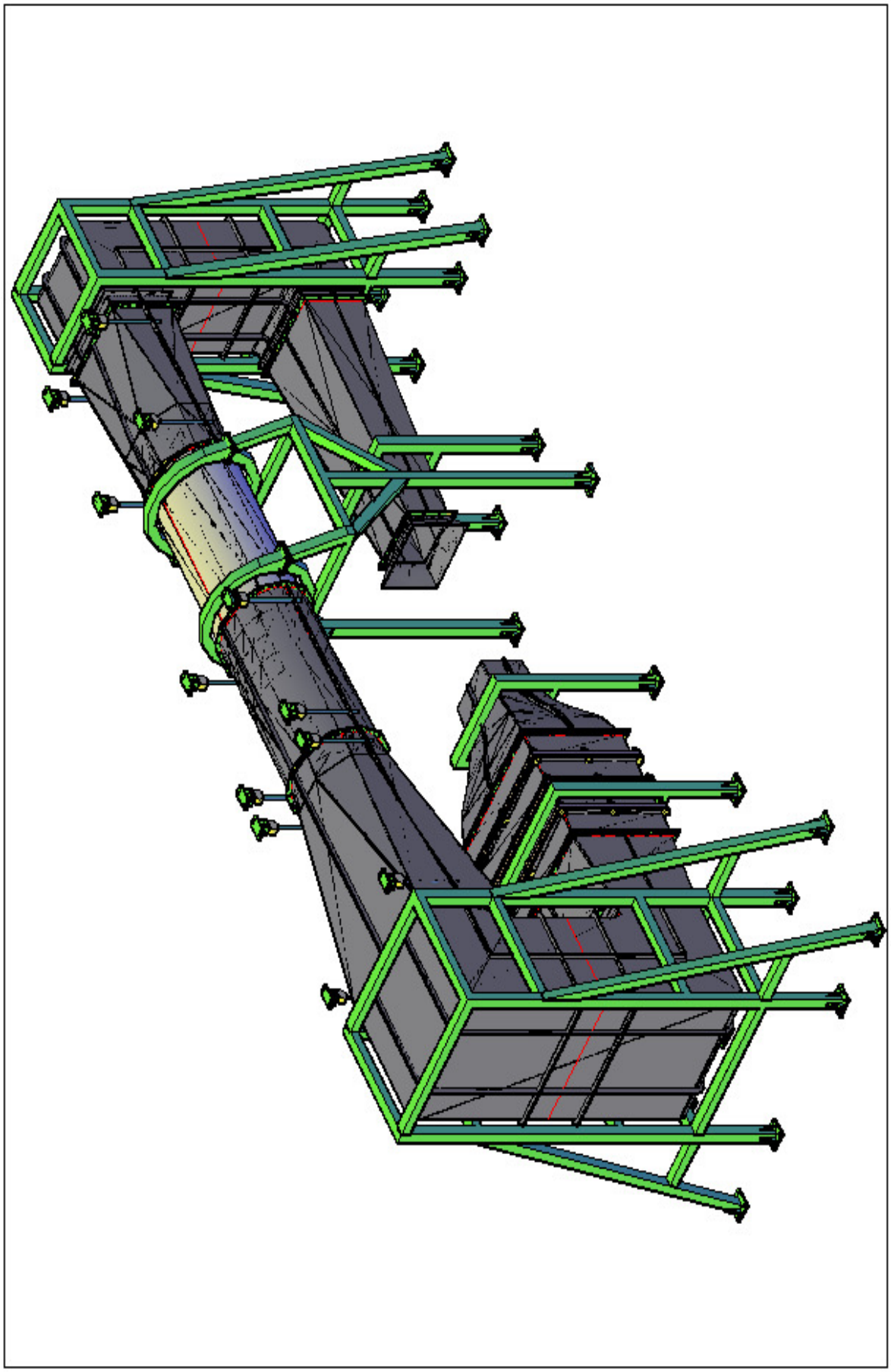
1.2.11 منظور القناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مغلقاً



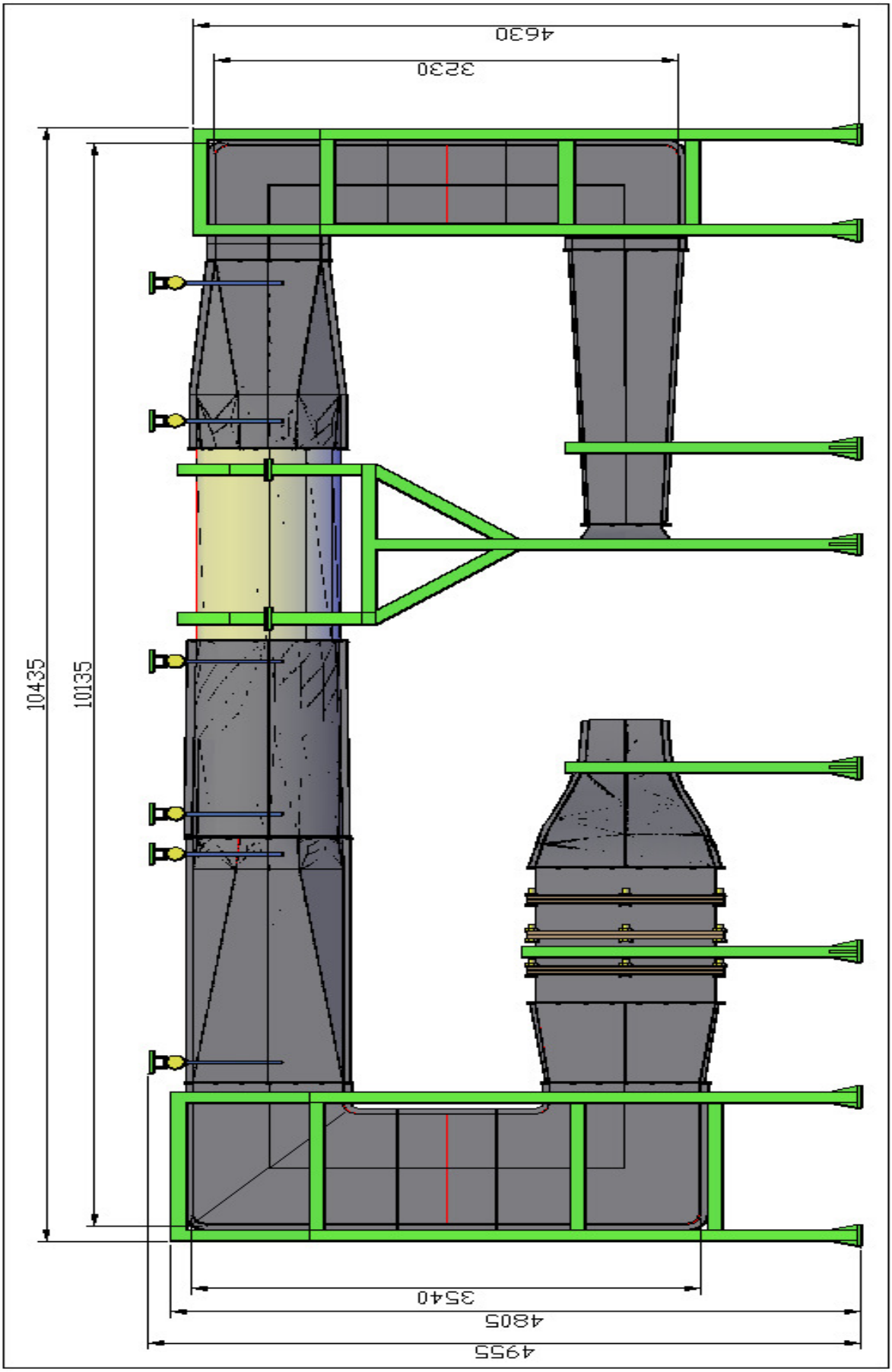
1.1.2.11 مسقط أمامي للقناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مغلقاً



2.2.11 منظور القناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مفتوحاً



1.2.2.11 مسقط أمامي للقناة الهوائية في حال كون قسم الاختبار مفتوحاً

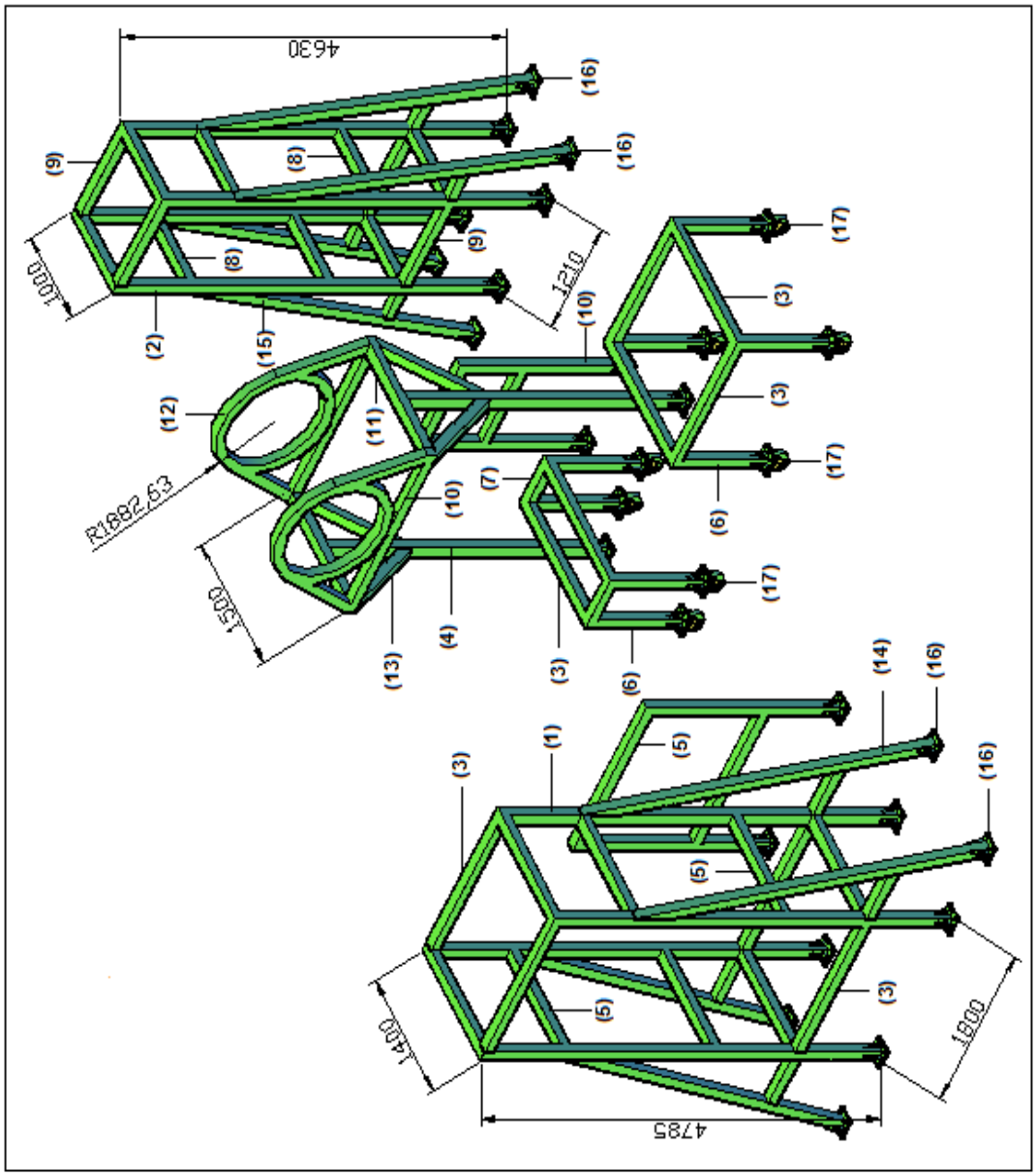


3.2.11 منظور مكونات الهيكل الحامل للقناة الهوائية

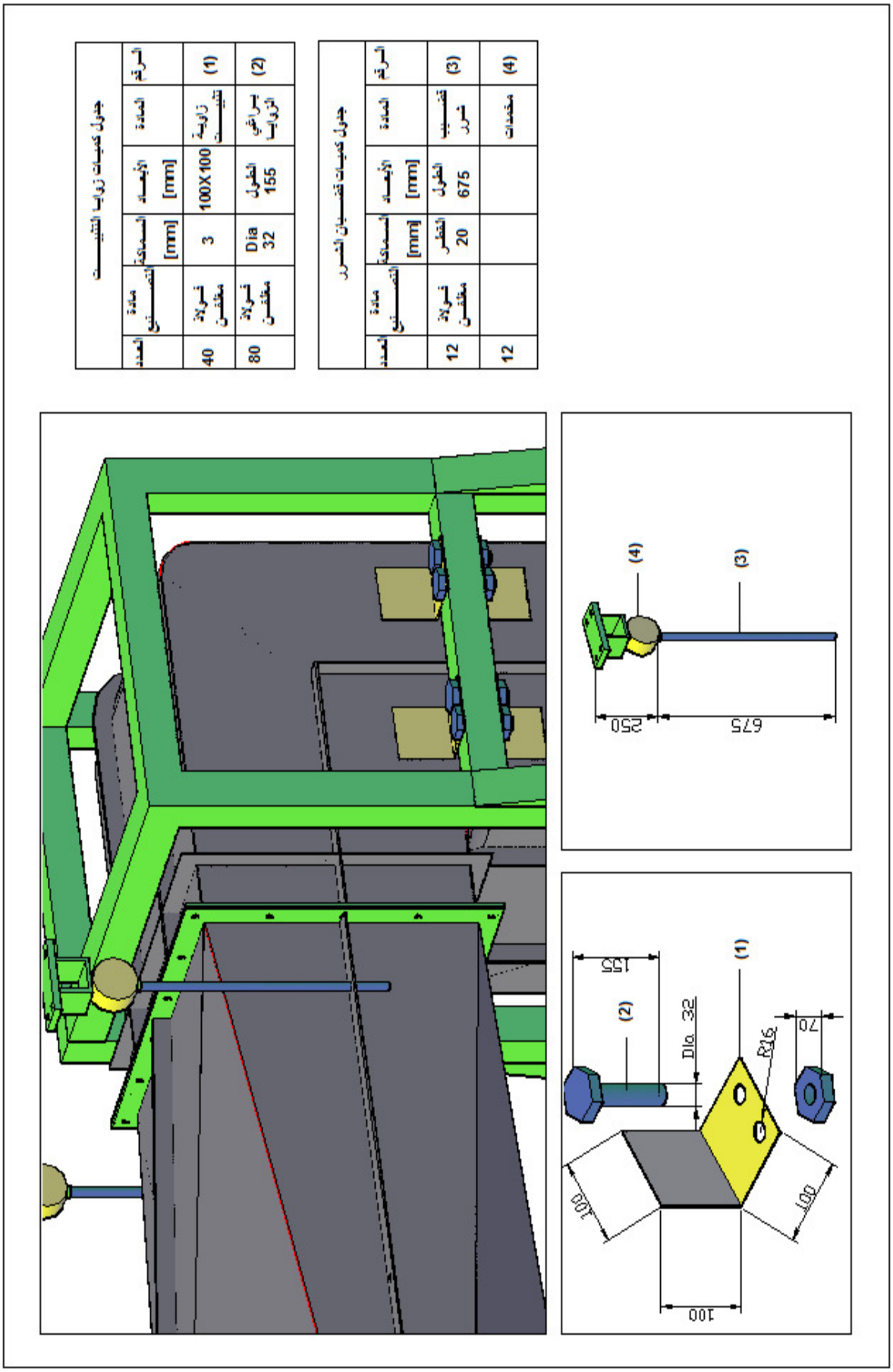
الرقم	المادة	الأبعاد [mm]	السماكة [mm]	مادة التصنيع	العدد
(1)	قطبان مربعة	4785X100	3	فولاذ مقاوم	4
(2)	قطبان مربعة	4630X100	3	فولاذ مقاوم	4
(3)	قطبان مربعة	1600X100	3	فولاذ مقاوم	10
(4)	قطبان مربعة	3460X100	3	فولاذ مقاوم	2
(5)	قطبان مربعة	1200X100	3	فولاذ مقاوم	10
(6)	قطبان مربعة	1035X100	3	فولاذ مقاوم	8
(7)	قطبان مربعة	400X100	3	فولاذ مقاوم	2
(8)	قطبان مربعة	800X100	3	فولاذ مقاوم	8
(9)	قطبان مربعة	1010X100	3	فولاذ مقاوم	4
(10)	قطبان مربعة	2000X100	3	فولاذ مقاوم	4
(11)	قطبان مربعة	1300X100	3	فولاذ مقاوم	2
(12)	قطبان مربعة دائرية	قطر خارجي 1300 قطر داخلي 1100	3	فولاذ مقاوم	2
(13)	قطبان مربعة	1220X100	3	فولاذ مقاوم	4
(14)	قطبان مربعة	3930X100	3	فولاذ مقاوم	4
(15)	قطبان مربعة	3795X100	3	فولاذ مقاوم	4
(16)	صفائح تثبيت	200X200	20	فولاذ مقاوم	26
(17)	عجلات	الارتفاع 235			8
	براغي	الطول 100	القطر 20	فولاذ مقاوم	104

مع ملاحظة ان مساحة مقطع جميع القضبان المربعة 100X100

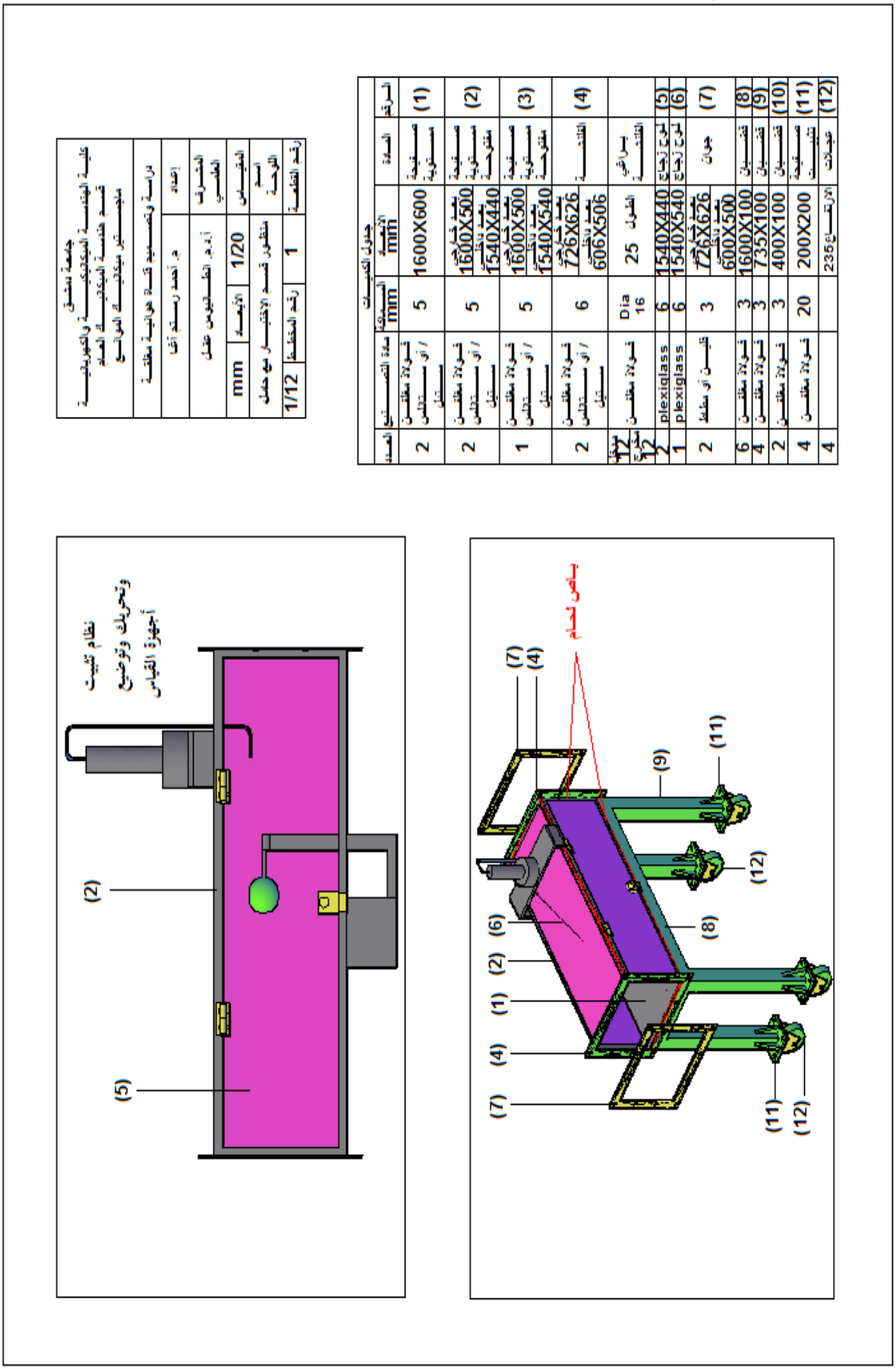
جدول كميات قضبان التثبيت

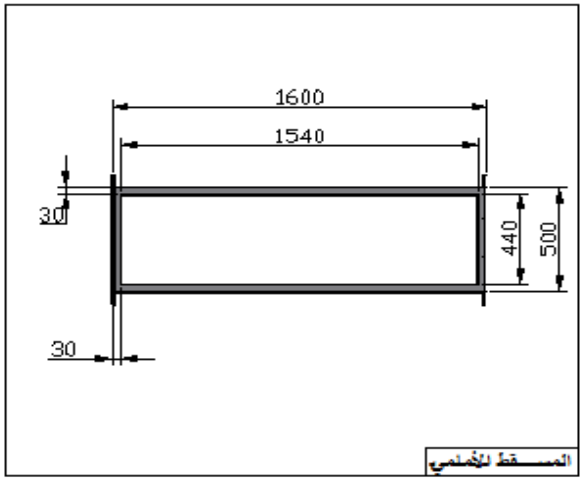


1.3.2.11 تثبيت القناة على الحامل

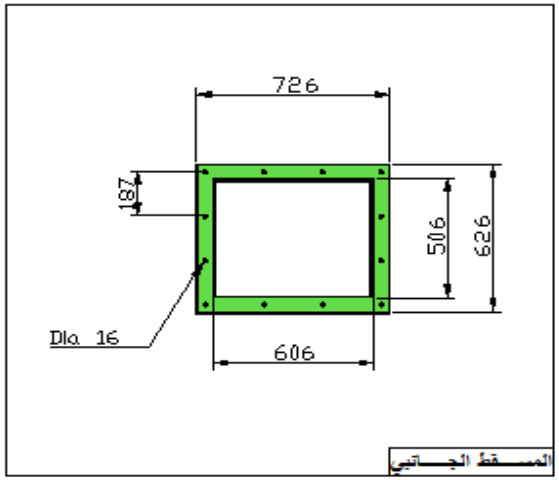


4.2.11 مخططات قسم الاختبار





المسقط الأمامي

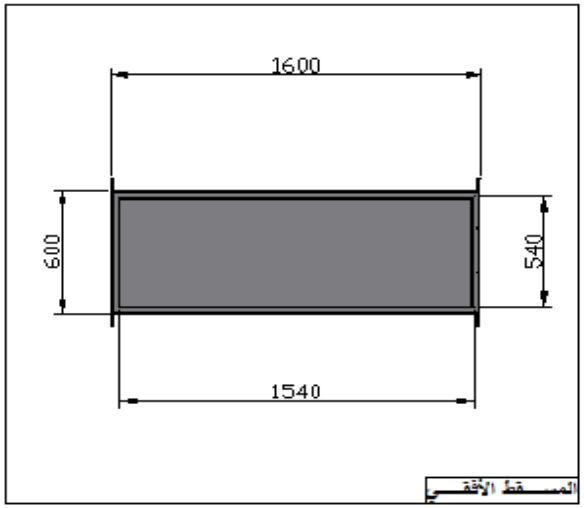


المسقط الجانبي

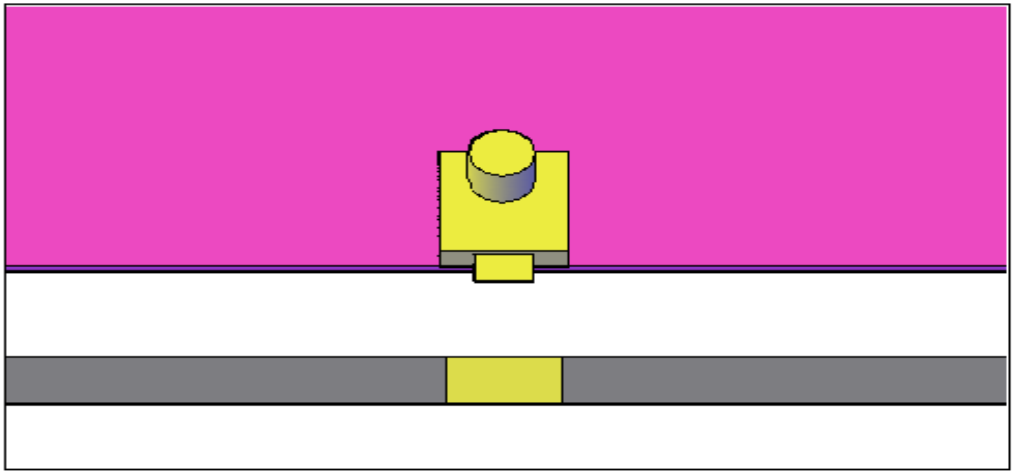
جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	قسم الإختبار بدون حامل		
رقم القطعة	1	رقم المخطط	1/12

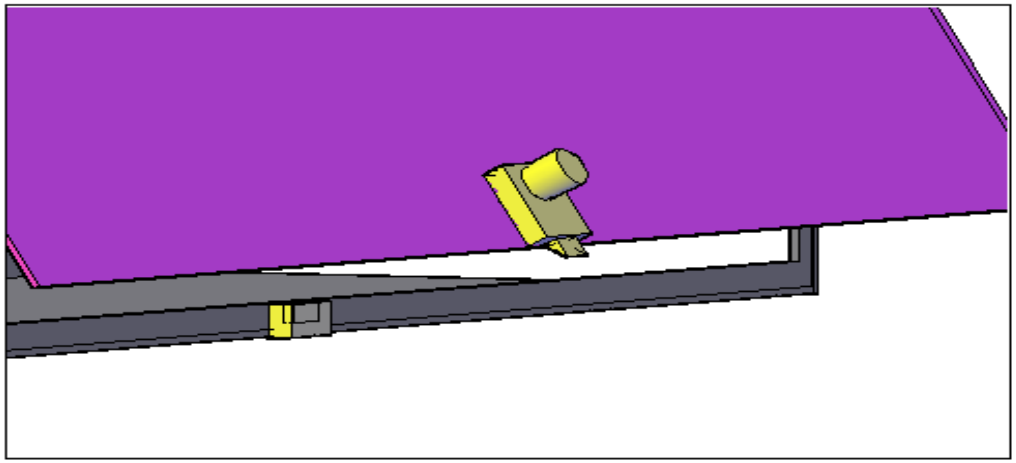
جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	1600X600	5	فولاذ مقلفن / أي ستانلس ستيل	1
(2)	صفيحة مستوية مفتوحة	بعد خارجي 1600X500 بعد داخلي 1540X440	5	فولاذ مقلفن / أي ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية مفتوحة	بعد خارجي 1600X600 بعد داخلي 1540X540	5	فولاذ مقلفن / أي ستانلس ستيل	1
(4)	القلنسة	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 606X506	6	فولاذ مقلفن / أي ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مقلفن	مدخل 12 مخرج 12
(5)	لوح زجاج	1540X440	6	plexiglass	2
(6)	لوح زجاج	1540X540	6	plexiglass	1
(7)	جوان	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 600X500	3	فلين أو مطاط	2



المسقط الأفقي



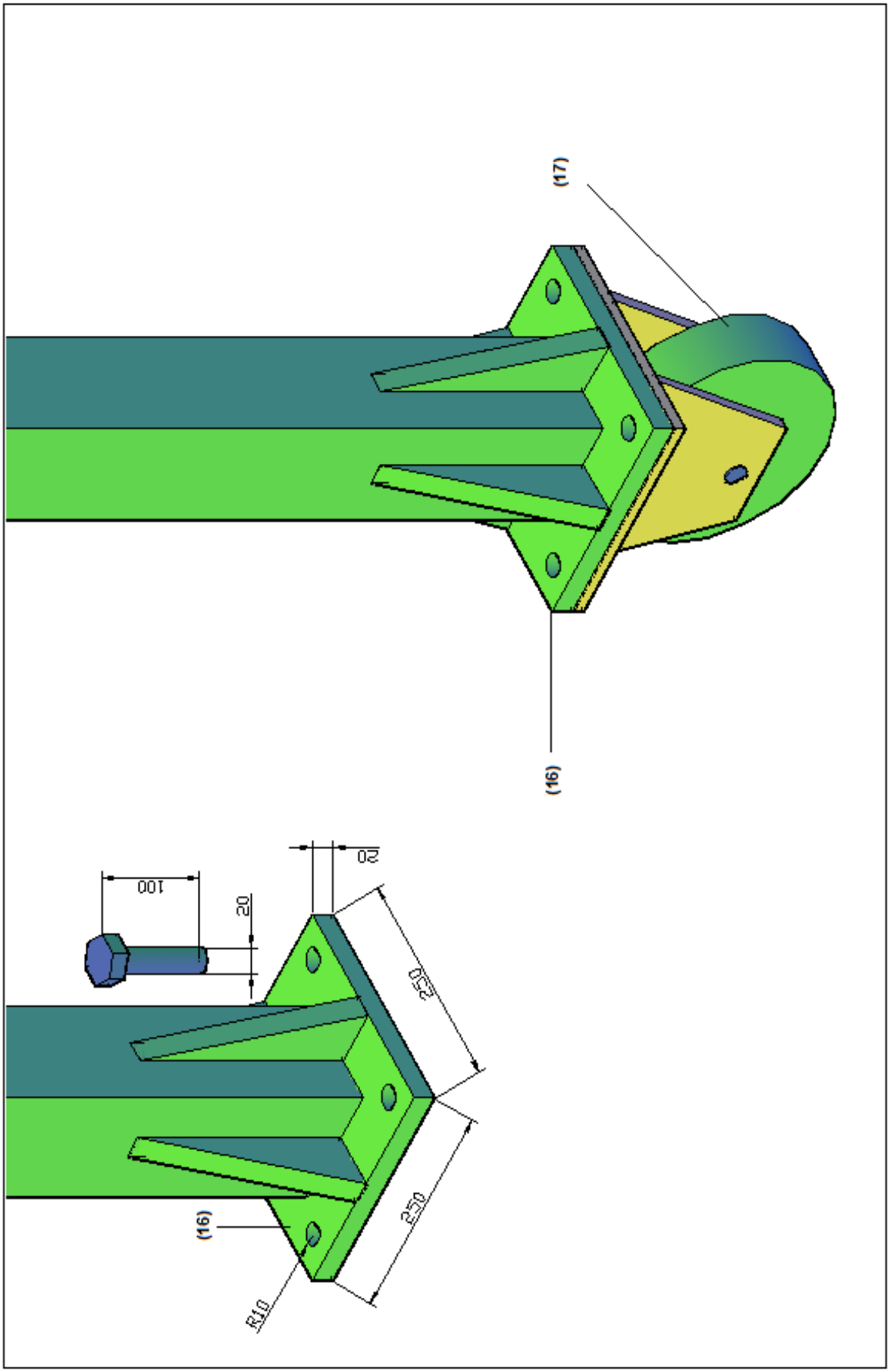


جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	قفل قسم الإختبار بدون حامل		
رقم القطعة	1	رقم المخطط	1/12

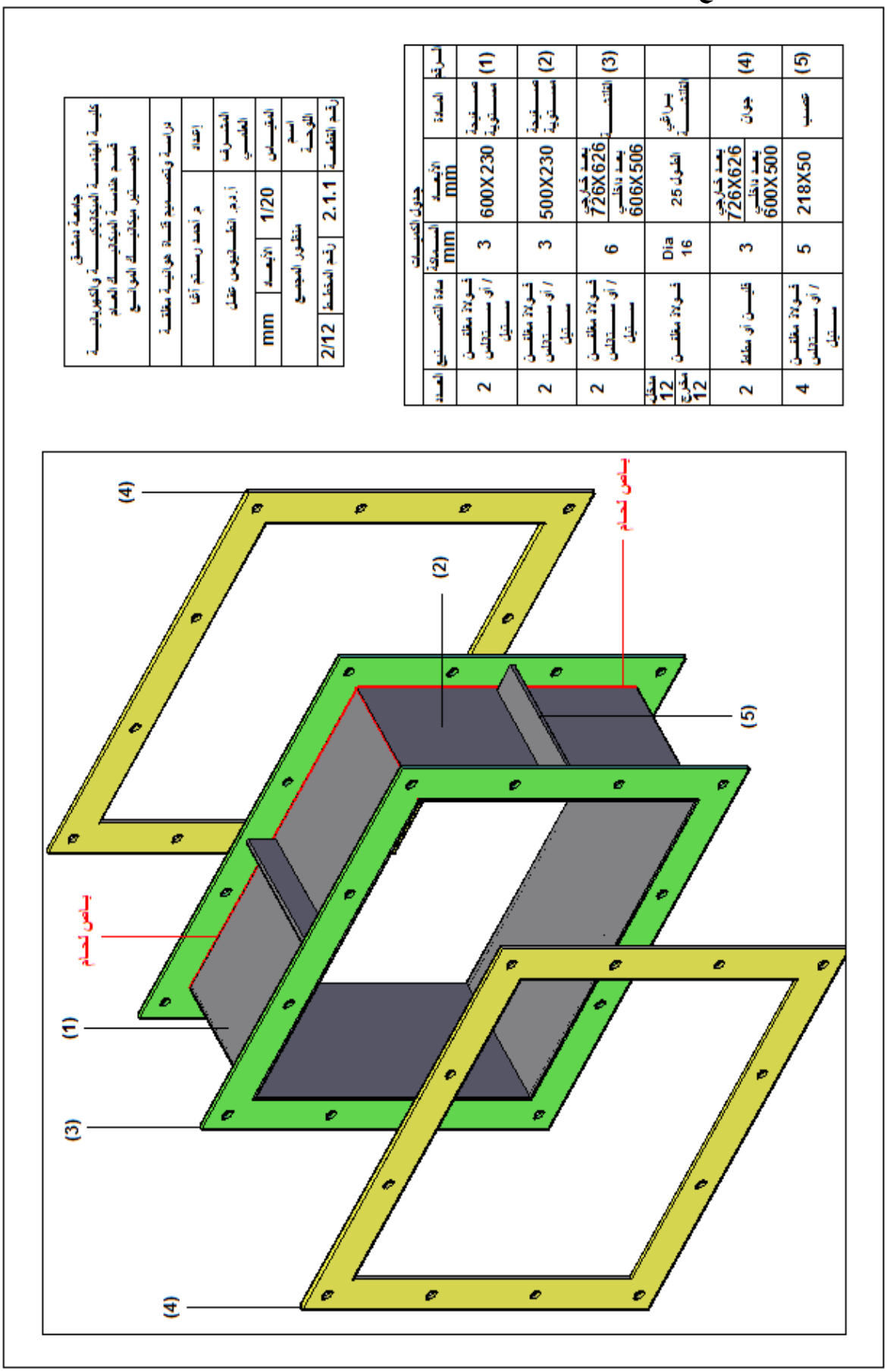
جدول الكميات

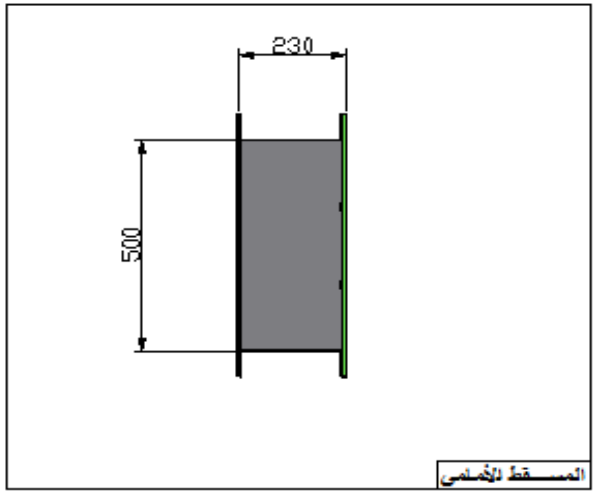
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	1600X600	5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(2)	صفيحة مستوية مفتوحة	بعد خارجي 1600X500 بعد داخلي 1540X440	5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية مفتوحة	بعد خارجي 1600X600 بعد داخلي 1540X540	5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(4)	الفلنشة	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 606X506	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي الفلنشة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	مدخل 12 مخرج 12
(5)	لوح زجاج	1540X440	6	plexiglass	2
(6)	لوح زجاج	1540X540	6	plexiglass	1
(7)	جوان	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 600X500	3	فلين أومطاط	2

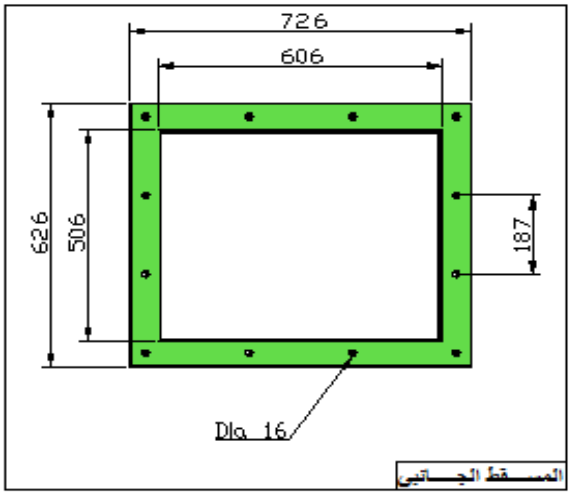
1.4.2.11 تثبيت دواليب حامل قسم الاختبار وتثبيت القناة بالأرض



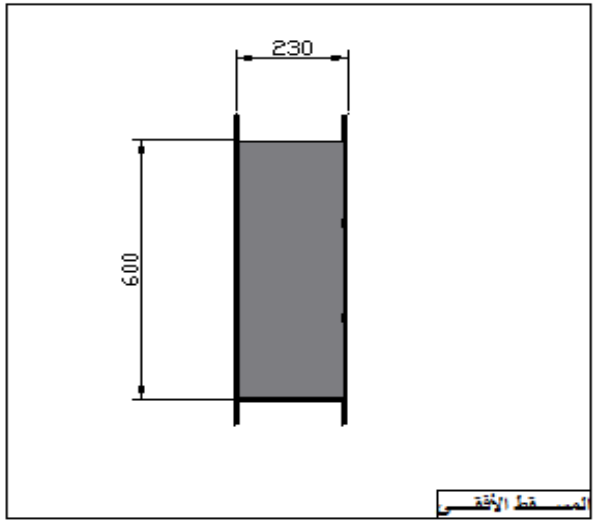
5.2.11 مخططات المجمع







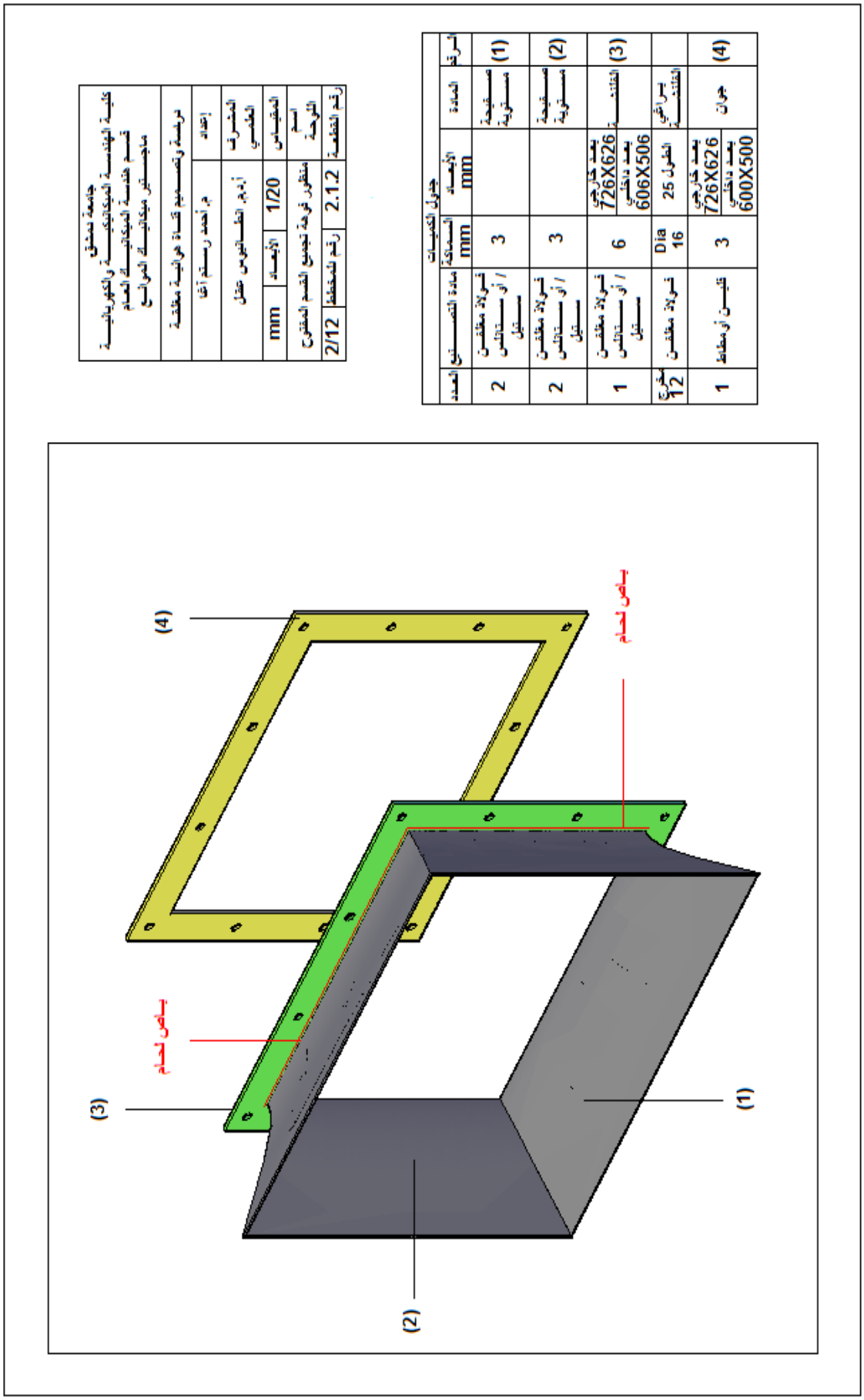
جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مساقط المجمع.		
رقم القطعة	2.1.1	رقم المخطط	2/12

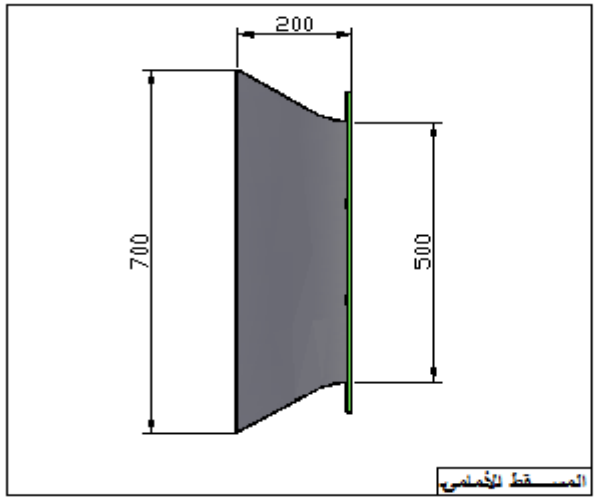


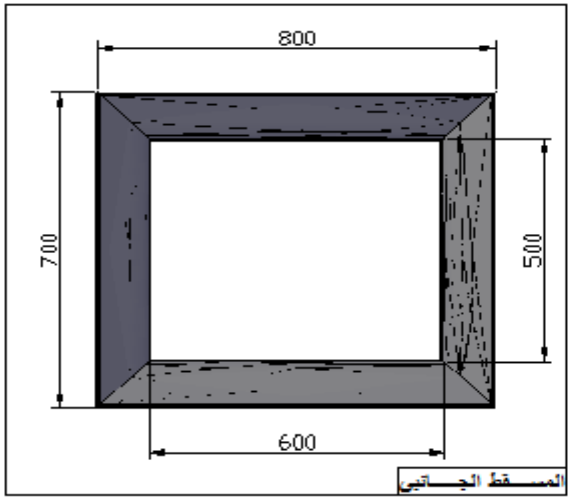
جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	600X230	3	فولاذ مغلفن / أي ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	500X230	3	فولاذ مغلفن / أي ستانلس ستيل	2
(3)	القلنسوة	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 606X506	6	فولاذ مغلفن / أي ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسوة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	مدخل 12 مخرج 12
(4)	جوان	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 600X500	3	فلين أي مطاط	2
(5)	عصب	218X50	5	فولاذ مغلفن / أي ستانلس ستيل	4

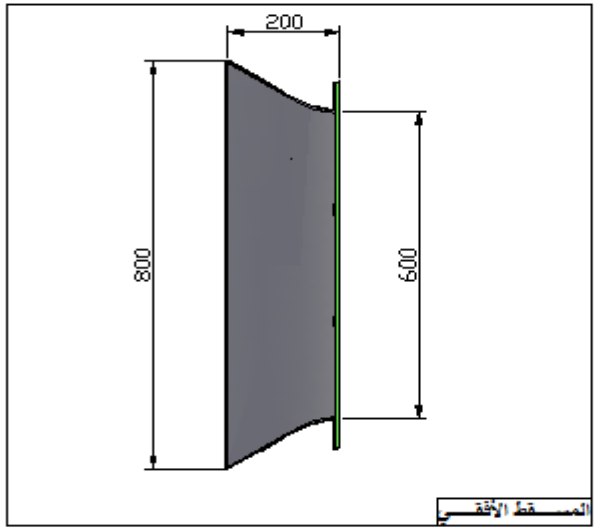
1.5.2.11 منظور فوهة التجميع الخاصة بقسم الاختبار المفتوح







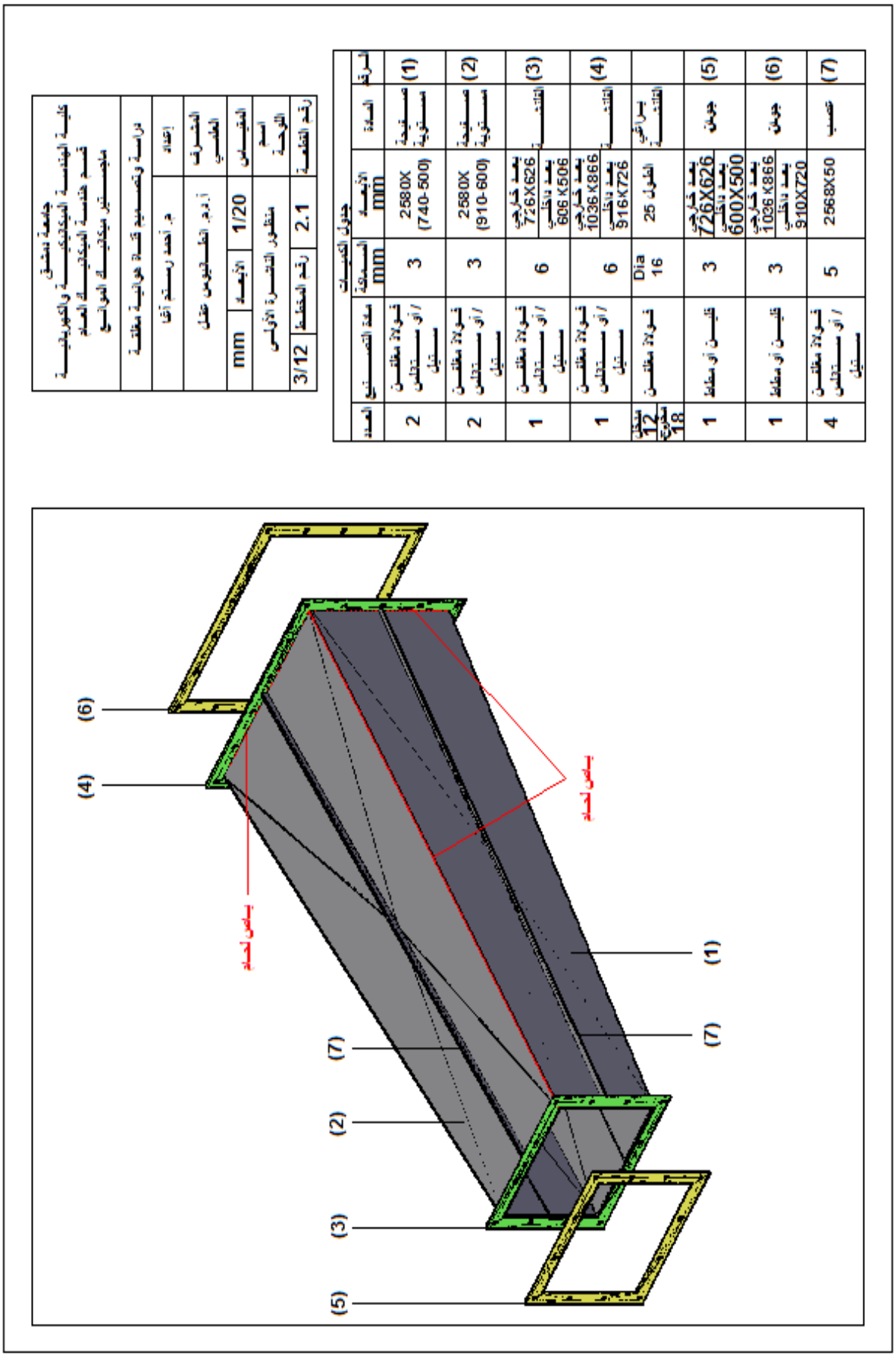
جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مساقط فرهة تجميع القسم المفتوح		
رقم القطعة	2.1.2	رقم المخطط	2/12

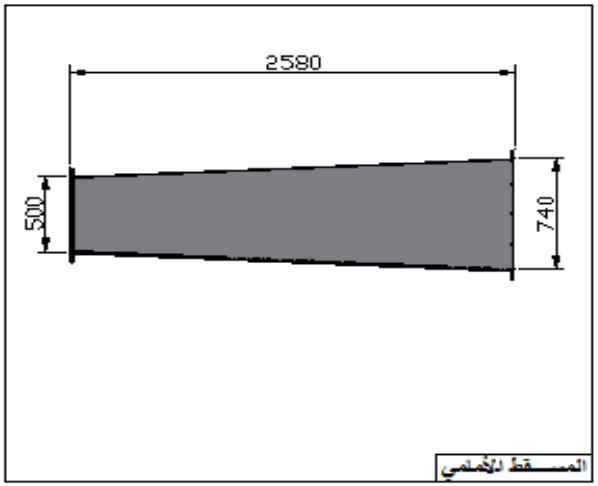


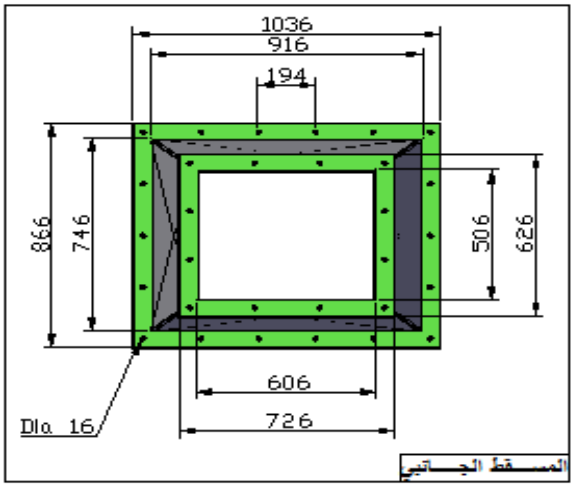
جدول الكميات

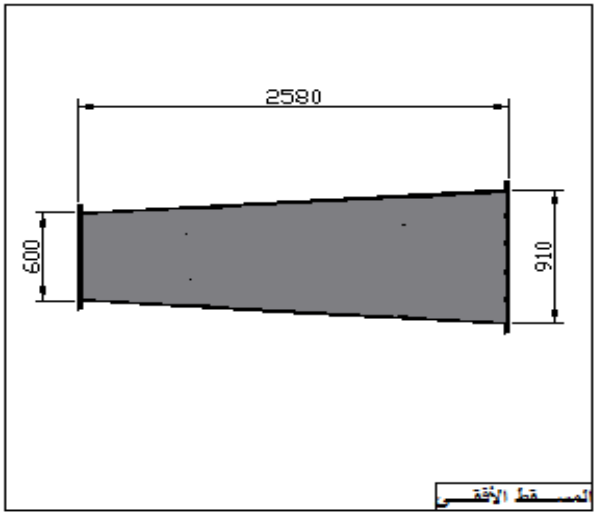
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية		3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية		3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	الفلنشة	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 606X506	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
	براغي الفلنشة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	مخرج 12
(4)	جوان	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 600X500	3	فلين أو مطاط	1

6.2.11 مخططات الناشرة الأولى







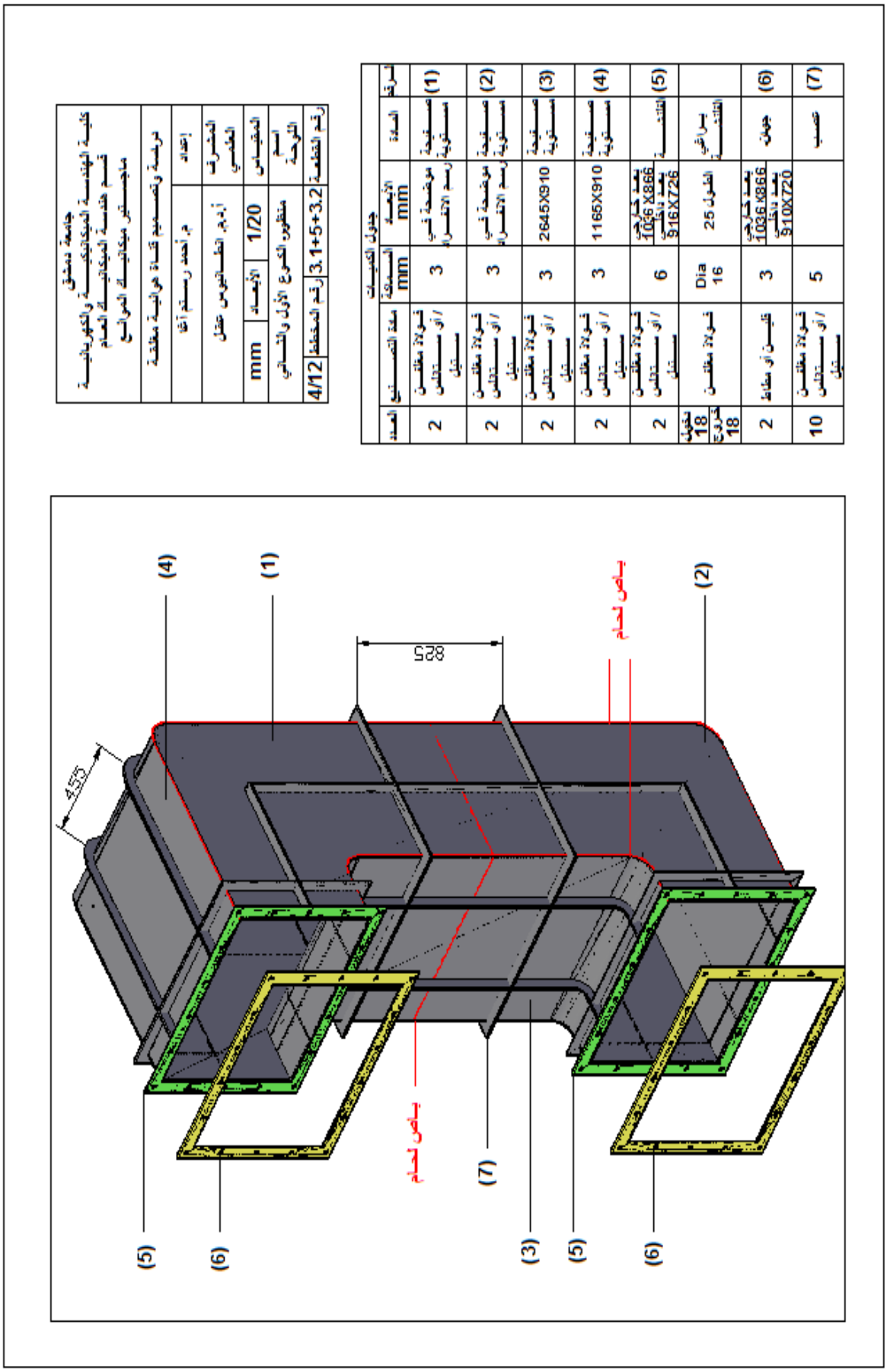


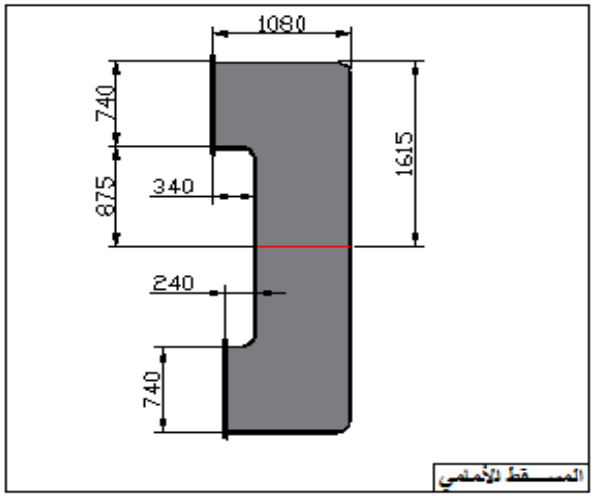
جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. الطيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط الناشرة الأولى		
رقم القطعة	2.1	رقم المخطط	3/12

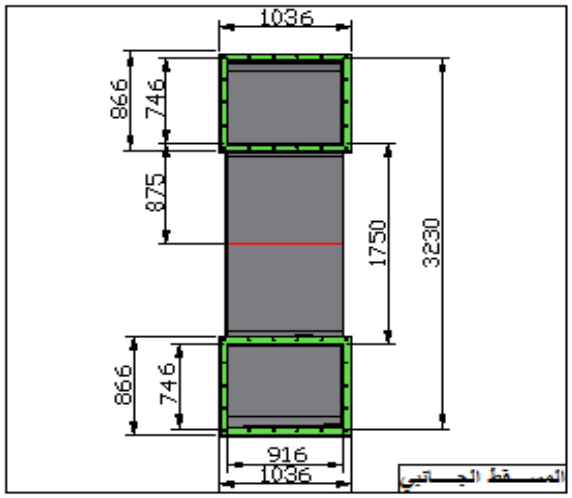
جدول الكميات

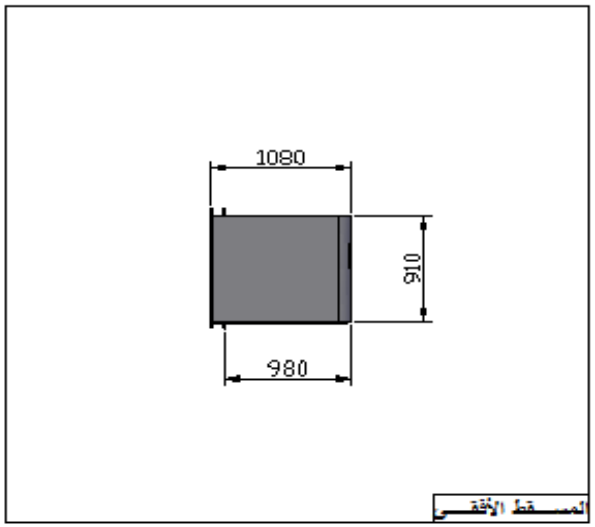
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	2580X (740-500)	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	2580X (910-600)	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	القاشرة	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 606 X506	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(4)	القاشرة	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 916X726	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
	براغي القاشرة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	مدخل 12 مخرج 18
(5)	جوان	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 600X500	3	قلين أو مطاط	1
(6)	جوان	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 910X720	3	قلين أو مطاط	1
(7)	عصب	2568X50	5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	4

7.2.11 مخططات الكوع الأول والثاني





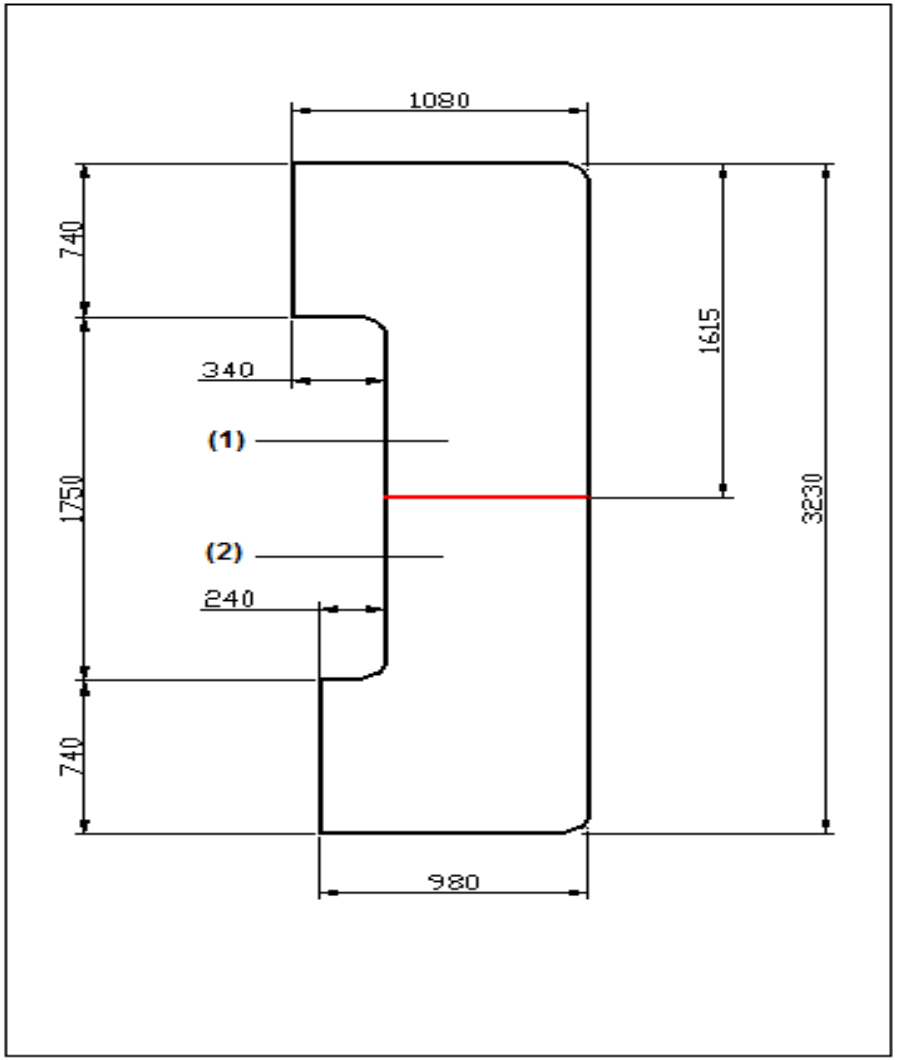




جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مساقط النوع الأول والثاني		
رقم القطعة	3.2+5+3.1	رقم المخطط	4/12

جدول الكميات

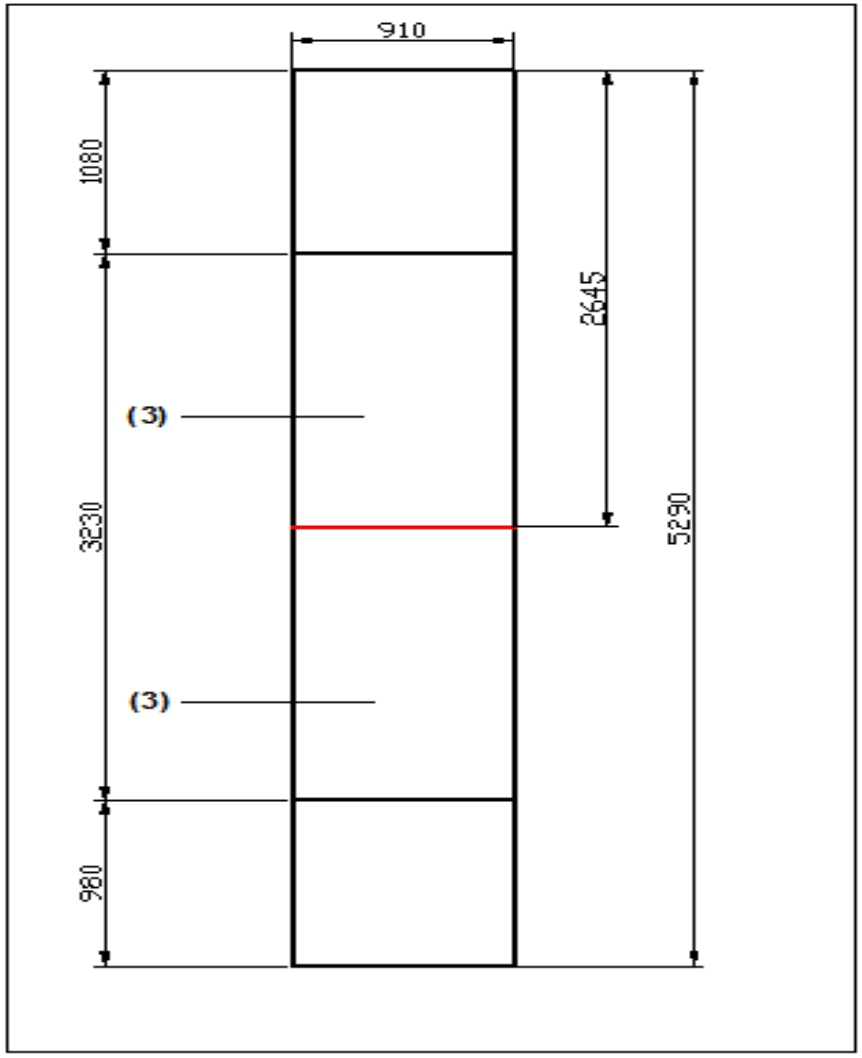
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	2645X910	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1165X910	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	القلنسة	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 916X746	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	دخول 18 خروج 18
(6)	جهاز	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 910X740	3	فليس أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	10



جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط أمامي للكوع الأول والثاني		
رقم القطعة	3.1+5+3.2	رقم المخطط	4/12

جدول الكميات

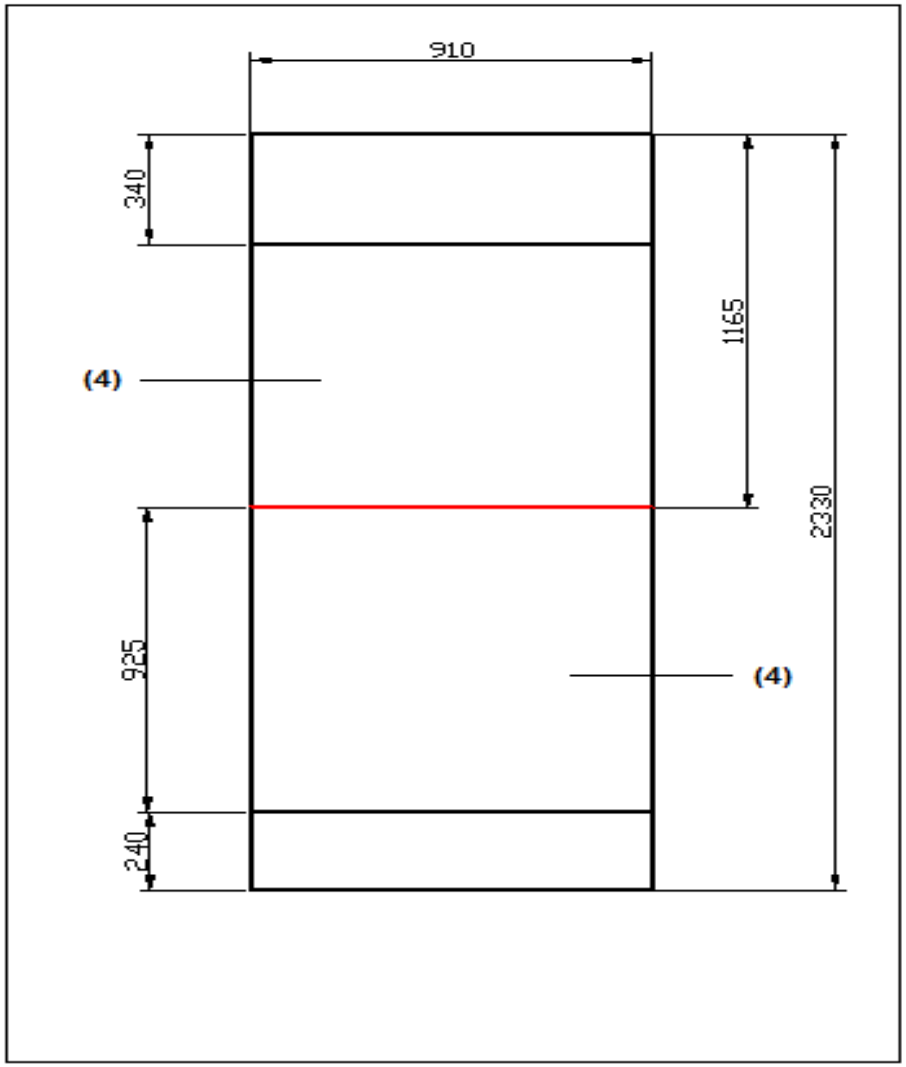
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	2645X910	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1165X910	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	القلنسة	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 916X726	6	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مقلفن	دخول 18 خروج 18
(6)	جوان	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 910X720	3	قليون أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	10



جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط جانبي للكوع الأول والثاني		
رقم القطعة	3.1+5+3.2	رقم المخطط	4/12

جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	2645X910	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1165X910	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	الفلنشة	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 916X726	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي الفلنشة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	دخول 18 خروج 18
(6)	جوان	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 910X720	3	فلين أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	10

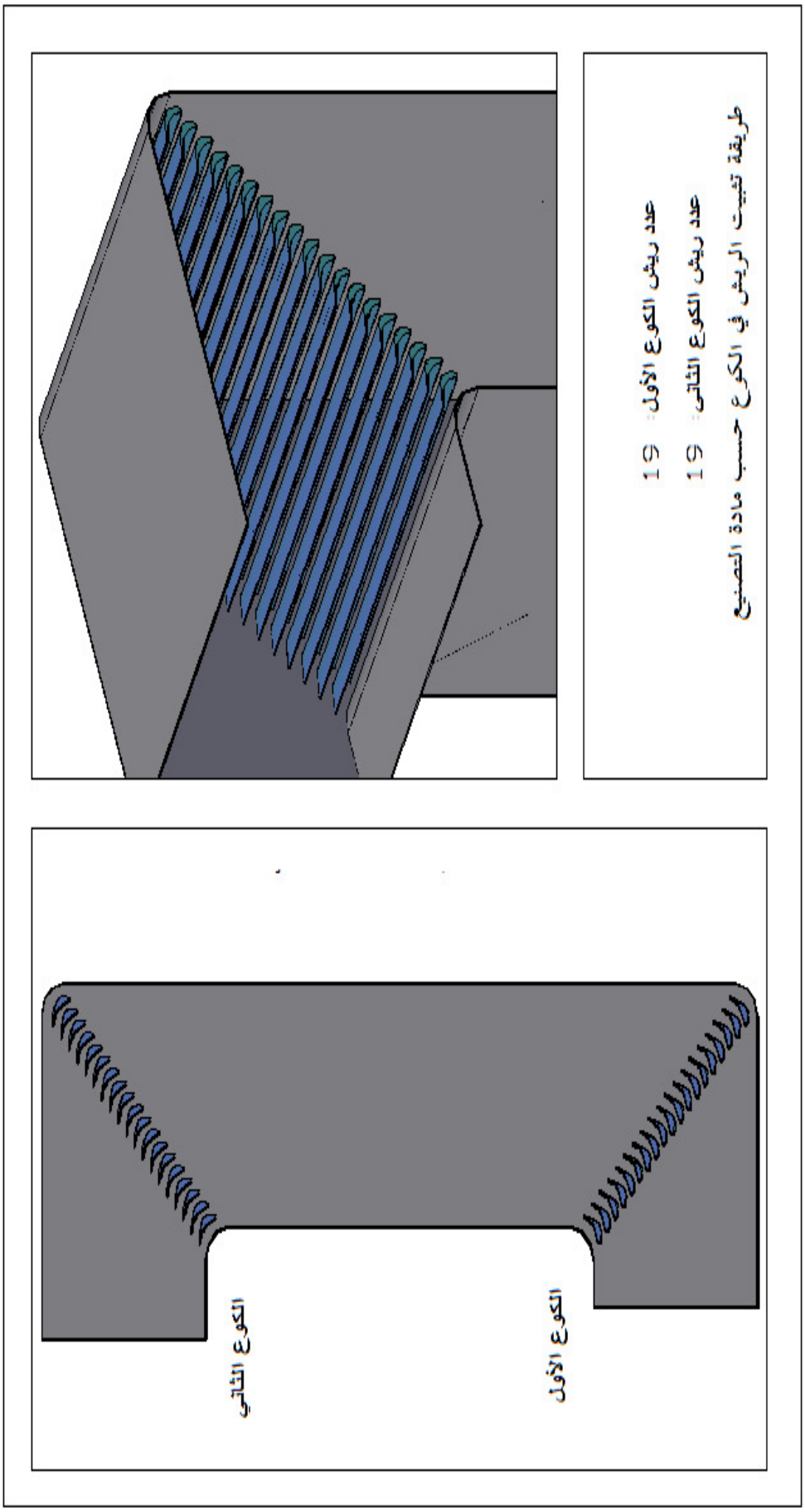


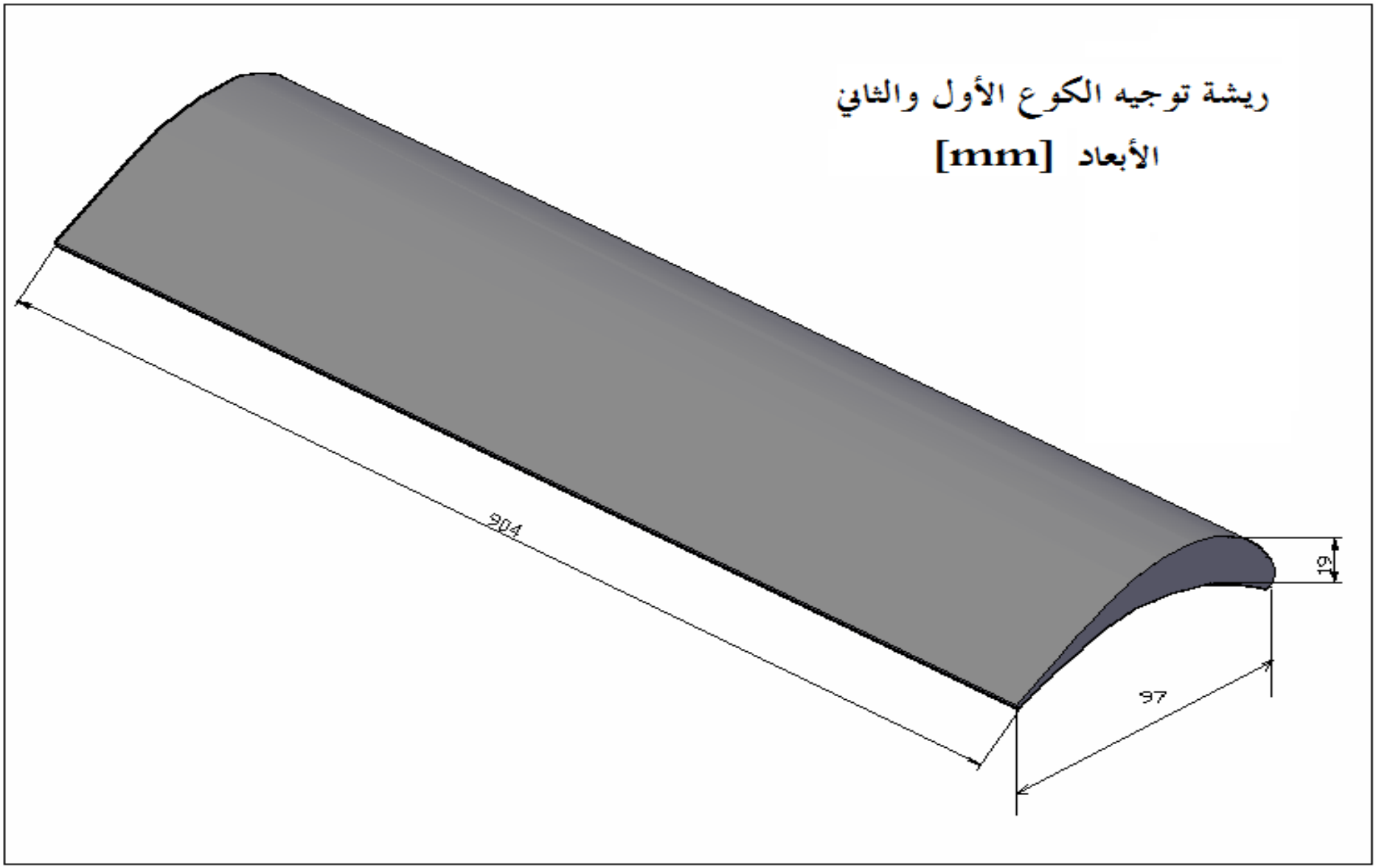
جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط افقي للنوع الأول والثاني		
رقم القطعة	3.2+5+3.1	رقم المخطط	4/12

جدول الكميات

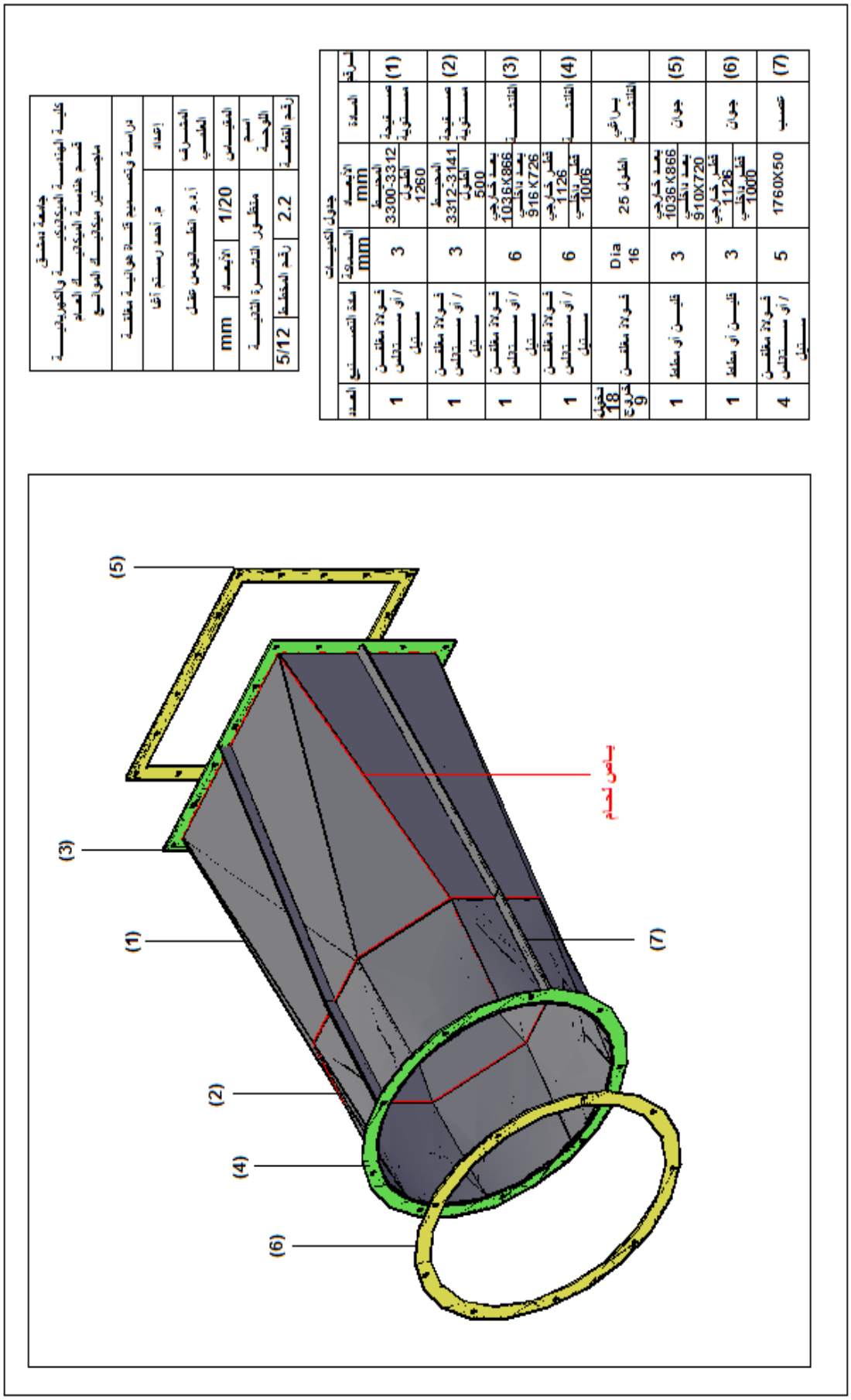
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	2645X910	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1165X910	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	القلنسة	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 916X726	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	دخول 18 خروج 18
(6)	جوان	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 910X720	3	فلين أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	10

1.7.2.11 ريش التوجيه في الكوع الأول والثاني

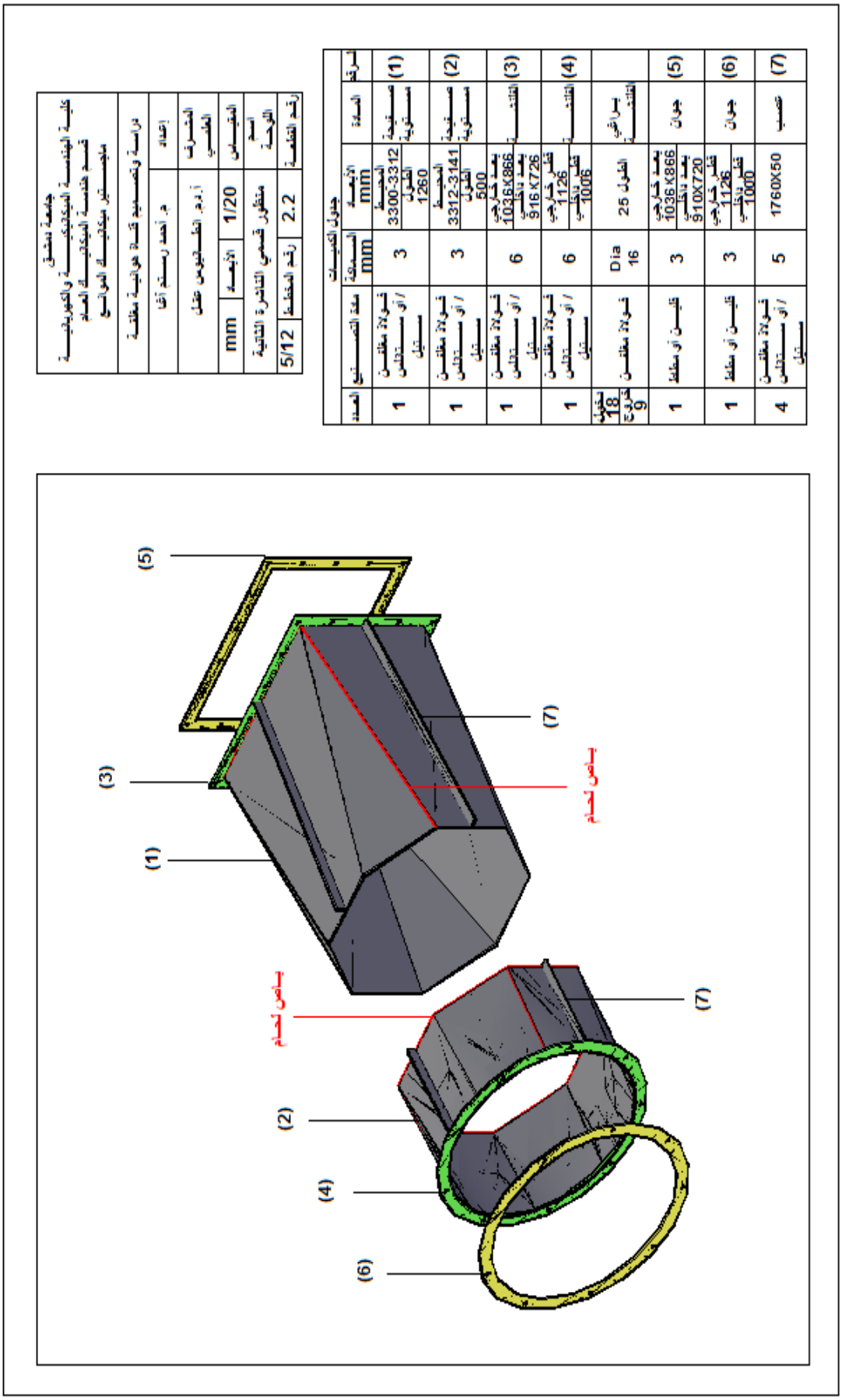


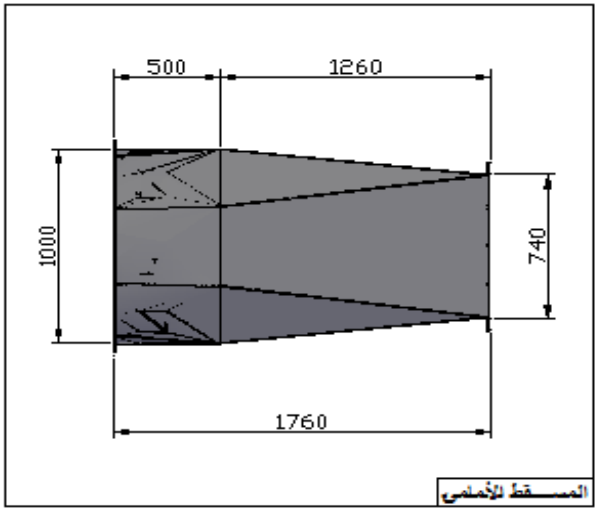

ريشة توجيه الكوع الأول والثاني
الأبعاد [mm]
904
97
19

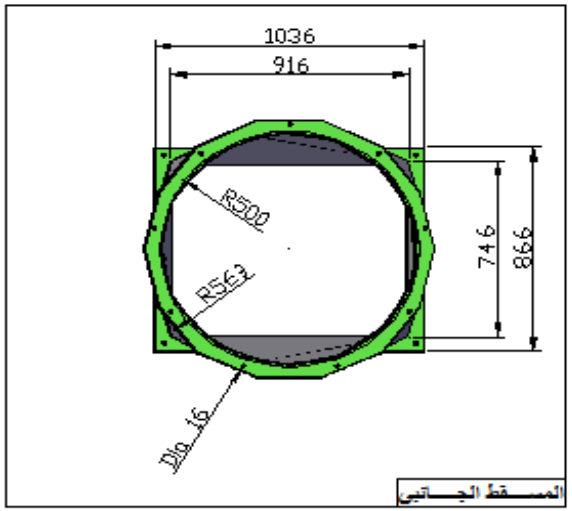
8.2.11 مخططات الناشرة الثانية

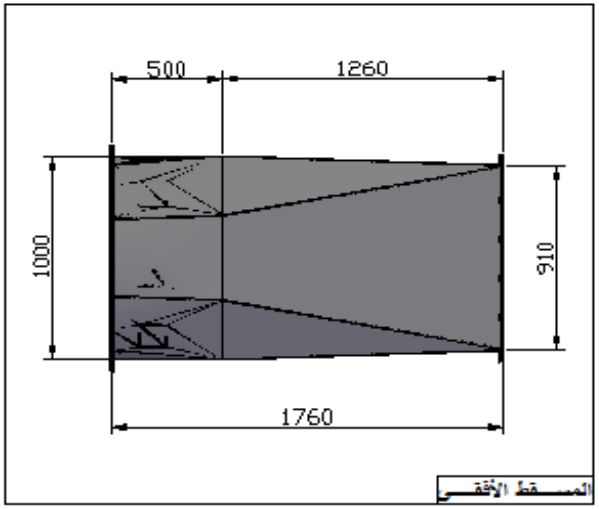


1.8.2.11 منظور قسمي الناشرة الثانية







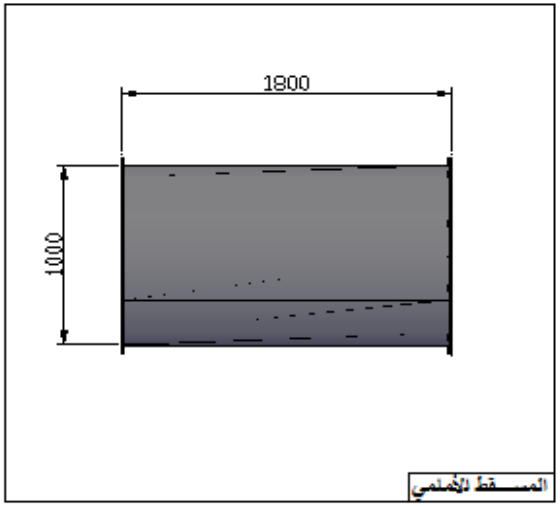


جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع	
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة	
إعداد	م. أحمد رستم آغا
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل
المقياس	1/20 الأبعاد mm
اسم اللوحة	مساقط الناشرة الثانية
رقم القطعة	2.2 رقم المخطط 5/12

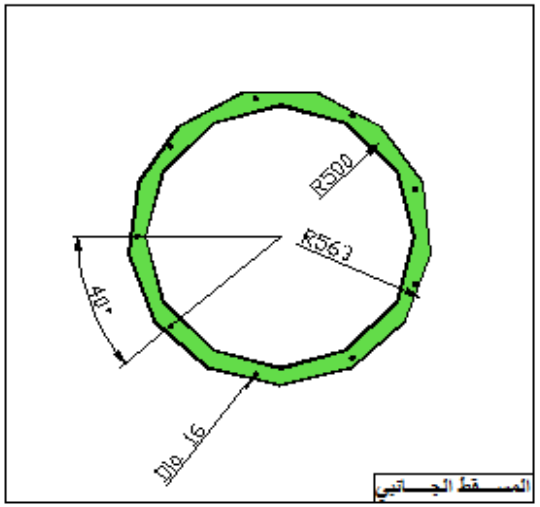
جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	المحيط 3300-3312 الطول 1260	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(2)	صفيحة مستوية	المحيط 3312-3141 الطول 500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(3)	القلنسوة	بعد خارجي 1036X866 بعد داخلي 916 X746	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(4)	القلنسوة	قطر خارجي 1126 قطر داخلي 1006	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
	براغي القلنسوة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	دخول 18 خروج 9
(5)	جوان	بعد خارجي 1036 X866 بعد داخلي 910X740	3	فلين أو مطاط	1
(6)	جوان	قطر خارجي 1126 قطر داخلي 1000	3	فلين أو مطاط	1
(7)	عصب	1760X50	5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	4

9.2.11 مخططات قسم المروحة

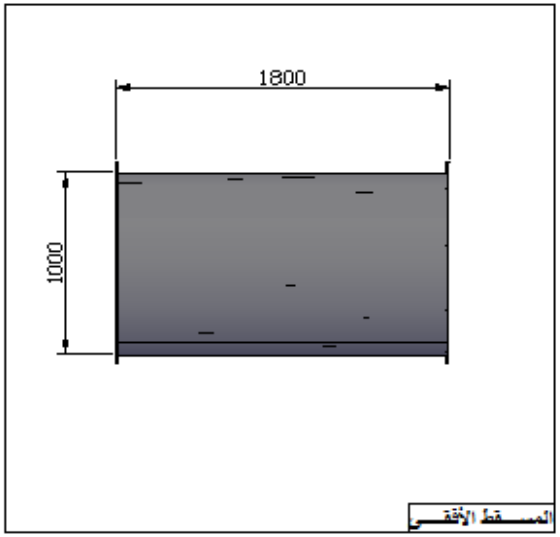


المســـقط الأمامي



المســـقط الجـــانبي

جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مساقط غلاف قسم المروحة		
رقم القطعة	6	رقم المخطط	6/12

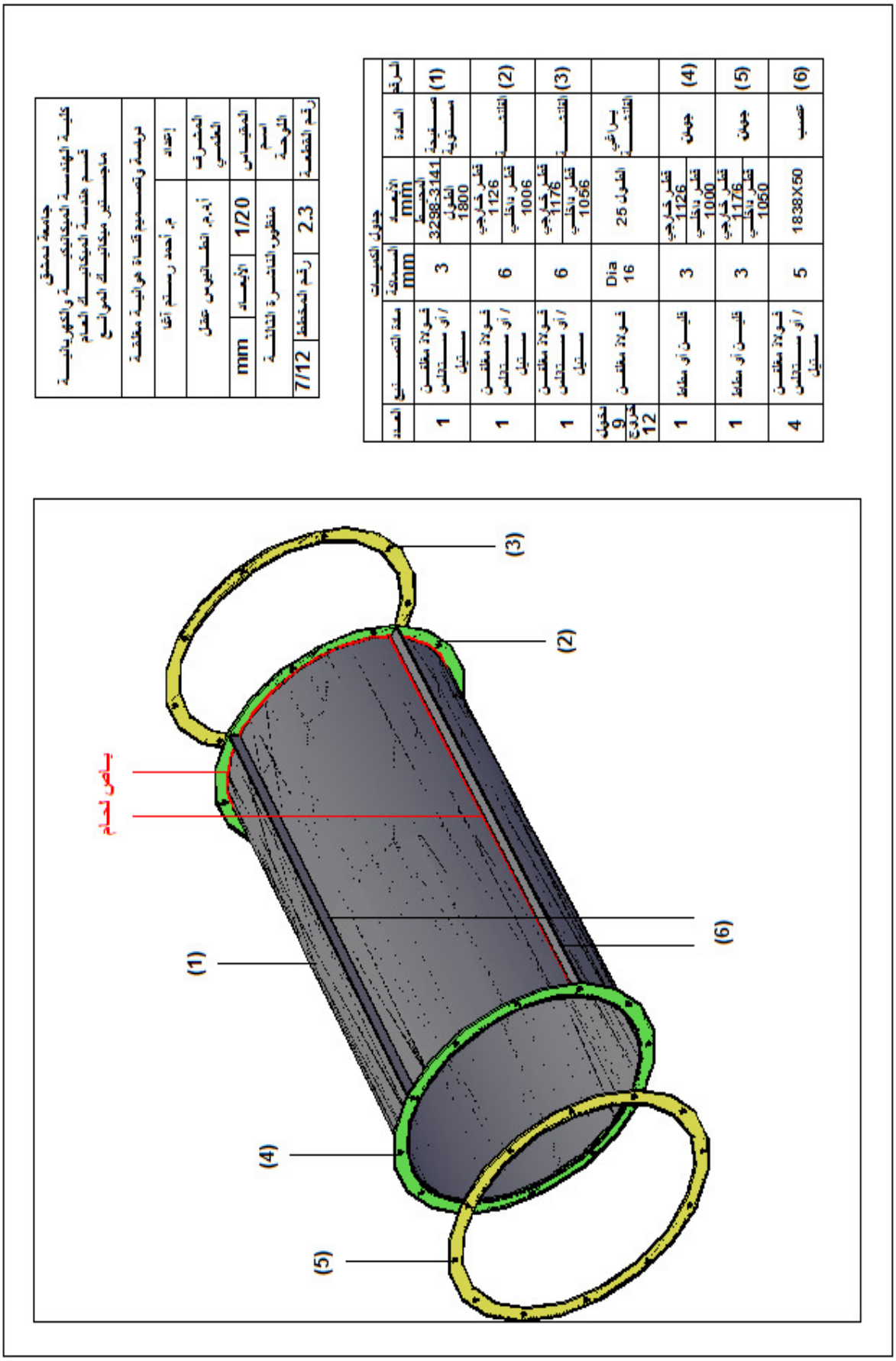


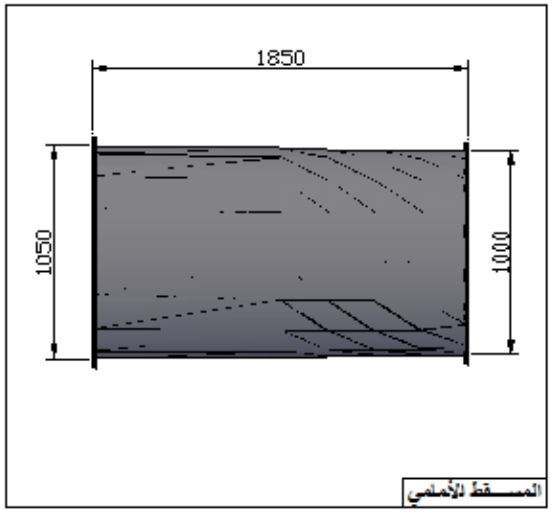
المســـقط الأفقـــي

جدول الكميـــات

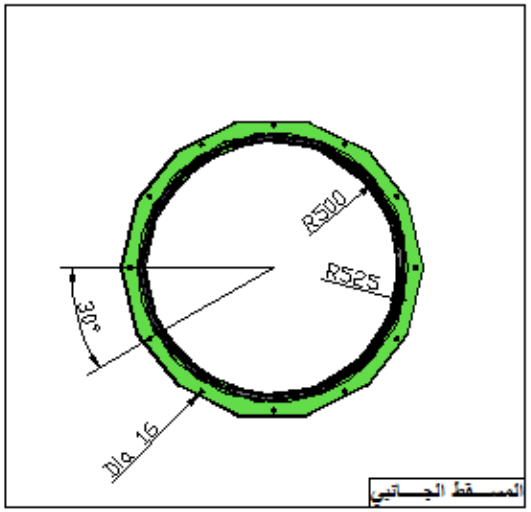
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصـــــنيع	العدد
(1)	صـــفيحة مســـتوية	3141X1800	3	فـــولاذ مغلفـــن / أو ســـتانلس ســـتيل	1
(2)	الفلنشـــة	قطر خارجي 1126 قطر داخلي 1006	6	فـــولاذ مغلفـــن / أو ســـتانلس ســـتيل	2
	براغي الفلنشـــة	الطول 25	Dia 16	فـــولاذ مغلفـــن	دخول 9 خروج 9
(3)	جوان	قطر خارجي 1126 قطر داخلي 1000	3	قليـــن أو مطاط	1

10.2.11 مخططات الناشرة الثالثة



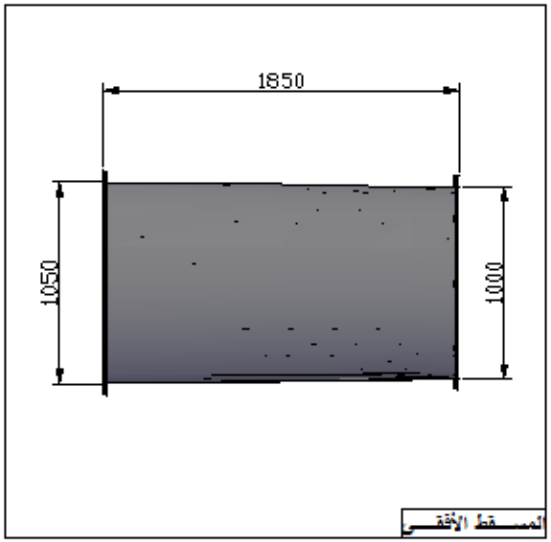


المســـقط الأمامي



المســـقط الجـــانبي

جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مساقط الناشرة الثالثة		
رقم القطعة	2.3	رقم المخطط	7/12

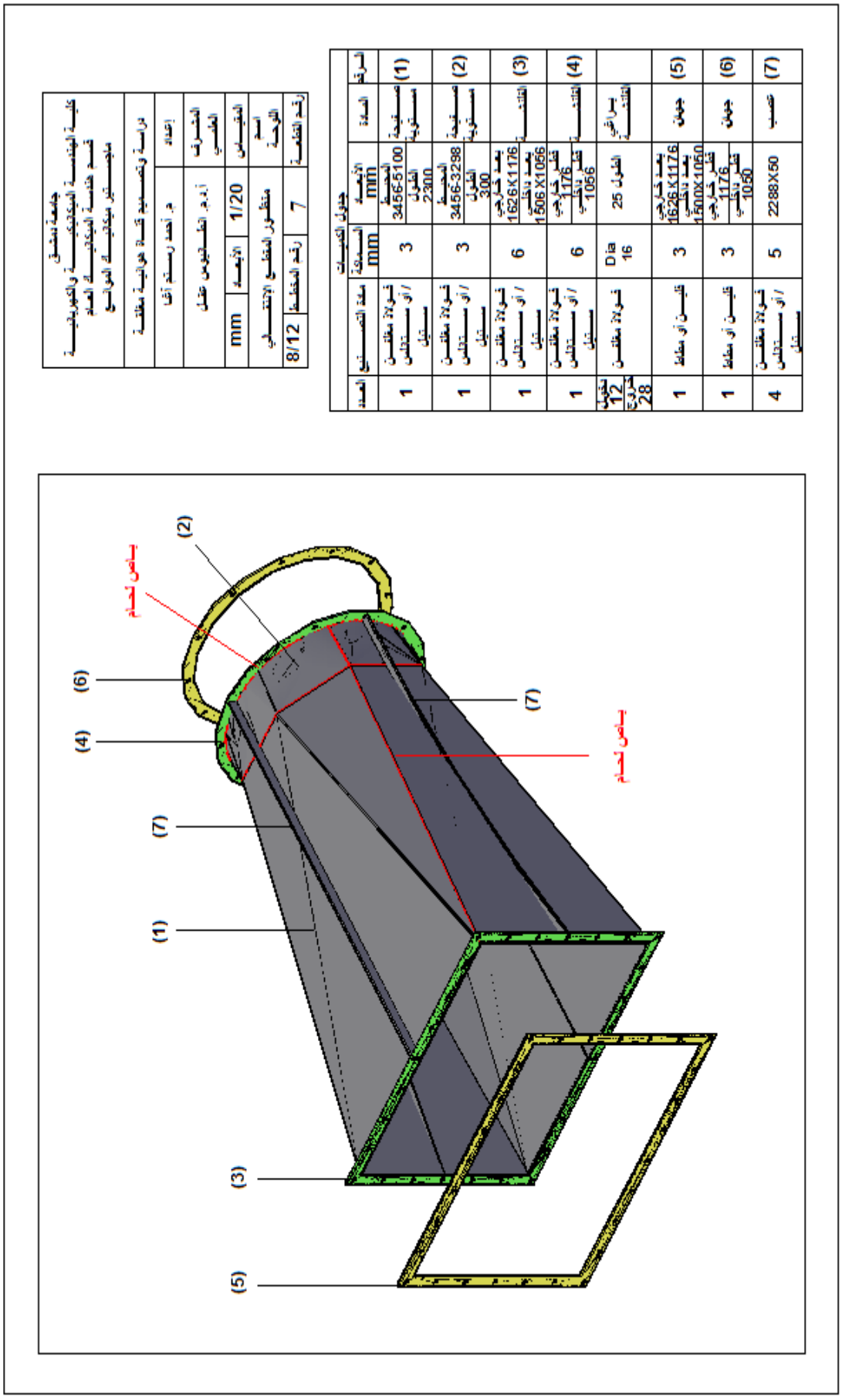


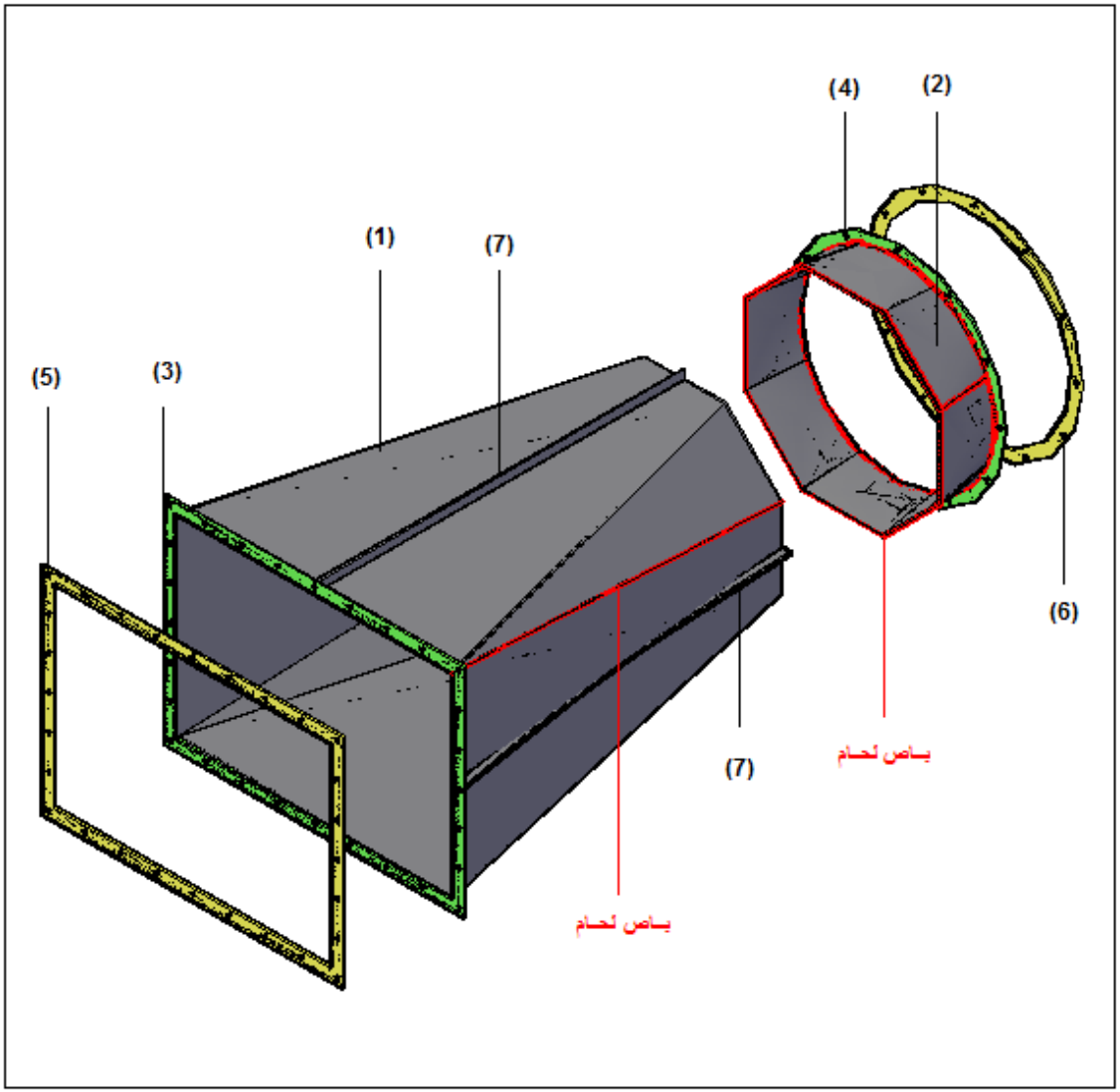
المســـقط الأفقـــي

جدول الكميـــات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	المحيط 3298-3141 الطول 1800	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(2)	القلنسة	قطر خارجي 1126 قطر داخلي 1006	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(3)	القلنسة	قطر خارجي 1176 قطر داخلي 1056	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	مدخول 9 خروج 12
(4)	جوان	قطر خارجي 1126 قطر داخلي 1000	3	قليـــن أو مطاط	1
(5)	جوان	قطر خارجي 1176 قطر داخلي 1050	3	قليـــن أو مطاط	1
(6)	عصب	1838X50	5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	4

11.2.11 مخططات المقطع الانتقالي

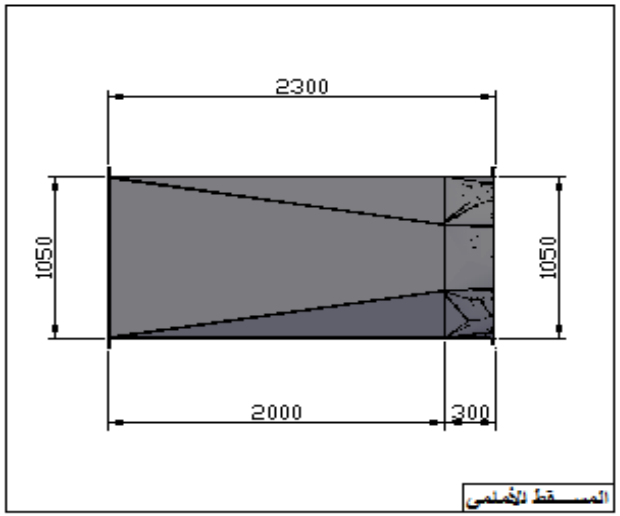




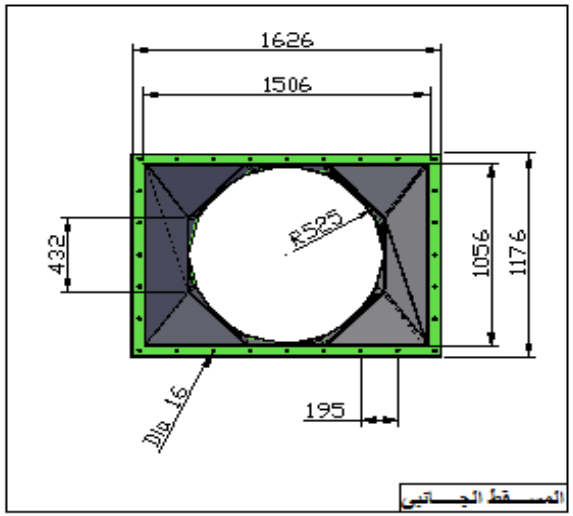
جامعة دمشق كليـة الهندسـة الميكانيكيـة والكهربائيـة قسـم هندسـة الميكانيـك العـام ماجسـتير ميكانيـك الموائـع			
دراسـة وتصـميم قنـاة هوائيـة مغلقـة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشـرف العلمـي	أ.د.م. انطـانيوس عقـل		
المقيـاس	1/20	الأبعـاد	mm
اسم اللوحـة	منظور قسمي المقطع الانتقالي		
رقـم القطعـة	7	رقـم المخطـط	8/12

جدول الكميـات

الرقم	المادة	الأبعـاد mm	السماكة mm	مادة التصـنيع	العدد
(1)	صـفيحة مسـتوية	المحيط 3456-5100 الطول 2300	3	فـولاذ مغلفـن / أو سـتانلس سـتيل	1
(2)	صـفيحة مسـتوية	المحيط 3456-3298 الطول 300	3	فـولاذ مغلفـن / أو سـتانلس سـتيل	1
(3)	القلنسـوة	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1506 X1056	6	فـولاذ مغلفـن / أو سـتانلس سـتيل	1
(4)	القلنسـوة	قطر خارجي 1176 قطر داخلي 1056	6	فـولاذ مغلفـن / أو سـتانلس سـتيل	1
	براغي القلنسـوة	الطول 25	Dia 16	فـولاذ مغلفـن	دخول 12 خروج 28
(5)	جوان	بعد خارجي 1626 X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	فليـن أو مطاط	1
(6)	جوان	قطر خارجي 1176 قطر داخلي 1050	3	فليـن أو مطاط	1
(7)	عصب	2288X50	5	فـولاذ مغلفـن / أو سـتانلس سـتيل	4

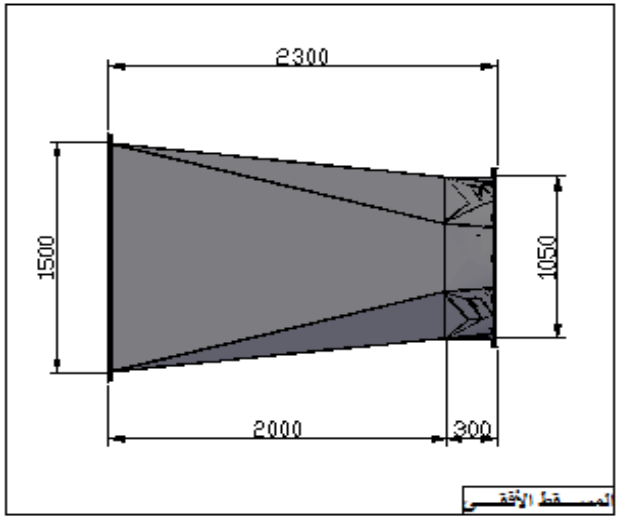


المســـقط الأمامي



المســـقط الجـــانبي

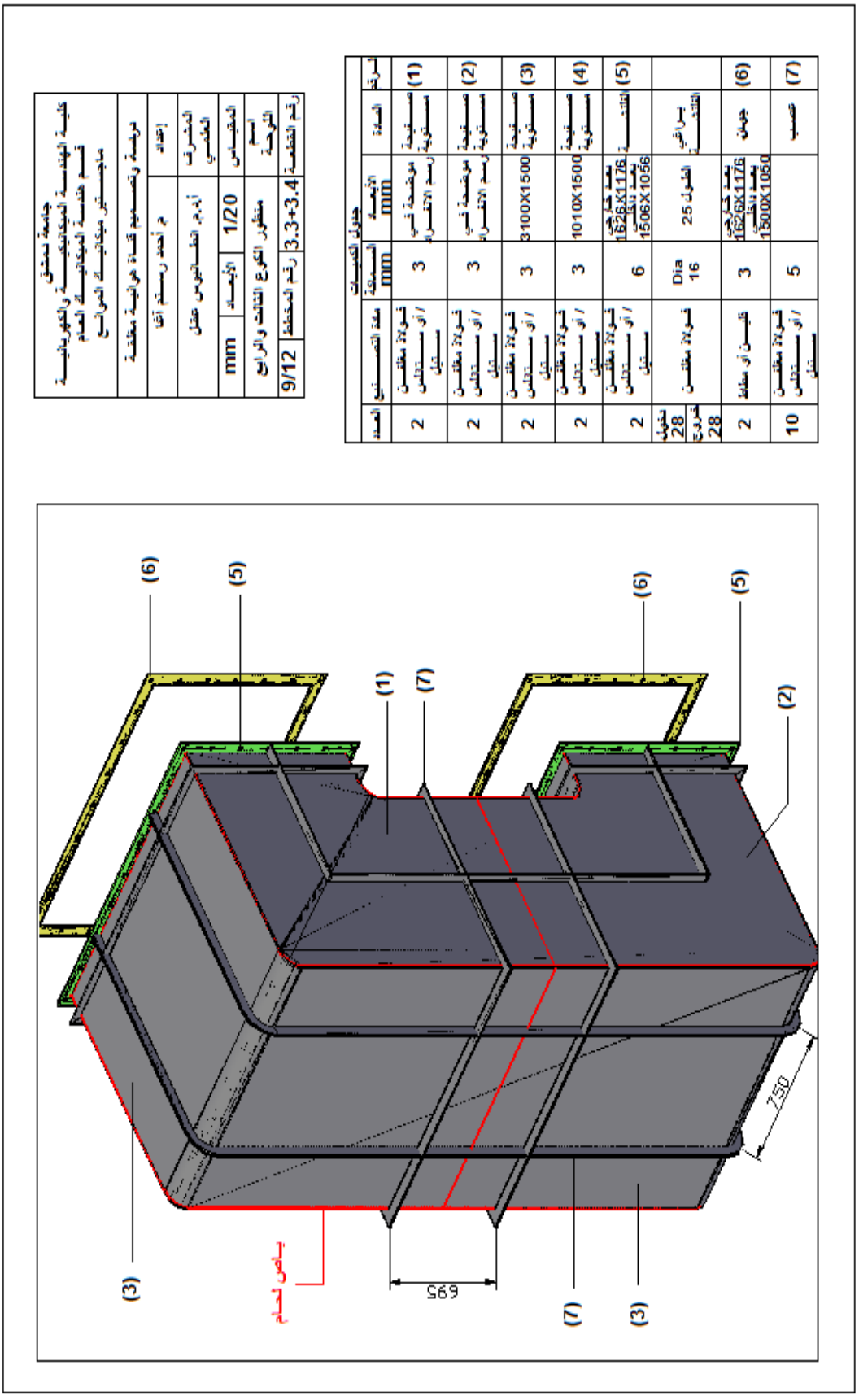
جامعة دمشق كليـــة الهندســـة الميكانيكيـــــة والكهربائيـــة قســم هندســة الميكانيـــك العــام ماجســـتير ميكانيـــك الموائـــع			
دراســة وتصـــميم قنـــاة هوائيـــة مغلقـــة			
إعداد	م. أحمد رستم أتقد		
المشـرف العلمـي	أ.د.م الطـــانيوس عقل		
المقيـــاس	1/20	الأبعـــاد	mm
اسم اللوحة	مســـاقط المقطـــع الإنتقـــالي		
رقم القطعـــة	7	رقم المخطـط	8/12

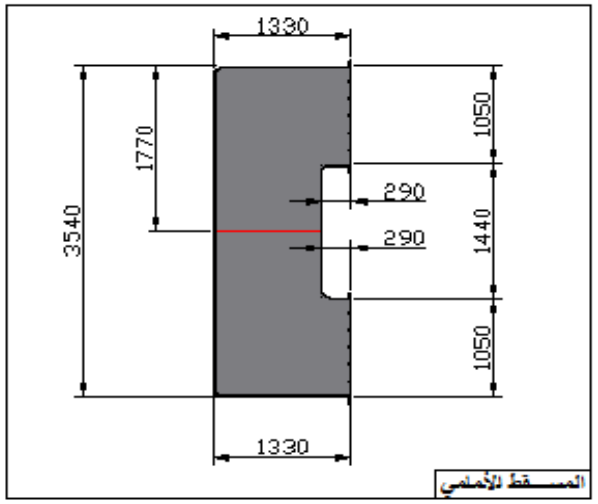


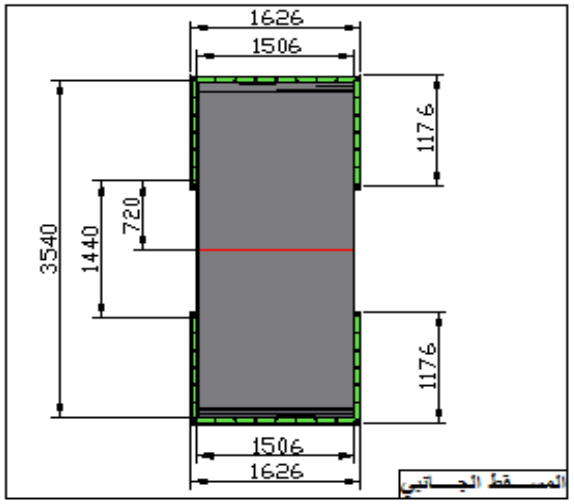
المســـقط الأفقـــي

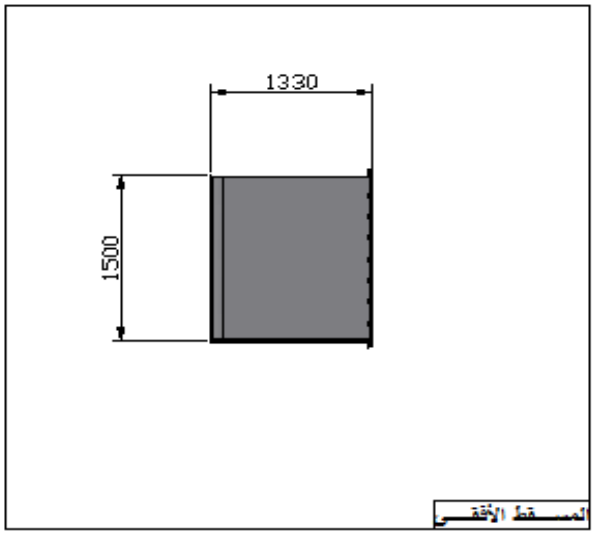
جدول الكميـــات					
الرقم	المـادة	الأبعـــاد mm	السماكة mm	مادة التصـــنيع	العدد
(1)	صـــفيحة مستوية	المحيط 3456-5100 الطول 2300	3	فـولاذ مغلفـن / أو ســتانلس ســتيل	1
(2)	صـــفيحة مســـتوية	المحيط 3456-3298 الطول 300	3	فـولاذ مغلفـن / أو ســتانلس ســتيل	1
(3)	الفلنشـــة	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1506 X1056	6	فـولاذ مغلفـن / أو ســتانلس ســتيل	1
(4)	الفلنشـــة	قطر خارجي 1176 قطر داخلي 1056	6	فـولاذ مغلفـن / أو ســتانلس ســتيل	1
	براغي الفلنشـــة	الطول 25	Dia 16	فـولاذ مغلفـن	طويل 12 قصير 28
(5)	جوان	بعد خارجي 1626 X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	قليـــن أو مطاط	1
(6)	جوان	قطر خارجي 1176 قطر داخلي 1050	3	قليـــن أو مطاط	1
(7)	عصب	2288X50	5	فـولاذ مغلفـن / أو ســتانلس ســتيل	4

12.2.11 مخططات الكوع الثالث والرابع





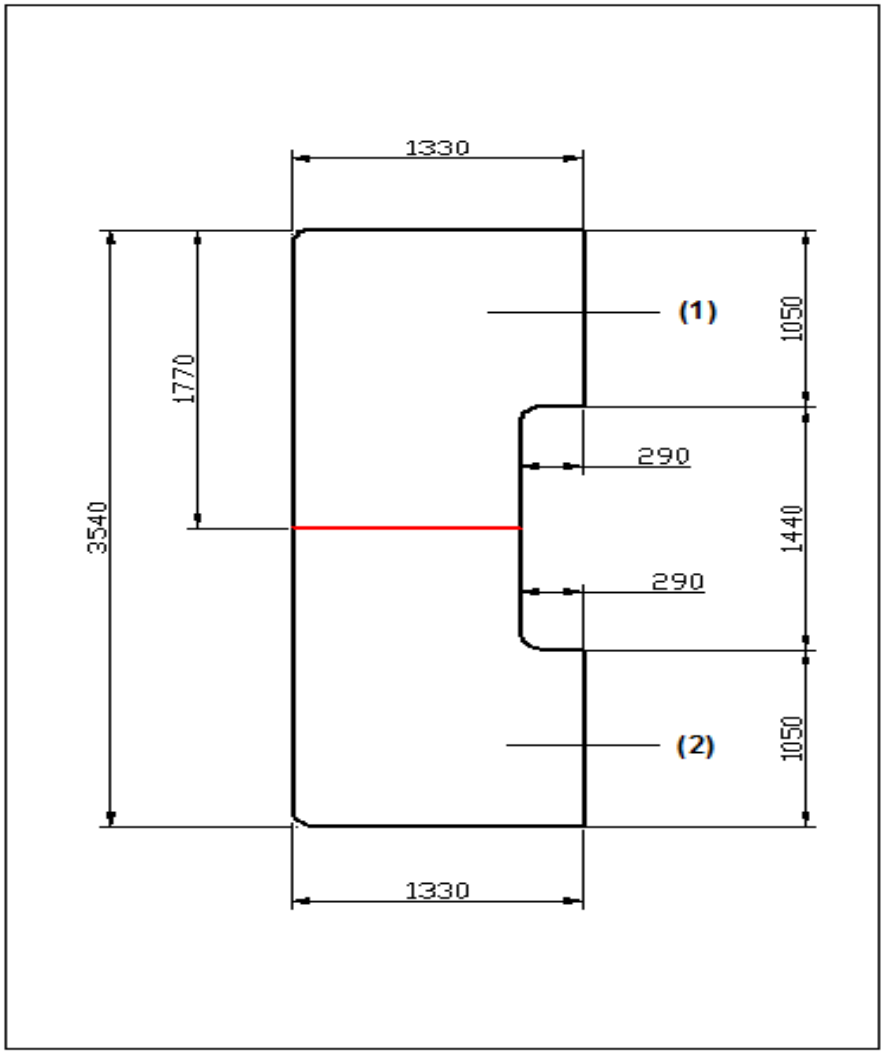




جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط النوع الثالث والرابع		
رقم القطعة	3.3+3.4	رقم المخطط	9/12

جدول الكميات

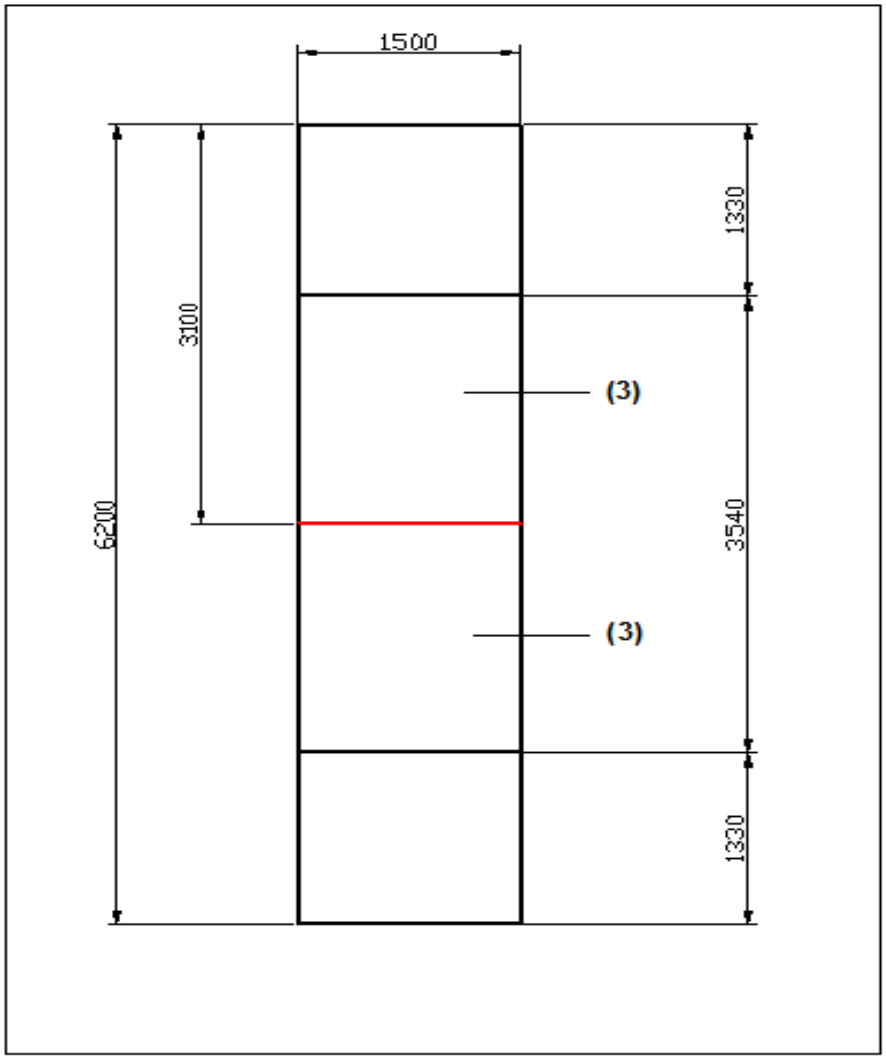
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	3100X1500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1010X1500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	القلنسة	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1506X1056	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	دخول 28 خروج 28
(6)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	فلين أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	10



جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط أمامي للكوع الثالث والرابع		
رقم القطعة	3.3+3.4	رقم المخطط	9/12

جدول الكميات

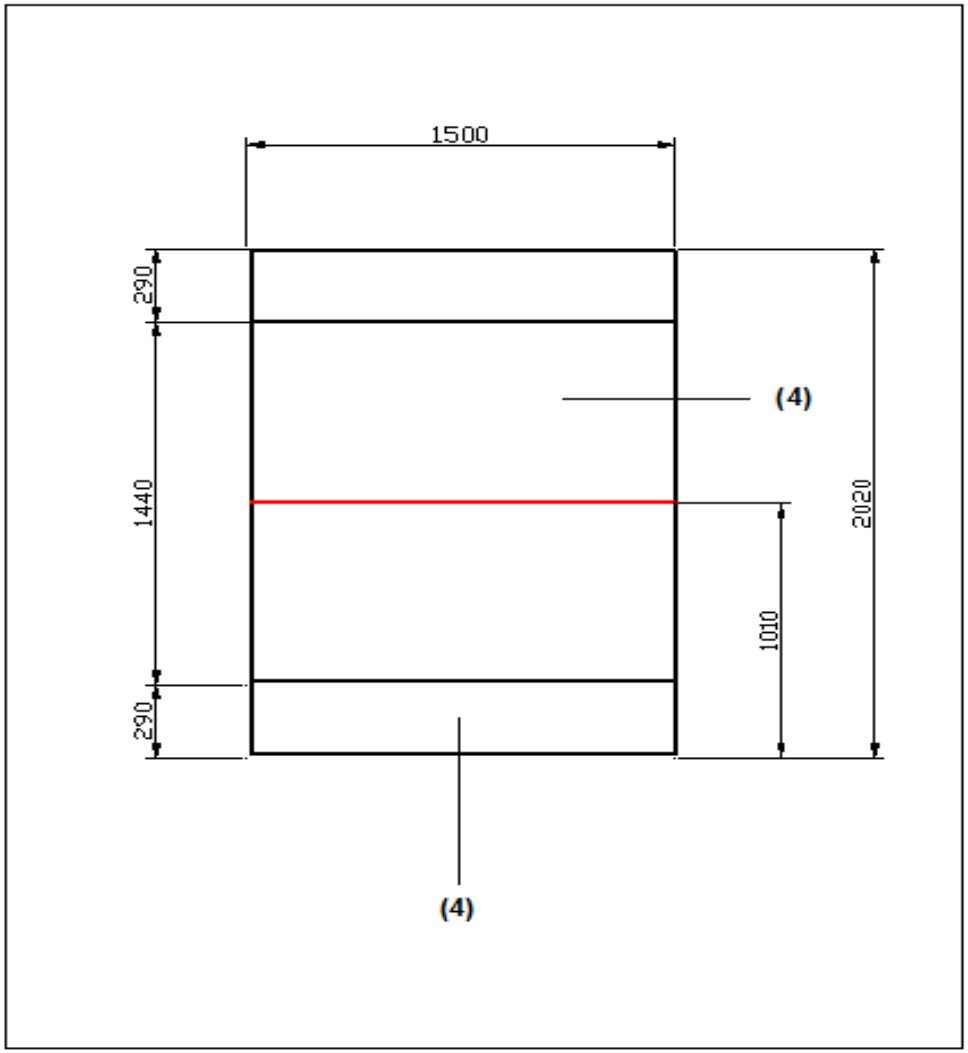
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	3100X1500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1010X1500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	القلنسة	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1506X1056	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	دخول 28 خروج 28
(6)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	فلين أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	10



جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط جانبي للكوع الثالث والرابع		
رقم القطعة	3.3+3.4	رقم المخطط	9/12

جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	3100X1500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1010X1500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	الفلنشة	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1506X1056	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي الفلنشة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	مدخل 28 مخرج 28
(6)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	فلين أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	10

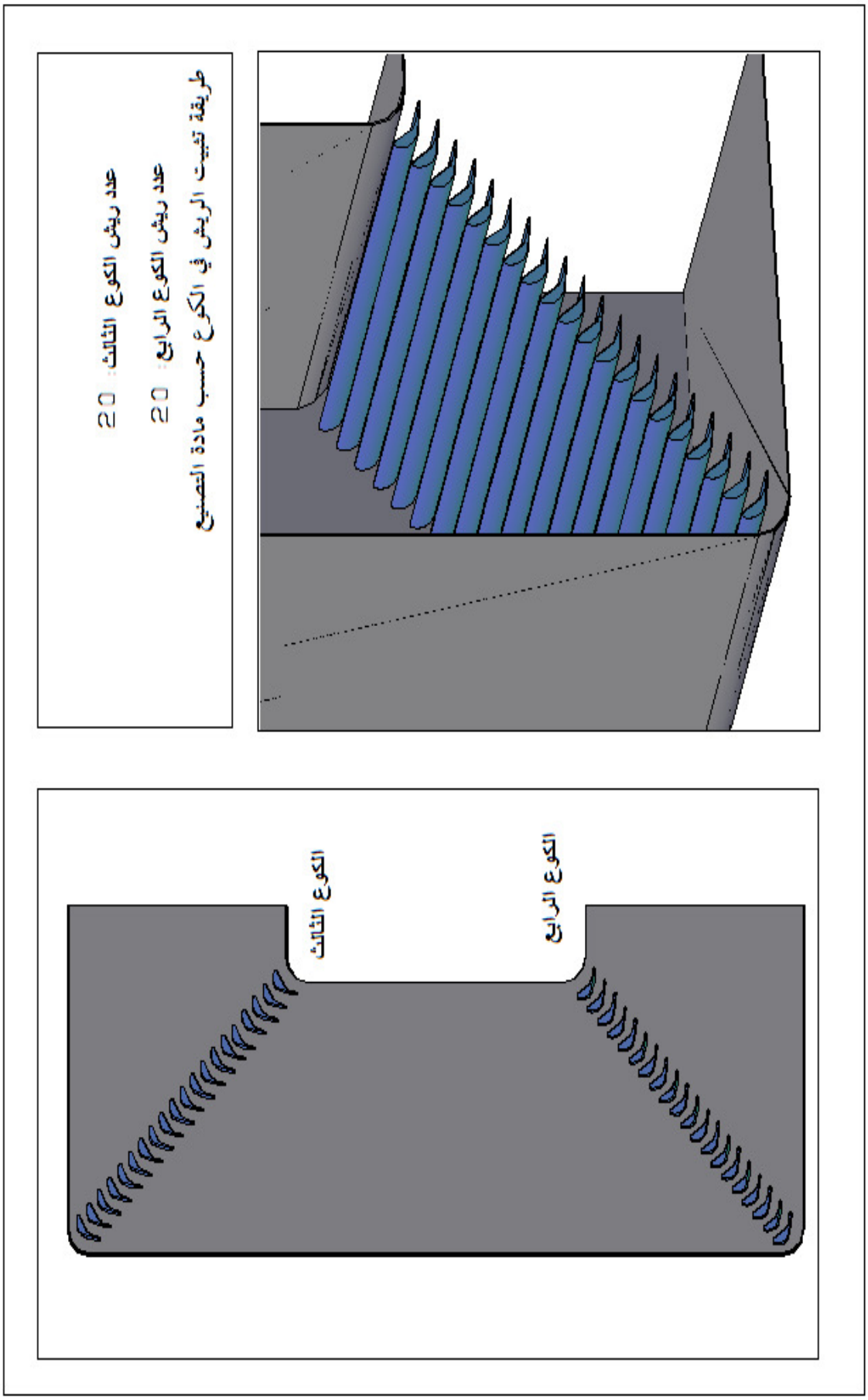


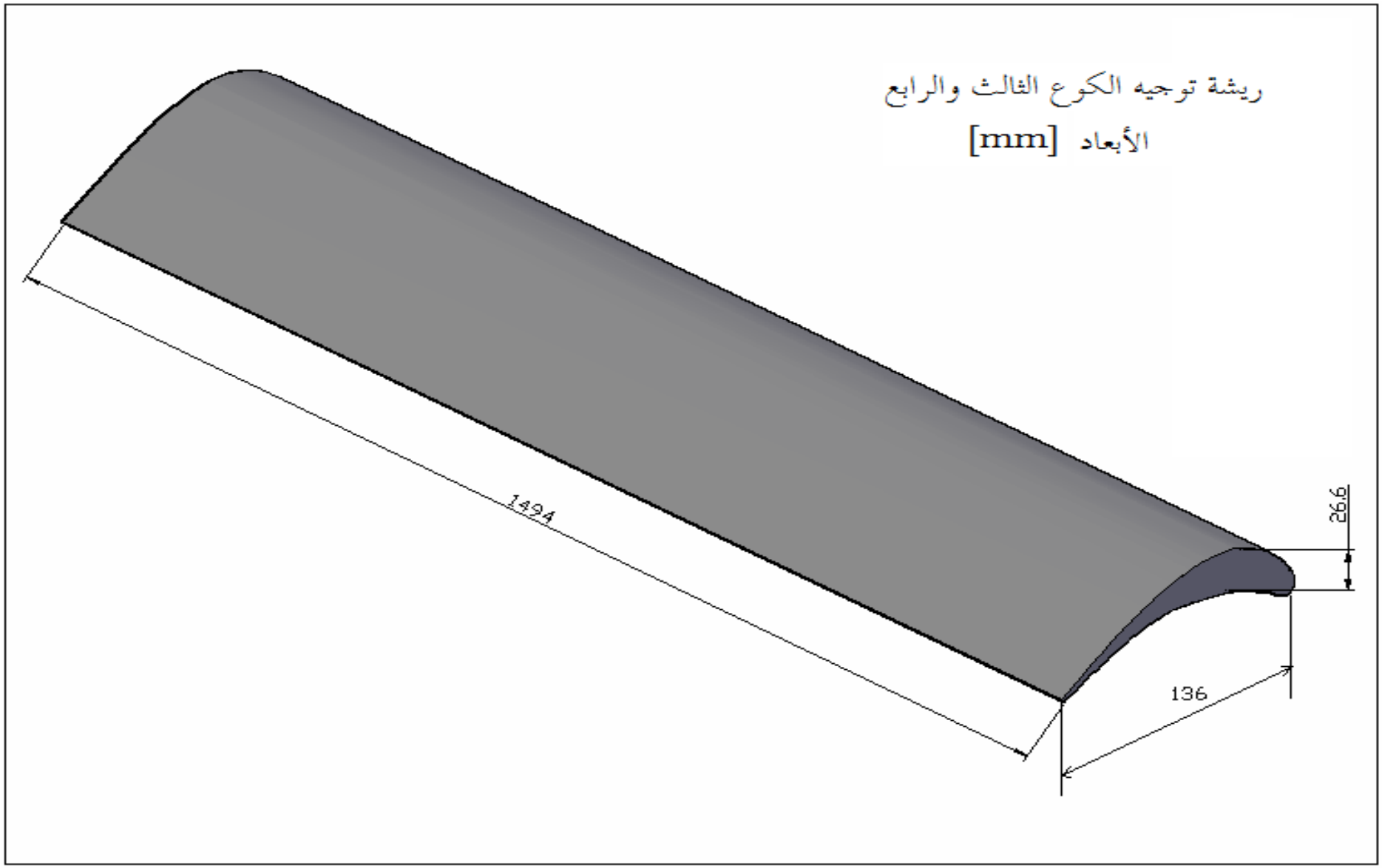
جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مسقط افقي للكوع الثالث والرابع		
رقم القطعة	3.3+3.4	رقم المخطط	9/12

جدول الكميات

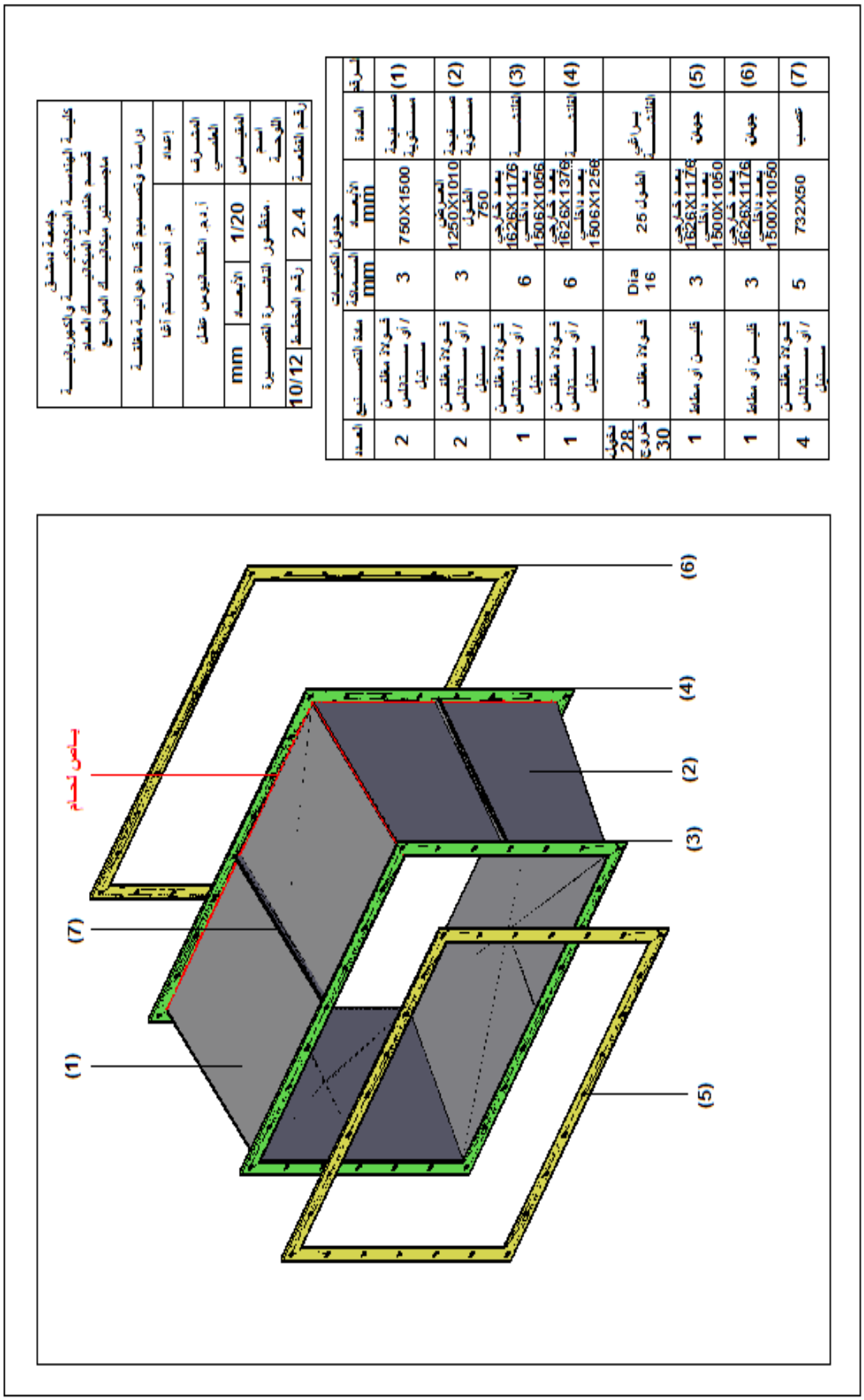
الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	موضحة في رسم الانفراد	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	صفيحة مستوية	3100X1500	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(4)	صفيحة مستوية	1010X1500	3	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
(5)	القلنسة	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1506X1056	6	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مقلفن	دخول 28 خروج 28
(6)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	قلين أو مطاط	2
(7)	عصب		5	فولاذ مقلفن / أو ستانلس ستيل	10

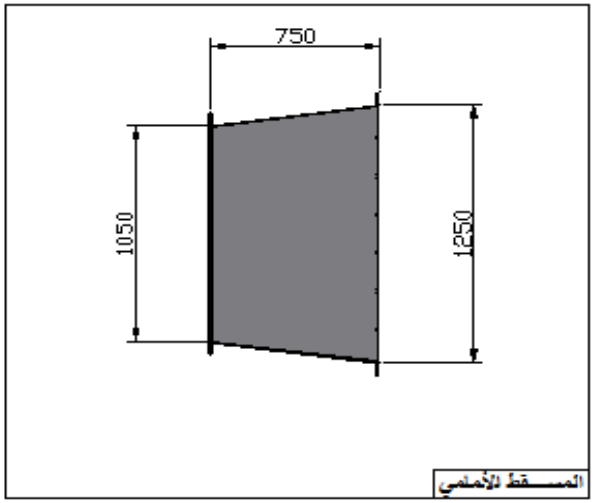
1.12.2.11 ريش التوجيه في الكوع الثالث والرابع

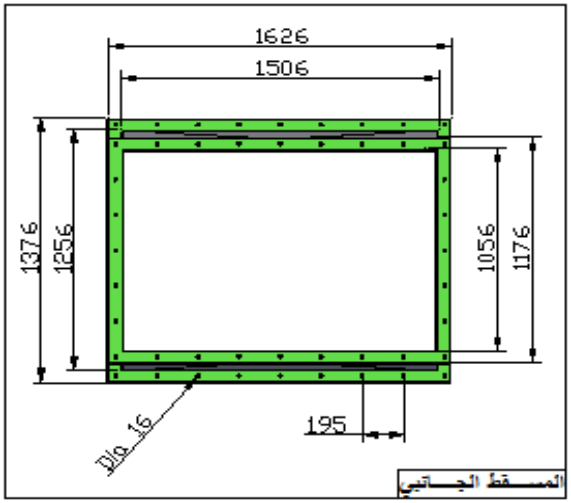



ريشة توجيه الكوع الثالث والرابع
الأبعاد [mm]
1494
136
26.6

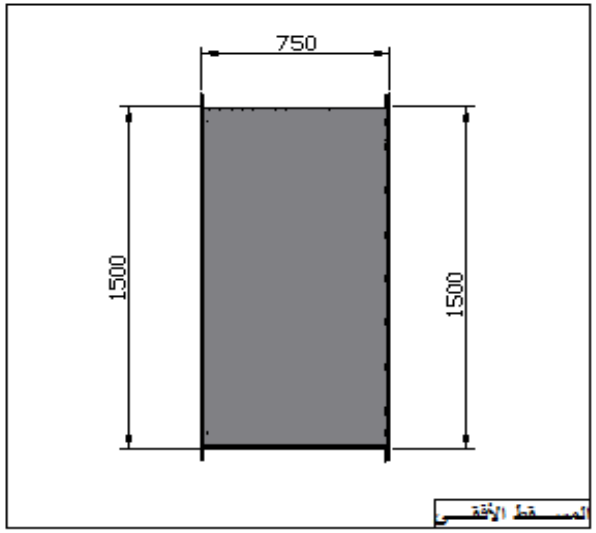
13.2.11 مخططات الناشرة القصيرة







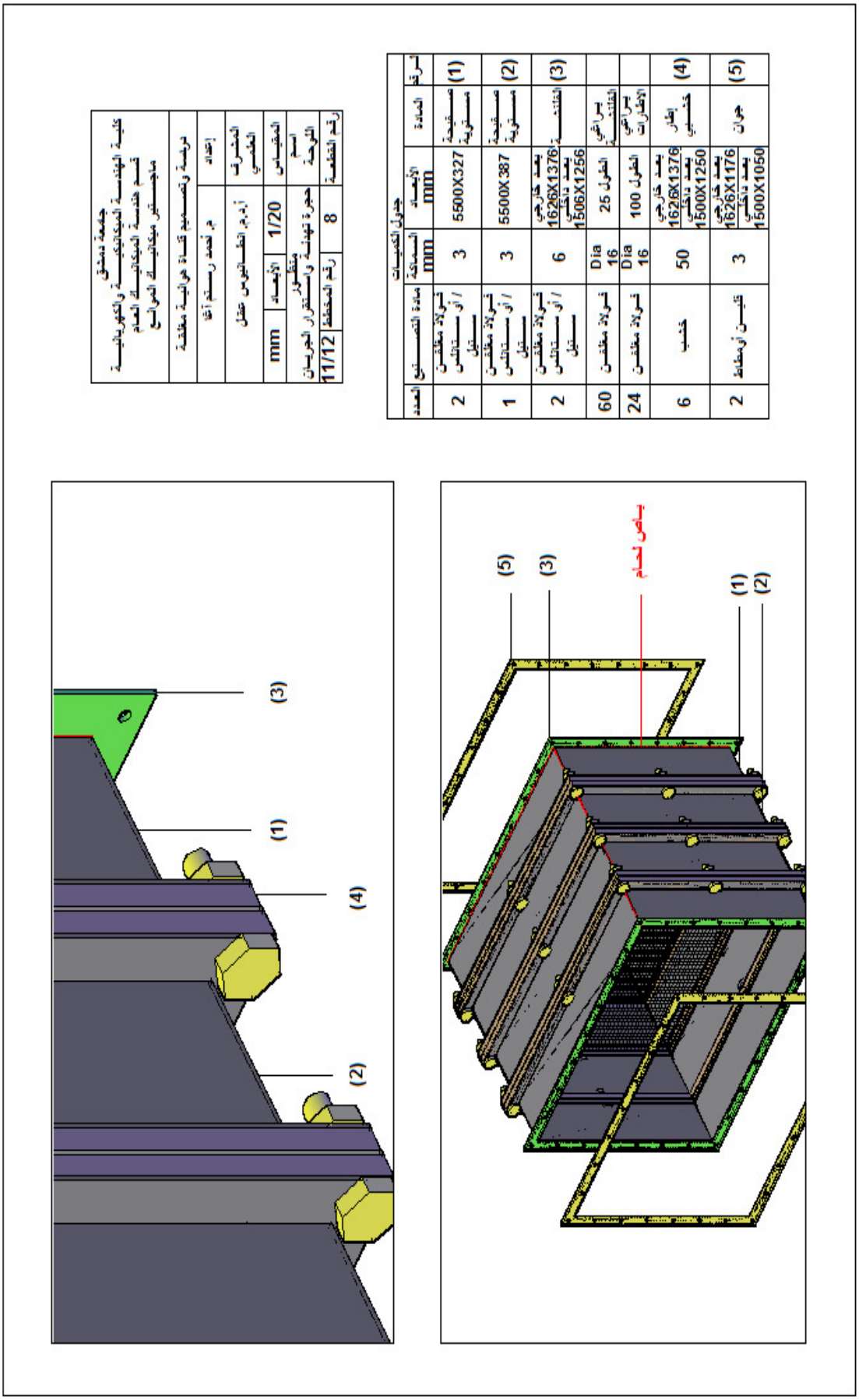
جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مساقط الناشرة القصيرة		
رقم القطعة	2.4	رقم المخطط	10/12

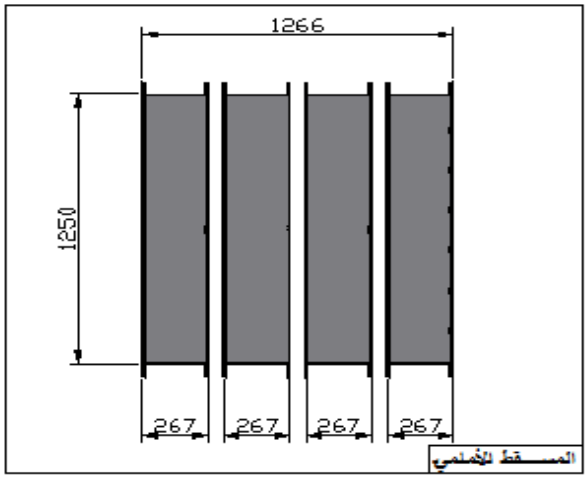


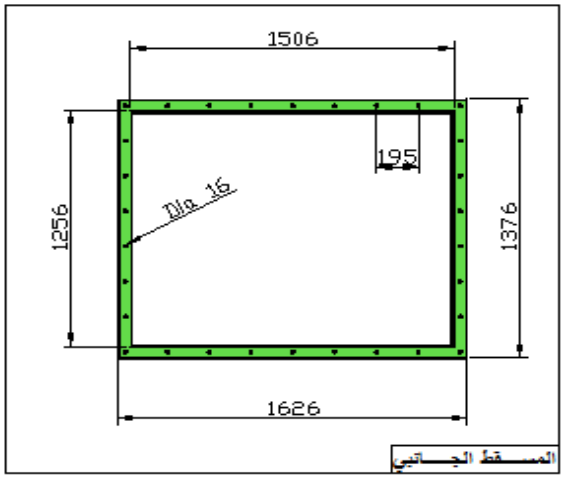
جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	750X1500	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	العرض 1250X1010 الطول 750	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(3)	الناشرة	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1506X1056	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(4)	الناشرة	بعد خارجي 1626X1376 بعد داخلي 1506X1256	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
	براغي الناشرة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	دخول 28 خروج 30
(5)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	قليون أو مطاط	1
(6)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	قليون أو مطاط	1
(7)	عصب	732X50	5	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	4

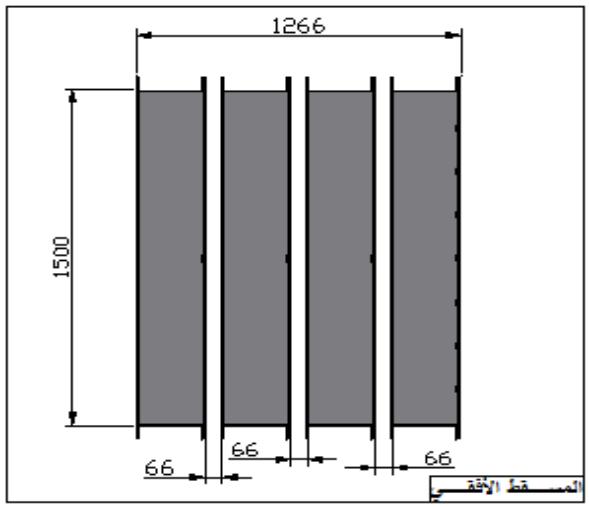
14.2.11 مخططات حجرة تهدئة واستقرار الجريان







جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مياقط حجرة تهدئة واستقرار الجريان		
رقم القطعة	8	رقم المخطط	11/12



جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	صفيحة مستوية	5500X327	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
(2)	صفيحة مستوية	5500X387	3	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	1
(3)	القلنسة	بعد خارجي 1626X1376 بعد داخلي 1506X1256	6	فولاذ مغلفن / أو ستانلس ستيل	2
	براغي القلنسة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مغلفن	60
	براغي الاطارات	الطول 100	Dia 16	فولاذ مغلفن	24
(4)	إطار خشبي	بعد خارجي 1626X1376 بعد داخلي 1500X1250	50	خشب	6
(5)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	قلين أومطاط	2

15.2.11 مخططات النفاثة

جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الميكانيك العام
مشروع ميكانيك المواصلات

دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة

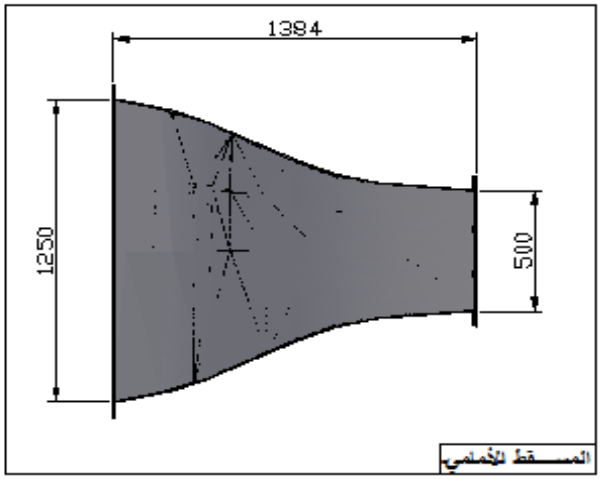
إعداد
م. أحمد رستم آغا

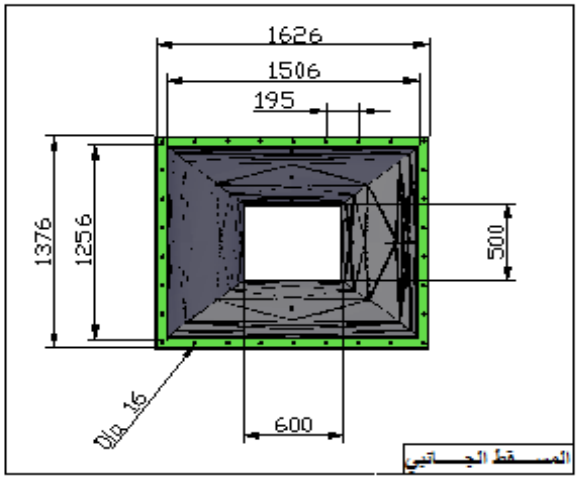
المشرف العلمي
أ.د.م. انطانيوس عقل

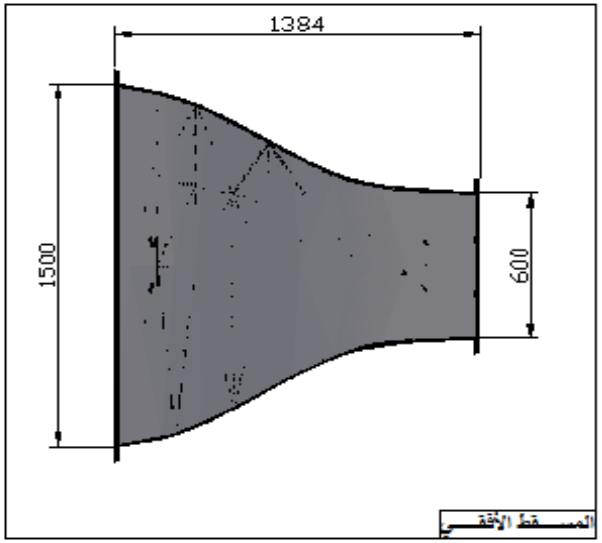
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
لوحة	منظور النفاثة		
رقم النفاثة	9	رقم المخطط	12/12

جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	النفاثة		10	فيبر غلاس	1
(2)	النفاثة	بعد خارجي 1626X1376 بعد داخلي 1506X1256	6	فولاذ مقاوم / أو ستيل دولتين	1
(3)	النفاثة	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 606X506	6	فولاذ مقاوم / أو ستيل دولتين	1
	برغي النفاثة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مقاوم	بقول 30 فرنج 12
(4)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	فيبر أو مطاط	1
(5)	جوان	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 600X500	3	فيبر أو مطاط	1
(6)	عصب	1254X50	5	فولاذ مقاوم / أو ستيل دولتين	3







جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الميكانيك العام ماجستير ميكانيك الموائع			
دراسة وتصميم قناة هوائية مغلقة			
إعداد	م. أحمد رستم آغا		
المشرف العلمي	أ.د.م. انطانيوس عقل		
المقياس	1/20	الأبعاد	mm
اسم اللوحة	مساقط النفاثة		
رقم القطعة	9	رقم المخطط	12/12

جدول الكميات

الرقم	المادة	الأبعاد mm	السماكة mm	مادة التصنيع	العدد
(1)	النفاثة		10	فيبر غلاس	1
(2)	القلنسوة	بعد خارجي 1626X1376 بعد داخلي 1506X1256	6	فولاذ مقاوم / أو ستانلس ستيل	1
(3)	القلنسوة	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 606X506	6	فولاذ مقاوم / أو ستانلس ستيل	1
	براغي القلنسوة	الطول 25	Dia 16	فولاذ مقاوم	دخول 30 خروج 12
(4)	جوان	بعد خارجي 1626X1176 بعد داخلي 1500X1050	3	فلين أو مطاط	1
(5)	جوان	بعد خارجي 726X626 بعد داخلي 600X500	3	فلين أو مطاط	1
(6)	عصب	1254X50	5	فولاذ مقاوم / أو ستانلس ستيل	3

طريقة التصنيع: سوف يتم تصنيع نموذج خشبي للنفاثة بالأبعاد الموضحة ومن ثم صب طبقة من الفيبر غلاس بسماكة 6 [mm]

3.11 الملحق C

حساب الكلفة التقديرية لتصنيع القناة الهوائية محلياً ومقارنتها مع كلفة استيراد قناة مماثلة

1.3.11 أسس ومنطلقات حساب الكلفة التقديرية للتصنيع المحلي 249

2.3.11 كفة استيراد قناة مماثلة 250

3.3.11 أجهزة القياس المطلوبة 250

4.3.11 الخلاصة 250

1.3.11 أسس ومنطلقات حساب الكلفة التقديرية للتصنيع المحلي

1. مادة التصنيع: صفائح من الفولاذ المغلفن بسماكة *3 mm*.
2. كلفة شراء وتشغيل *1 kg* وفقاً لأسعار السوق *200* ل.س.
3. ستصنع النفاثة من الفيبرجلاس وتحسب تكلفتها مستقلة.
4. التصميم الخاص لقسم الاختبار ليعمل مغلقاً أو مفتوحاً يتطلب تكلفة مستقلة.
5. أسعار العناصر المقترح استيرادها وضعت استناداً لعروض حصلنا عليها من مراسلة شركات اختصاصية وحسبنا سعر القطع بالسعر الرسمي الدارج للقطع الأجنبي.
6. تكلفة الهيكل المعدني الحامل لقناة تشمل عناصر التثبيت بالسقف ومخمدات الاهتزاز وتبلغ كتلته الإجمالية *2644 kg* بعد إضافة *30 %* تشريك الجدول *(C – 1)*.
7. الكتلة الإجمالية للقناة بدون النفاثة والفلانجات والبراغي والمروحة وريش التوجيه وخلايا عش النحل والمناخل تبلغ *2300 kg* بعد إضافة *30 %* تشريك، (انظر الجدول *(3.3)* ص*64*).

بذلك تنتج الكلفة التقديرية كما يلي:

أ) العناصر المصنعة محلياً:

• جسم القناة حسب *(7)*:	*460,000* ل.س.
• النفاثة:	*300,000* ل.س.
• قسم الاختبار:	*200,000* ل.س.
• الهيكل المعدني الحامل:	*566,000* ل.س.
• فلانجات وبراغي الجدول *(C – 2)*:	*90,000* ل.س.
المجموع:	*1,616,000* ل.س.

ب) العناصر المقترح استيرادها:

• قسم المروحة مع محركها:	*10,000* يورو.
• ريش التوجيه:	*8,000* يورو.
• خلايا عش النحل والمناخل:	*7,000* يورو.
• قاعدة بيانات وتحكم:	*5,000* يورو.
المجموع:	*30,000* يورو وتعادل *3,000,000* ل.س.

ت) الكلفة الإجمالية: *4,616,000* ل.س تضاف إليها أجور التجميع والتركيب في المخبر بواقع *20 %* من الكلفة الإجمالية.

2.3.11 كلفة استيراد قناة مماثلة

1. لم نستطع الحصول على عرض فني ومالي من شركة *Lippold* الألمانية الاختصاصية بتصنيع الأقنية الهوائية لأسباب تتعلق بحظر التصدير المفروض على قطرنا، وحصلنا على معلومة من أستاذ ميكانيك السوائل بجامعة ريجنزبورج الألمانية لقناة مماثلة لقناتنا بأن الأسعار تتراوح مابين *250,000 – 500,000* يورو. نعتمد للمقارنة مبلغ *300,000* يورو أي ما يعادل *30* مليون ل.س تضاف إليها أجور النقل والتخليص والتركيب.
2. حصلنا من شركة كروما الإندونيسية على عرض فني ومالي لقناة هوائية وفق مواصفاتنا الفنية. وكانت الأسعار كما يلي:

- كلفة القناة كاملة مع الهيكل المعدني الحامل لها وقاعدة بيانات وتحكم بقسم اختبار يعمل مغلقاً ومفتوحاً، أرض المعمل: *275,000* دولار أمريكي، يضاف لها كلفة شحن بواقع *15 %*، يصبح السعر واصل أرض الكلية: *316,250* دولار أمريكي، أي ما يعادل *253,000* يورو = *25,300,000* ل.س.

أي أن التكلفة تعادل حوالي *5* أضعاف تكلفة التصنيع المحلي المقدرة. يضاف لها أجور تركيب وتشغيل وتدريب بمبلغ *35,000* دولار أمريكي أي ما يعادل *2,800,000* ل.س.

3.3.11 أجهزة القياس المطلوبة

هذه الأجهزة ضرورية سواء تم تصنيع القناة محلياً أو تم استيرادها:

1. تحديث نظام قياس السرعة بالسلك الساخن المتوفر بالكلية:	*20,000* يورو.
2. مقياس سرعة ليزري دوبلري *LDA* وفق أسعار شركة *Dantec*:	*120,000* يورو.
3. ميزان قوى وعزوم سداسي المركبات:	*48,000* يورو.
4. نظام تثبيت وتحريك وتوضيع أجهزة القياس ثلاثي الاتجاهات:	*16,000* يورو.
5. حامل نموذج:	*10,000* يورو.
مجموع تكلفة أجهزة القياس، أرض المعمل:	*214,000* يورو.
أي ما يعادل:	*21,4* مليون ل.س

يضاف إليها تكاليف النقل والتخليص والتدريب والتركيب. وتجدر الإشارة أن الأسعار المقدرة أعلاه للبندين (*1* و *2*) مبنية على معطيات من جامعة روستوك بناء على عروض من شركة *DANTEC*، أما أسعار البنود (*3 – 5*) فتستند إلى عرض شركة كروما الأندونيسية.

4.3.11 الخلاصة

- يجب أن يكون واضحاً أن الأسعار الإفرادية والإجمالية المذكورة أعلاه هي أسعار تقديرية ولكنها تستند على أسس واقعية. كما أن سعر القطع الأجنبي عرضة للتغيير زيادة أو نقصاناً. وبالتالي لا يمكن تحديد الأسعار والتكاليف

الفعلية إلا في حينها وعلى أساس استدراج عروض من شركات مختصة، سواء بالنسب لحالة التصـــنيع المحلـــي أو الاستيراد.

- بالنسبة لأجهزة القياس من الممكن في البداية تأجيل شراء مقياس السرعة الليزري الدوبلري والاكتفاء بتحـــديث نظام السلك الساخن. أما الأجهزة المذكورة في البنود *3* إلى *5* فهي ضرورية جداً حتى لا تبقى القناة كتلة معدنية فقط.

الجدول *(1 - C)*: كتلة الهيكل الحامل للقناة الهوائية وكلفة تصنيعه وتصنيعها، أرقام القطع مأخوذة من جدول الكميات الخاص بالهيكل الحامل ص *201*:

رقم القطعة	الأبعاد [m]		السماكة [m]	الخيط [m]	الحجم [m3]	الكتلة [kg]	العدد المطلوب	الكتلة الإجمالية [kg]	سعر الكيلوغرام + كلفة تشغيله ل.س/كغ	الكلفة الإجمالية [ل.س]
(1)	4.785	0.1	0.003	0.4	0.005742	45.0747	4	180.2988		
(2)	4.63	0.1	0.003	0.4	0.005556	43.6146	4	174.4584		
(3)	1.6	0.1	0.003	0.4	0.00192	15.072	10	150.72		
(4)	3.46	0.1	0.003	0.4	0.004152	32.5932	2	65.1864		
(5)	1.2	0.1	0.003	0.4	0.00144	11.304	10	113.04		
(6)	1.035	0.1	0.003	0.4	0.001242	9.7497	8	77.9976		
(7)	0.4	0.1	0.003	0.4	0.00048	3.768	2	7.536		
(8)	0.8	0.1	0.003	0.4	0.00096	7.536	8	60.288		
(9)	1.01	0.1	0.003	0.4	0.001212	9.5142	4	38.0568		
(10)	2	0.1	0.003	0.4	0.0024	18.84	6	113.04		
(11)	1.3	0.1	0.003	0.4	0.00156	12.246	2	24.492		
(12)	4.084	0.2	0.003	4.084	0.00245	19.23564	2	38.47128		
(13)	1.22	0.1	0.003	0.4	0.001464	11.4924	4	45.9696		
(14)	3.93	0.1	0.003	0.4	0.004716	37.0206	4	148.0824		
(15)	3.795	0.1	0.003	0.4	0.004554	35.7489	4	142.9956		
(16)	0.2	0.2	0.02	0.8	0.0032	25.12	26	653.12		
	كتلة الهيكل المعدني بالكامل							**2033.75288**		
كتلة الهيكل المعدني الحامل إضافة لـ 30 % نسبة تشريك								**2643.87874**	**200**	**528775.749**
مخمدات عدد 12										**36000**
كتلة القناة إذا تم تصنيعها من الستانلس ستيل إضافة لـ 30 % نسبة تشريك، الجدول (3.3)								**2353**	**600**	**1411800**
كتلة القناة إذا تم تصنيعها من الفولاذ المغلفن إضافة لـ 30 % نسبة تشريك، الجدول (3.3)								**2300**	**200**	**460000**

الجدول *(2 - C)*: حساب كتلة الفلانجات وتكلفتها:

العنصر		الفلنشة	الأبعاد الخارجية [m]		المساحة الخارجية [m2]	الأبعاد الداخلية [m]		المساحة الداخلية [m2]	مساحة سطح الفلنشة [m2]	حجم الصاج اللازم للفلنشة [m3]	كتلة الفلنشة [kg]	سعر الكيلو غرام + كلفة تشغيله [ل.س]	كلفة تثقيب [ل.س]	كلفة الفلنشة [ل.س]
قسم الاختبار		فلنشة مقطع الدخول	0.626	0.726	0.454476	0.506	0.606	0.306636	0.14784	0.000887	6.963264	250	500	2240.816
		فلنشة مقطع الخروج	0.626	0.726	0.454476	0.506	0.606	0.306636	0.14784	0.000887	6.963264	250	500	2240.816
المجمع		فلنشة مقطع الدخول	0.626	0.726	0.454476	0.506	0.606	0.306636	0.14784	0.000887	6.963264	250	500	2240.816
		فلنشة مقطع الخروج	0.626	0.726	0.454476	0.506	0.606	0.306636	0.14784	0.000887	6.963264	250	500	2240.816
الشاشرة 1		فلنشة مقطع الدخول	0.626	0.726	0.454476	0.506	0.606	0.306636	0.14784	0.000887	6.963264	250	500	2240.816
		فلنشة مقطع الخروج	0.866	1.036	0.897176	0.726	0.916	0.665016	0.23216	0.001393	10.93474	250	500	3233.684
الكوع 1و2		فلنشة مقطع الدخول	0.866	1.036	0.897176	0.726	0.916	0.665016	0.23216	0.001393	10.93474	250	500	3233.684
		فلنشة مقطع الخروج	0.866	1.036	0.897176	0.726	0.916	0.665016	0.23216	0.001393	10.93474	250	500	3233.684
الشاشرة 2		فلنشة مقطع الدخول	0.866	1.036	0.897176	0.726	0.916	0.665016	0.23216	0.001393	10.93474	250	500	3233.684
		فلنشة مقطع الخروج دائرية	1.126		0.995283	1.006		0.794448	0.200834	0.001205	9.4593	250	500	2864.825
قسم المروحة		فلنشة مقطع الدخول دائرية	1.126		0.995283	1.006		0.794448	0.200834	0.001205	9.4593	250	500	2864.825
		فلنشة مقطع الخروج دائرية	1.126		0.995283	1.006		0.794448	0.200834	0.001205	9.4593	250	500	2864.825
الشاشرة 3		فلنشة مقطع الدخول دائرية	1.176		1.085636	1.056		0.875382	0.210254	0.001262	9.902982	250	500	2975.746
		فلنشة مقطع الخروج دائرية	1.176		1.085636	1.056		0.875382	0.210254	0.001262	9.902982	250	500	2975.746
القطع الانتقالي		فلنشة مقطع الدخول	1.176	1.626	1.912176	1.056	1.506	1.590336	0.32184	0.001931	15.15866	250	500	4289.666
		فلنشة مقطع الخروج	1.176	1.626	1.912176	1.056	1.506	1.590336	0.32184	0.001931	15.15866	250	500	4289.666
الكوع 3و4		فلنشة مقطع الدخول	1.176	1.626	1.912176	1.056	1.506	1.590336	0.32184	0.001931	15.15866	250	500	4289.666
		فلنشة مقطع الخروج	1.176	1.626	1.912176	1.056	1.506	1.590336	0.32184	0.001931	15.15866	250	500	4289.666
الشاشرة 4		فلنشة مقطع الدخول	1.176	1.626	1.912176	1.056	1.506	1.590336	0.32184	0.001931	15.15866	250	500	4289.666
		فلنشة مقطع الخروج	1.376	1.626	2.237376	1.256	1.506	1.891536	0.34584	0.002075	16.28906	250	500	4572.266
حجرة الاستقرار		فلنشة مقطع الدخول	1.376	1.626	2.237376	1.256	1.506	1.891536	0.34584	0.002075	16.28906	250	500	4572.266
		فلنشة مقطع الخروج	1.376	1.626	2.237376	1.256	1.506	1.891536	0.34584	0.002075	16.28906	250	500	4572.266
الفقاقة		فلنشة مقطع الدخول	1.376	1.626	2.237376	1.256	1.506	1.891536	0.34584	0.002075	16.28906	250	500	4572.266
		فلنشة مقطع الخروج	0.626	0.726	0.454476	0.506	0.606	0.306636	0.14784	0.000887	6.963264	250	500	2240.816
		المجموع									**268.9526**			**79238.15**
عدد البراغي		266	وزن البرغي		100 g	كتلة البراغي		26.600 kg	سعر البرغي	40 ل.س	الكلفة الإجمالية للبراغي			10,640 ل.س