



كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية  
تخصص: طاقة

من إعداد الطالبتين:

قنز شهيناز

ضيف دعاء

مذكرة ماستر بعنوان:

تحليل وتجسيد نفقين هوائيين قابل للانضغاط وغير قابل  
للانضغاط

تحت اشراف الأستاذ

البروفيسور. رمزي مدوكي

أمام لجنة المناقشة

الاسم واللقب	الرتبة العلمية	الصفة
ب. بلعيزية عبد الناصر	أستاذ محاضر قسم - أ-	رئيسا
ب.مدوكي رمزي	أستاذ محاضر قسم - أ-	مشرفاً ومقرراً
د.بوعفان عبد الكريم	أستاذ محاضر قسم - ب-	عضواً مناقشاً
د.محمد الشريف نايت حمود		ممثلاً للحاضنة
د.هادفي تركية		الشريك الاجتماعي والاقتصادي

السنة الجامعية: 2022 - 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

[ يَرْفَعِ اللّٰهُ الدِّیْنَ اٰمَنُوْا مِنْكُمْ وَ الدِّیْنَ اُوْتُوْا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ]

[المجادلة11]

# الوفاء

الحمد لله وكفى والصلاة على الحبيب المصطفى وأهله ومن وفى أما بعد:

الحمد لله الذي وفقنا للتثمين هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه

ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى مهداة الى الوالدين الكريمين حفظهما الله

وأدامهما نورا لدرابنا

لكل العائلة الكريمة التي ساندتنا ولا تزال من اخوة وأخوات

الى كل من ساندنا ووقف بجانبنا وامن بقدراتنا

الى كل من كان لهم أثر على حياتنا

شهبناز و دعاء

# الشكر و العرفان :

قال تعالى : " ولئن شكرتم لأزيدنكم "

الى الذي كل نعمة منه فضل ، وكل نعمة منه عدل،

الى الذي ألهمنا الصبر وأمدنا بالشجاعة والعطاء لإنجاز هذا العمل

لك الحمد والشكر يا رب العالمين

نتقدم بكل كلمات الشكر والتقدير الى الذي كان عوننا لنا لإتمام هذا العمل

البروفيسور : "رمزي مدوكي "

كما نتقدم بجزيل الشكر للدكتور "بوعفان عبد الكريم" الذي لم يبخل علينا

بمعلومة

كما يسعدنا أن نتقدم بأسمى آيات الشكر والامتنان

الى كل أساتذة قسم الهندسة الميكانيكية خاصة تخصص طاقوية

والشكر موصول لكل من ساعدنا ونخص بالذكر الدكتور علاء الدين

مكاحلية والدكتور شعيب سوايدية .

# الفهرس :

1 ..... مقدمة عامة

## الفصل الاول

### عموميات حول الأنفاق الهوائية

- 1.I ..... 1. مقدمة
- 1.I ..... 2. تعريف النفق الهوائي :
- 1.I ..... 3. نبذة تاريخية :
- 2.I ..... 4. تصنيف أنفاق الرياح : [1]
- 2.I ..... 1.4.I أنظمة عدد ماخ :
- 4.I ..... 2.4.I تصميم النفق :
- 6.I ..... 3.4.I نوع المائع العملي :
- 6.I ..... 4.4.I تصنيف الأنفاق الهوائية حسب نوع غرفة الإختبار :
- 8.I ..... 5.4.I تصنيف الأنفاق الهوائية حسب موقع المروحة [3]:
- 9.I ..... 5.I أنواع أخرى من الأنفاق الهوائية : [2]
- 9.I ..... 1.5.I أنفاق هوائية مناخية: (Souffleries climatiques)
- 9.I ..... 2.5.I أنفاق هوائية مبردة: (Souffleries cryogéniques)
- 10.I ..... 3.5.I أنفاق هوائية مضغوطة: (Souffleries pressurisées)
- 10.I ..... 4.5.I أنفاق هوائية كبيرة جدا: (très grandes souffleries)
- 11.I ..... 5.5.I نفق الرياح القوسي: (Soufflerie à arc)
- 11.I ..... 6.I عناصر تصميم النفق الهوائي التحت الصوتي [3]:
- 11.I ..... 1.6.I المروحة:

13	..... (2.5.I) ناشر المدخل
13	..... (3.5.I) غرفة التهئة:
13	..... (4.5.I) المتقارب:
15	..... (5.5.I) غرفة الإختبار:
15	..... (6.5.I) ناشر المخرج:
16	..... (7.5.I) أجهزة مضادة للإضطرابات:

## الفصل الثاني:

### دراسة النفق الهوائي القابل للضغط

18	..... 1.II مقدمة
18	..... 2.II الدراسة الهندسية لعناصر التصميم:
18	..... (1.2.II) الناسفة :
19	..... (2.2.II) تصميم ناشر المدخل الاول :
21	..... (3.2.II) تصميم ناشر المدخل الثاني:
23	..... (4.2.II) تصميم غرفة التهئة.....
28	..... (5.2.II) تصميم المتقارب:
30	..... (6.2.II) تصميم غرفة الاختبار :
31	..... (7.2.II) تصميم ناشر المخرج:
32	..... 3.II تقييم الضياعات في النفق الهوائي :

## الفصل الثالث:

### تحليل النفق الهوائي القابل

34	..... للضغط
----	-------------

35	1.III .مقدمة:
36	2.III المحاكاة العددية للجريان الغير لزج (Euler) :
36	1.2.III إعداد المسألة- ما قبل المعالجة العددية PRE- PROCESSING:
38	2.2.III المعالجة العددية: Processing
39	3.2.III المعالجة النهائية Post Processing:
41	3.III المحاكاة العددية للجريان اللزج(Viscous) :

#### الفصل الرابع:

#### تصميم النفق الهوائي الغير قابل للانضغاط

51	1.IV مقدمة :
51	2.IV تصميم النفق الهوائي الغير قابل للانضغاط :
51	1.2.IV تصميم غرفة الاختبار :
53	2.2.IV تصميم المتقارب :
54	3.2.IV تصميم الناشر :
55	4.2.IV تصميم المروحة :
55	5.2.IV تصميم الرابط :
56	6.2.IV تصميم قناة المروحة :

#### الفصل الخامس:

#### تحليل النفق الهوائي غير قابل للانضغاط

58	1.V مقدمة :
58	2.V المحاكاة العددية للنفق الهوائي بدون مروحة :
58	1.2.V إعداد المسألة- ما قبل المعالجة العددية PRE- PROCESSING:
61	2.2.V المعالجة العددية: Processing



62 .....:Post Processing 3.2.V المعالجة النهائية

64 ..... : 3.V المحاكاة العددية للنفق الهوائي بمروحة

### الفصل السادس :

#### تجسيد نفق هوائي غير قابل للاضغاط

69 ..... : 1.VI مقدمة

69 ..... : 2.VI الأدوات المستعملة

70 ..... : 1.2.VI المتقاب الكهربائي العمودي

70 ..... : 2.2.VI طاحونة القرص

71 ..... : 3.2.VI آلة تلحيم

72 ..... : 3.VI انجاز المتقارب

75 ..... : 4.VI انجاز غرفة الاختبار

76 ..... : 5.VI انجاز الناشر

77 ..... : 6.VI انجاز الرباط

77 ..... : 7.VI انجاز قناة المروحة

78 ..... : 9.VI تركيب لوح الأردوينو

78 ..... : 10.VI الشكل النهائي

80 ..... القائمة العامة

82 ..... قائمة المراجع

## قائمة الأشكال

- الشكل (1.I) : نفق هوائي تحت صوتي ..... 2
- الشكل (2.I) : نفق هوائي عبر صوتي ..... 3
- الشكل (3.I) : نفق هوائي فوق صوتي ..... 3
- الشكل (4.I) : نفق هوائي فائق للصوت ..... 4
- الشكل (5.I) : نفق هوائي ذو دائرة مفتوحة ..... 5
- الشكل (6.I) : نفق هوائي ذو دائرة مغلقة ..... 5
- الشكل (7.I) : غرفة إختبار مفتوحة ..... 7
- الشكل (8.I) : غرفة إختبار موجهة ..... 8
- الشكل (9.I) : غرفة إختبار نصف موجهة ..... 8
- الشكل (10.I) : نفق هوائي مناخي ..... 9
- الشكل (11.I) : نفق ONERA ..... 10
- الشكل (12.I) : مروحة ناسفة ..... 13
- الشكل (14.I) : متقارب في هيئة ثلاثية الأبعاد ..... 14
- الشكل (16.I) : ناشر في هيئة ثلاثية الأبعاد ..... 16
- الشكل (17.I) : بيت نحل ..... 17
- الشكل (18.I) : حواجز شبكية ..... 18
- الشكل (1.II) : ناشر المدخل الاول ..... 20
- الشكل (2.II) : ناشر المدخل الثاني ..... 22
- الشكل (3.II) : غرفة التهدة ..... 23
- الشكل (4.II) : خلية النحل ..... 25

25	الشكل(5.II): أطوال خلية النحل .....
28	الشكل(6.II): الأبعاد الهندسية للحاجز الشبكي .....
29	الشكل(7.II): المتقارب .....
30	الشكل(8.II): غرفة الاختبار .....
30	الشكل(9.II): ناشر المخرج .....
35	الشكل(3.III): تشكيل الشبكة في النفق القابل للانضغاط .....
39	الشكل(4.III): منحني تغيرات السرعة ل CFD و Design لجريان غير لزج.....
39	الشكل(5.III):منحني تغيرات عدد ماخ ل CFD و Design لجريان غير لزج.....
40	الشكل(6.III):منحني تغيرات الضغط الساكن ل CFD و Design لجريان غير لزج.....
40	الشكل (7.III):منحني تغيرات الضغط الكلي ل CFD و Design لجريان غير لزج .....
40	الشكل(8.III): منحني تغيرات درجة الحرارة الساكنة ل CFD و Design لجريان غير لزج .....
41	الشكل(9.III): منحني تغيرات درجة الحرارة الكلية ل CFD و Design لجريان غير لزج .....
41	الشكل(10.III):منحني تغيرات الكتلة الحجمية ل CFD و Design لجريان غير لزج .....
41	الشكل(11.III):منحني تغيرات السرعة ل CFD و Design لجريان لزج.....
42	الشكل(12.III):منحني تغيرات عدد ماخ ل CFD و Design لجريان لزج.....
43	الشكل(13.III):منحني تغيرات الضغط الساكن ل CFD و Design لجريان لزج.....
43	الشكل(14.III):منحني تغيرات الضغط الكلي ل CFD و Design لجريان لزج.....
	<b>الشكل(15.III):منحني تغيرات درجة الحرارة الساكنة ل CFD و Design لجريان لزج</b> <b>Erreur ! Signet non défini.</b>
44	الشكل(16.III):منحني تغيرات درجة الحرارة الكلية ل CFD و Design لجريان لزج .....
44	الشكل(17.III):منحني تغيرات الكتلة الحجمية ل CFD و Design لجريان لزج .....
44	الشكل(18.III):منحني تغيرات السرعة بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج.....
45	الشكل(19.III):منحني تغيرات عدد ماخ بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج.....

- الشكل(20.III):منحنى تغيرات الضغط الساكن بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج.. ! **Erreur**  
**Signet non défini.**
- الشكل(21.III): منحنى تغيرات الضغط الكلي بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج ..... 46
- الشكل(22.III): منحنى تغيرات درجة الحرارة الساكنة بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج ... 46
- الشكل(23.III): منحنى تغيرات درجة الحرارة الكلية بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج ..... 47
- الشكل(24.III): منحنى تغيرات الكتلة الحجمية بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج ..... 47
- الشكل(1.IV): العناصر الرئيسية للنفق الهوائي المراد تصميمه. .... 51
- الشكل(2.IV): غرفة الاختبار ..... 52
- الشكل(3.IV): المتقارب ..... 54
- الشكل(4.IV): الناشر ..... 55
- الشكل(5.IV): الرابط ..... 56
- الشكل(6.IV): قناة المروحة..... 57
- الشكل(1. V): الشكل الهندسي للنفق الغير قابل للانضغاط ..... 58
- الشكل(2. V): منحنى السرعة عند مخرج النفق بدلالة عدد الخلايا ..... 59
- الشكل(3. V): الشكل الهندسي للنفق الغير قابل للانضغاط..... 60
- الشكل(4. V): منحنى تغيرات السرعة ل CFD و Design لنفق بدون مروحة..... 63
- الشكل(5. V): منحنى تغيرات الضغط الساكن ل CFD و Design لنفق بدون مروحة..... 63
- الشكل(6. V): منحنى تغيرات الضغط الكلي ل CFD و Design لنفق بدون مروحة ..... 64
- الشكل(7. V): منحنى تغيرات السرعة ل CFD و Design لنفق بمروحة..... 65
- الشكل(8. V): منحنى تغيرات الضغط الساكن ل CFD و Design لنفق بمروحة..... 65
- الشكل(9. V): منحنى تغيرات الضغط الكلي ل CFD و Design لنفق بمروحة ..... 66
- الشكل(10. V): خريطة تبين تغيرات السرعة في النفق بمروحة..... 66
- الشكل(11.V): خريطة تبين تغيرات الضغط الساكن في النفق بمروحة..... 67

- الشكل(12.V):خريطة تبين تغيرات الضغط الكلي في النفق بمروحة. 67 .....
- الشكل(13.V):خريطة تبين تغيرات شدة الاضطراب في النفق بمروحة. 68 .....
- الشكل(1.VI): متقاب كهربائي عمودي..... 70 .....
- الشكل(2.VI): طاحونة القرص ..... 71 .....
- الشكل(3.VI): آلة التلحيم ..... 72 .....
- الشكل(4.VI): شكل المتقارب باستخدام برنامج Tecplot..... 72 .....
- الشكل(5.VI):وجه المتقارب بعد قصه ..... 73 .....
- الشكل(6.VI):اطار مدخل ومخرج المتقارب ..... 73 .....
- الشكل(7.VI): تركيب أوجه المتقارب داخل الاطار ..... 74 .....
- الشكل(8.VI):شكل المتقارب بعد تلحيمه ..... 74 .....
- الشكل(9.VI): الشكل النهائي للمتقارب..... 75 .....
- الشكل(10.VI):غرفة الاختبار ..... 75 .....
- الشكل(11.VI):أوجه الناشر ..... 76 .....
- الشكل(12.VI): الشكل النهائي لناشر ..... 76 .....
- الشكل(13.VI): الشكل النهائي لرابط ..... 77 .....
- الشكل(14.VI): الشكل النهائي لقناة المروحة ..... 77 .....
- الشكل(15.VI): ربط جهاز الاردوينو ..... 78 .....
- الشكل(16.VI): الشكل النهائي ..... 79 .....

# قائمة الجداول

- الجدول(1.II) : خصائص الناسفة..... 19
- الجدول(2.II): أبعاد ناشر المدخل الاول ..... 21
- الجدول(3.II): خصائص ناشر المدخل الاول ..... 21
- الجدول(4.II): أبعاد ناشر المدخل الثاني..... 22
- الجدول(5.II): خصائص ناشر المدخل الثاني ..... 22
- الجدول(7.II): خصائص غرفة التهئة ..... 23
- الجدول(8.II): أبعاد المتقارب ..... 30
- الجدول(9.II): خصائص المتقارب ..... 30
- الجدول(11.II): خصائص غرفة الاختبار ..... 31
- الجدول(12.II): أبعاد ناشر المخرج..... 32
- الجدول(13.II): خصائص ناشر المخرج..... 32
- الجدول(14.II): ضياعات الضغط على مستوى ناشر المدخل الثاني ..... 34
- الجدول(15.II): ضياعات الضغط على مستوى غرفة التهئة ..... 34
- الجدول(1.III): الشروط الحديدية للنفق ..... 38
- الجدول(2.IV): خصائص غرفة الاختبار ..... 53
- Erreur ! Signet non défini.....** أبعاد المتقارب..... 54
- الجدول(4.IV): خصائص المتقارب ..... 54
- Erreur ! Signet non défini.....** أبعاد الناشر ..... 55
- الجدول(6.IV): خصائص الناشر ..... 55
- الجدول(7.IV): خصائص الرابط..... 56

- الجدول(8.IV): خصائص قناة المروحة ..... 57
- الجدول(1. V): الشروط الحدية لنفق بدون مروحة ..... 60
- الجدول(2. V): الشروط الحدية للنفق مع القيم ..... 62
- الجدول(3. V): الشروط الحدية لنفق بمروحة ..... 64

## قائمة الرموز

الرمز	دلالتة	وحدته
$M_{TS}$	عدد ماخ في غرفة الاختبار	-
$\eta_{elarg}$	نسبة التوسيع	-
$D_{hts}$	القطر الهيدروليكي لغرفة الإختبار	m
$A_{ts}$	مساحة المقطع العرضي لغرفة الإختبار	$m^2$
$P_{ts}$	محيط المقطع العرضي لغرفة الإختبار	m
$l_{ts}$	طول ضلع المقطع العرضي لغرفة الإختبار	m
$L_{ts}$	الطول المحوري لغرفة الإختبار	m
$L_{cv}$	الطول المحوري للمتقارب	m
$y$	نصف طول ضلع المقطع العرضي للمتقارب	m
$y_i$	نصف طول ضلع المقطع العرضي لمدخل المتقارب	m
$y_o$	نصف طول ضلع المقطع العرضي لمخرج المتقارب	m
$\xi$	متغير عديم البعد	-
$X$	المسافة المحورية	m
$\beta_n$	مسامية بيت النحل	-
$A_{sc}$	مساحة المقطع العرضي لغرفة التهئة	$m^2$
$l_{sc}$	طول ضلع المقطع العرضي لغرفة التهئة	m



m	القطر الهيدروليكي لغرفة التهئة	$D_{hsc}$
m	الطول المحوري لبيت النحل	$L_h$
m	القطر الهيدروليكي للخلية	$D_{hcell}$
$m^2$	مساحة المقطع العرضي للتدفق الفعلي	$A_{flow}$
m	قطر خلية بيت النحل	$d_{honey}$
m	سمك خلية بيت النحل	$S_{honey}$
m	الطول الداخلي للخلية	$l_{honey}$
m	الطول الخارجي للخلية	$l_{ghoney}$
m	طول تقسيمة بيت النحل	$Z$
-	خشونة مادة بيت النحل	$\Delta$
$m^2$	مساحة تقسيمة واحدة من بيت النحل	$A_z$
$m^2$	مساحة المستطيل	$A_{rectangle}$
$m^2$	مساحة شبه المنحرف	$A_{trapeze}$
-	عدد تقسيمات بيت النحل في الإتجاه الشاقولي	$n_z$
-	عدد تقسيمات بيت النحل في الإتجاه العرضي	$n_y$
$m^2$	مساحة المقطع العرضي للجزء الصلب من بيت النحل	$A_{sol}$
-	صلابة بيت النحل	$\sigma_h$
$m^2$	مساحة خلية بيت النحل	$A_{cell}$
-	مسامية الحاجز الشبكي	$\beta_s$

$m^2$	المساحة التي تشغلها أسلاك الحاجز الشبكي	$A_w$
m	قطر سلك الحاجز الشبكي	$d_w$
-	عدد الأسلاك في الحاجز الشبكي	$n_w$
m	طول تقسيمة الحاجز الشبكي	$w_m$
$m^2$	مساحة المقطع العرضي لمخرج الناشر	$A_{d out}$
$m^2$	مساحة المقطع العرضي لمدخل الناشر	$A_{d in}$
-	النسبة بين مساحتي مدخل و مخرج الناشر	$AR$
°	زاوية التباعد الهندسي للناشر	$\vartheta_e$
m	الطول المحوري للناشر	$L_d$
m	قطر المروحة	$D_f$
$m^2$	مساحة المقطع العرضي للمروحة	$A_f$
kg/m <sup>3</sup>	الكتلة الحجمية للهواء	$\rho$
m/s	السرعة المتوسطة للجريان في غرفة الإختبار	$V_{ts}$
m/s	سرعة المروحة	$V_f$
-	معامل الاحتكاك	$C_f$
Pa	ضيق الضغط	$\Delta p$
-	عدد رينولدز	$Re$
kg/m.s	اللزوجة الديناميكية	$\mu$
-	معامل الضيق	$K$

pas	اجهاد القص	$\tau_p$
$m^2$	المساحة الجانبية	$S_{lat}$
$m^2$	مساحة المدخل	$S_{ent}$

## الملخص :

تطرقنا في عملنا هذا الى تحليل نفقين هوائيين قابل للانضغاط وغير قابل للانضغاط وانشاء نفق هوائي غير قابل للانضغاط ، حيث تم في عملية التحليل اجراء محاكاة عددية لكل نفق على حدى باستخدام برنامج Ansys Fluent، تبين لنا ان النتائج المتحصل عليها للنفقين الهوائيين من خلال المحاكاة العددية تتوافق مع نتائج برنامج التصميم التي قام بها البروفيسور ر. مدوكي ببرنامج الفورترون.

أما عملية التجسيد تمت على كل عنصر من عناصر نفق الرياح الغير قابل للانضغاط .

**الكلمات المفتاحية :** نفق هوائي ، Ansys Fluent ، تصميم ، فورترون ، تجسيد .

## Résumé :

Dans ce travail, nous avons traité l'analyse de deux souffleries compressibles et incompressibles et la mise en place d'une soufflerie incompressible. Dans le processus d'analyse, une simulation numérique a été effectuée pour chaque tunnel séparément à l'aide du logiciel Ansys Fluent, nous montrant que les résultats obtenus pour les deux souffleries par simulation numérique Il correspond aux résultats du programme de conception mené par le Prof. R. Mdouki à partir d'un programme Fortran.

Quant au processus de réalisation, il a été réalisé sur chaque élément de la soufflerie incompressible.

**Mots clés :** Soufflerie, Ansys Fluent, Conception, Fortran, Réalisation.

**Abstract :**

In this work, we dealt with the analysis of two compressible and incompressible wind tunnels and the establishment of an incompressible wind tunnel. In the analysis process, a numerical simulation was performed for each tunnel separately using the Ansys Fluent program, showing us that the results obtained for the two wind tunnels through numerical simulation It corresponds to the results of the design program conducted by Prof. R. Mdouki program Fortran.

As for the embodiment process, it was carried out on each element of the incompressible wind tunnel.

**Keywords:** Wind tunnel, Ansys Fluent, Design, Fortran, Embodiment.

# مقدمة عامة

النفق الهوائي هو جهاز يستخدم في مجال الديناميكا الهوائية لدراسة الظواهر المرتبطة بتدفق الهواء حول : الطائرات والسيارات والمباني والهياكل الأخرى، انه أداة أساسية في مجال البحث الديناميكي الهوائي وتصميم المركبات .تستخدم الأنفاق الهوائية لتطبيقات متنوعة، فهي تسمح بقياس وتحليل القوى الديناميكية والعزوم والضغط وسرعات الهواء حول الاجسام المختبرة . هذه البيانات ضرورية لفهم وتحسين أداء المركبات ، وتقليل المقاومة وزيادة الكفاءة الطاقية وتحسين السلامة ، فهي تسمح بمحاكاة ظروف التدفق الهوائي الحقيقية واختبار تكوينات وتصاميم مختلفة قبل انتاجها .

باختصار ، الأنفاق الهوائية تلعب دورا حاسما في تطوير التقنيات الجديدة والبحث العلمي وتحسين أداء وكفاءة المركبات والهياكل . يندرج عملنا هذا ضمن تصميم وانشاء أنفاق هوائية بحلقة مفتوحة . حيث تناولنا في مذكرتنا هذه ستة فصول :

❖ الفصل الأول : عموميات حول الأنفاق الهوائية .

❖ الفصل الثاني : دراسة النفق الهوائي القابل للانضغاط من ناحية الجانب الهندسي و الجانب الديناميكي .

❖ الفصل الثالث : تحليل النفق الهوائي القابل للانضغاط ( $M=0.8$ ) من خلال تقنية CFD.

❖ الفصل الرابع : تصميم النفق الهوائي الغير قابل للانضغاط ( $M<0.3$ ).

❖ الفصل الخامس : تحليل النفق الهوائي غير قابل للانضغاط في هيئة ثلاثية البعد من خلال برنامج CFD ومقارنة النتائج المتحصل عليها مع نتائج التصميم .

❖ الفصل السادس : يتضمن انشاء عناصر النفق الهوائي التحت صوتي ، حيث تم تبين مراحل الانشاء لكل عنصر على حدى مع ذكر الأدوات المستعملة لتجسيده .

الفصل الاول :

عموميات حول الانفاق

الهوائية



## 1.1 مقدمة:

أنفاق الرياح هي ادوات التصميم الاساسية في ابحاث الديناميكا الهوائية. يتم استخدامها لدراسة تأثير تدفق الهواء عبر جسم صلب . على الرغم من التقدم الكبير في تقنيات ديناميكيات الموائع الحسابية في السنوات الاخيرة، تظل البيانات التي تم الحصول عليها من اختبارات نفق الرياح اساسية للتحكم في قرارات التصميم التفصيلية للعديد من التطبيقات الهندسية . يستعرض هذا الفصل انواعا متنوعة من انفاق الرياح والتي تتميز بالنظر الى سرعات تدفق منطقة الاختبار .

## 2.1 تعريف النفق الهوائي :

النفق الهوائي هو جهاز تجريبي يستخدم في الديناميكا الهوائية لمحاكاة الظروف التي يواجهها أي جسم يتحرك في الهواء .

الجسم المدروس في النفق الهوائي ، ثابت (موضوع) ، في تدفق اصطناعي للهواء أو الغاز .

## 3.1 نبذة تاريخية :

يعود الفضل إلى ليوناردو دافنشي في اختراع مبدأ أنفاق الرياح الديناميكية الهوائية في عام 1484. يخضع الجسم المراد دراسته لتأثير تدفق هواء اصطناعي ناتج عن طرد الهواء المضغوط. في بداية القرن العشرين تقريبًا ، تم استخدام مروحة لإنشاء المسودة. ومع ذلك ، فقد تم إدراك أن امتصاص الهواء كان أكثر فعالية من نفخه. في الواقع ، في الحالة الأولى ، يكون التدفق أكثر انتظامًا في الزمان والمكان ، ففي عام 1909 ، استخدم غوستاف إيفل نفقًا للرياح يحتوي على العضوين الأساسيين الموجودين في أنفاق الرياح الحديثة ، وهما المجمع والناشر.

في الوقت الحاضر هناك بضع مئات من أنفاق الرياح حول العالم وتتراوح قوتهم من عدة عشرات من الواط الى اكثر من 100 ميغاواط ، تستخدم أنفاق الرياح لدراسة الطائرات المدنية والعسكرية ، وكذلك الصواريخ والمروحيات والمعدات الفضائية ، مثل بعض المجسات والقذائف. يتطلب حجم أنفاق الرياح استخدام نماذج للأجسام المراد دراستها.

#### 4.I تصنيف انفاق الرياح : [1]

تم تصنيف انفاق الرياح لغرض محدد وبالتالي هناك عدة طرق لتصنيفها ، فيما يلي اكثر الطرق شيوعا لتصنيف انفاق الرياح :

##### 1.4.I أنظمة عدد ماخ :

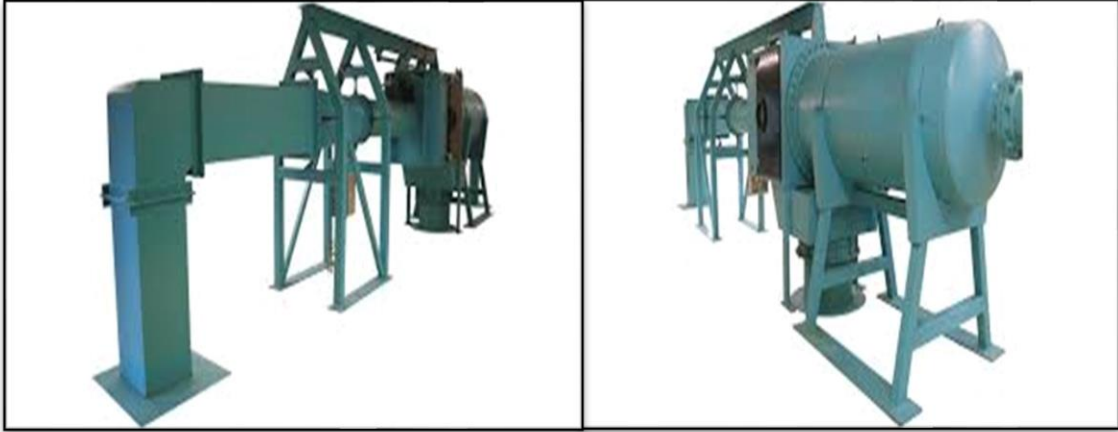
بناءا على سرعة التدفق المطلوبة في قسم الاختبار ، يتم تقسيم انفاق الرياح الى :

- انفاق رياح تحت صوتية ( $M_{Ts} < 0.8$ )



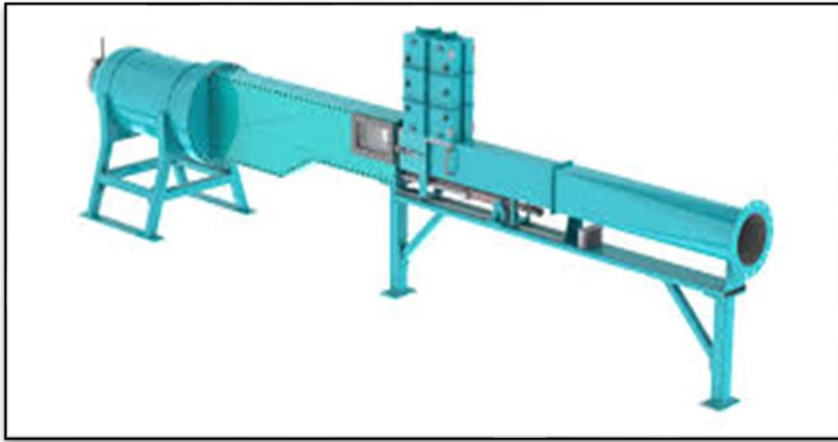
الشكل (1.I) : نفق هوائي تحت صوتي

- انفاق رياح عبر صوتية ( $0.8 < M_{Ts} < 1.2$ ) :



الشكل (2.I) : نفق هوائي عبر صوتي

- انفاق رياح فوق صوتية ( $1.2 < M_{TS} < 5$ ) :



الشكل (3.I) : نفق هوائي فوق صوتي

- انفاق رياح فائقة للصوت ( $M_{TS} > 5$ ) :



الشكل (4.I) : نفق هوائي فائق للصوت

التصنيف المعتمد على رقم الماخ ناتج عن تأثيرات الانضغاط . بالنسبة الى  $M < 0.3$  التأثيرات الانضغاطية مهملة.

#### 2.4.I تصميم النفق :

يتم تحديد انفاق الرياح ايضا بواسطة هندسة النفق . عندما يكون النفق مفتوحا من كلا الطرفين ويسحب الهواء النقي من البيئة المحيطة ، يشار اليه على انه ذو دائرة مفتوحة كما هو موضح في الشكل (5) من ناحية اخرى ، عندما يشكل النفق دائرة مغلقة بحيث يتم اعادة تدوير نفس المائع في مسار محدد مسبقا عبر قسم الاختبار ، يطلق عليه اسم نفق الرياح ذو الدائرة المغلقة شكل (6) . تستخدم هذه التكوينات بشكل شائع في الانفاق دون سرعة الصوت . تعمل كل من انفاق الدائرة المفتوحة او الدائرة المغلقة اما بغرفة اختبار مفتوحة او غرفة اختبار مغلقة .



الشكل (5.I) : نفق هوائي ذو دائرة مفتوحة



الشكل (6.I) : نفق هوائي ذو دائرة مغلقة

علاوة على ذلك ، يمكن تصنيف جميع هذه الأنفاق كنوع متقطع او كأنفاق تشغيل مستمرة مع توفر وقت اختبار اطول . نفق التفجير من النوع المتقطع ، ومناسب لإنشاء تدفقات فوق صوتية في قسم الاختبار . يسحب الهواء من خزان عالي الضغط موجود في اعلى قسم الاختبار ويصرف الى خزان الضغط المنخفض . يتم استخدام نفق التفجير للتدفقات التي تفوق سرعة الصوت ، والتي يشار اليها باسم انبوب

الصدمة. وقت الاختبار المتاح في كل من الأنفاق فائقة الصوت و الفوق صوتية هي اقل بكثير مقارنة  
بنظيرتها تحت صوتية.

#### 3.4.I نوع المائع العملي :

يمكن ايضا تسمية الأنفاق بناءا على نوع المائع المستخدم في تشغيل الأنفاق . بالنسبة لاختبار الطائرات  
منخفضة السرعة ، يشيع استخدام الهواء كوسيط عمل . لتصور موجات الضغط في الطائرات عالية  
السرعة ، ودراسة انماط التدفق حول الغواصات والمركبات تحت الماء ، يتم استخدام الماء كسوائل  
تشغيلية . نظرا لارتفاع درجة الحرارة في منشآت تفوق سرعة الصوت ،تم استخدام غازات اكثر استقرارا  
مثل النيتروجين السائل لاختبار النماذج بأرقام رينولدز المرتفعة في التدفقات عبر الصوتية .

#### 4.4.I تصنيف الأنفاق الهوائية حسب نوع غرفة الإختبار:

نستطيع تصنيفها إلى ثلاث فئات:

- أنفاق هوائية ذات غرفة اختبار مفتوحة [2]:  
حيث لا تحتوي غرفة الاختبار على جدران مادية.

- إيجابياتها:

❖ تكاليف إنشاء منخفضة.

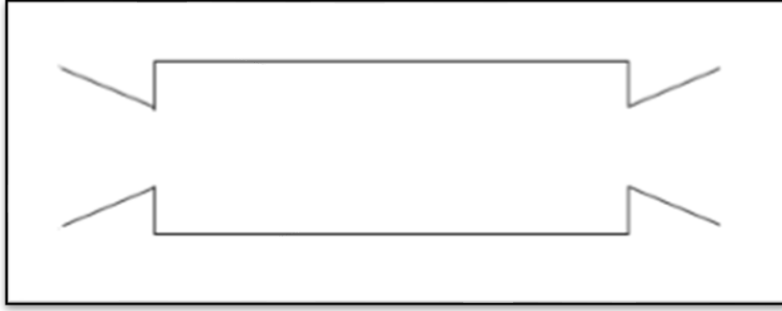
❖ التبريد الطبيعي (يجب أن تحتوي أنفاق الرياح ذات الحلقة المغلقة التي تستخدم نفس الهواء على

مبادلات حرارية أو نظام تبريد للتشغيل بسرعات عالية).

❖ مناسبة لدراسة المحركات أو رؤية الدخان حيث لا يوجد تراكم بقايا في هواء غرفة الإختبار.

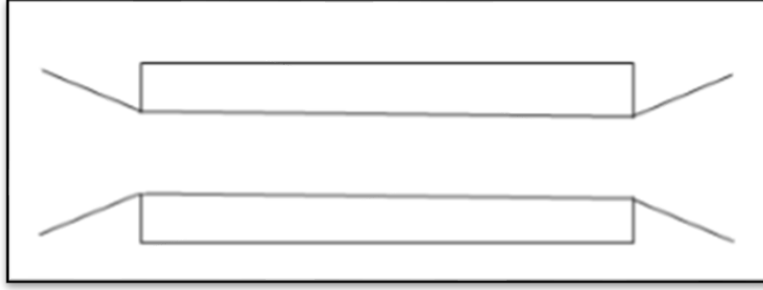
- سلبياتها :

- ❖ يجب أن تكون المساحة حول نفق الرياح كبيرة لتجنب عدم التماثل بسبب الأشياء القريبة من المجمع. جودة التدفق في نفق الرياح ذو الحلقة المغلقة أفضل.
- ❖ إذا كان منبع الهواء خارجياً، فإن الرياح والظروف الجوية تؤثر على تشغيل نفق الرياح.
- ❖ تكلفة التشغيل مهمة حيث يجب تسريع الهواء باستمرار.
- ❖ طريقة العمل مزعجة.



الشكل(7.I) : غرفة اختبار مفتوحة

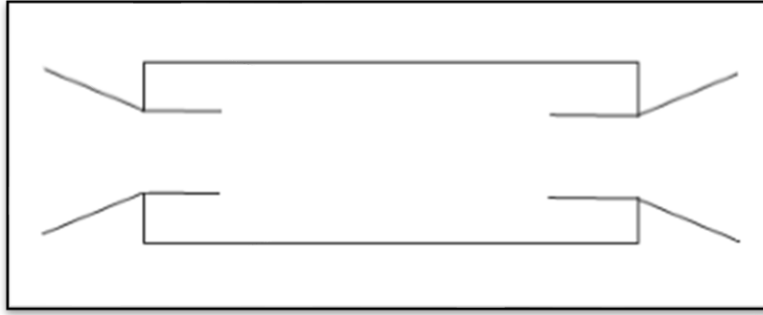
- أنفاق هوائية ذات غرفة اختبار موجهة:  
تتكون غرفة الاختبار هذه من غمد ضيق بأبعاد صغيرة نسبياً.



الشكل (8.I) : غرفة اختبار موجهة

- أنفاق هوائية ذات غرفة اختبار نصف موجهة:

الجدران على جزء من الجهاز.



الشكل (9.I) : غرفة اختبار نصف موجهة

(5.4.I) تصنيف الأنفاق الهوائية حسب موقع المروحة [3]:

وفقا لطريقة التصنيف هذه، نميز نوعين من الأنفاق الهوائية:

- نفق هوائي من نوع النّسف:

حيث يتم فيه توفير الهواء بواسطة مروحة طرد مركزي يدورها محرك كهربائي، هذه المروحة يمكن وضعها

إما في البداية أي قبل الناشر الأول أو في غرفة التهذئة كما نستطيع وضع عدة مراوح ذات حجم صغير.



• نفق هوائي من نوع الشفط:

في هذه الحالة توضع المروحة بعد ناشر المخرج، تكون إما محورية أو طاردة مركزية، هذا النوع من المراوح يستعمل عادة في الأنفاق الهوائية ذات الدائرة المغلقة.

**5.I أنواع أخرى من الأنفاق الهوائية : [2]**

**1.5.I أنفاق هوائية مناخية: (Souffleries climatiques)**

بالإضافة إلى الرياح، يعيد هذا النفق الهوائي إنتاج الظروف المناخية مثل المطر أو الثلج أو الرمل، على سبيل المثال في كندا.



الشكل (10.I) : نفق هوائي مناخي

**2.5.I أنفاق هوائية مبردة: (Souffleries cryogéniques)**

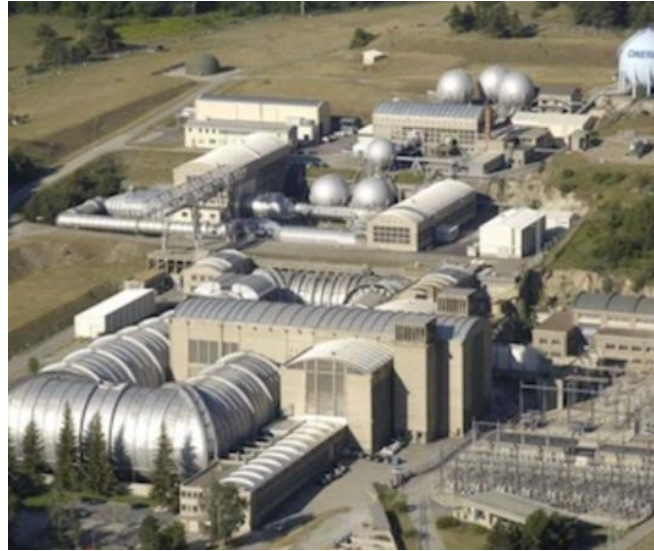
الطريقة الأخرى لزيادة كثافة الهواء هي تقليل درجة الحرارة، مما يقلل أيضًا من لزوجة الهواء ولا يغير القوى الموجودة في النموذج.

### 3.5.I أنفاق هوائية مضغوطة: (Souffleries pressurisées)

ظروف الضغط فيها أعلى من المعتاد. ويتيح هذا تشابه جيد للجريان مع النماذج الصغيرة من خلال زيادة كثافة الهواء عن طريق الضغط. العيب هو أن الضغط الديناميكي على النموذج يزداد وبالتالي يتعرض النموذج لجهود كبيرة ومخاطر التشوه.

### 4.5.I أنفاق هوائية كبيرة جدا: (très grandes souffleries)

أكبر نفق هوائي تحت صوتي هو نفق ONERA في Modane (حلقة تفوق 120m، غرفة إختبار بقطر 8m)، تم تشغيله في عام 1952، قوي جدًا (88MW)، يستطيع إختبار نماذج جناحيها 4m، بسرعة تفوق 300m/s. أكبر نفق هوائي تحت صوتي ذو الدائرة المفتوحة هو مركز أبحاث ناسا أميس NASA (Ames)، لديه قسم إختبار مفتوح من 120 × 80 قدم أو 36 × 24 (ما يقارب 900m<sup>2</sup>) ؛ لديها 6 مراوح بطاقة إجمالية 100MW (135000cv).



الشكل (11.I) : نفق ONERA

### 5.5.I نفق الرياح القوسي: (Soufflerie à arc)

إنه إنجاز محتمل لنفق رياح العاصفة من خلال تشغيل قوس كهربائي في غاز يسخنه ويضغط عليه. يتم الحصول على درجات حرارة وضغوط عالية جدًا لمدة تقل عن ثانية.

### 6.I عناصر تصميم النفق الهوائي التحت الصوتي [3]:

العناصر الأساسية لنفق الرياح دون سرعة الصوت بشكل عام هي:

• المروحة أو ضاغط طرد مركزي

• متباعد أو ناشر المدخل

• غرفة التهدئة

• المتقارب

• غرفة الإختبار

• متباعد أو ناشر المخرج

• أجهزة مضادة للإضطرابات :

- بيت النحل (nid d'abeille)

- الحواجز الشبكية (les grillage)

### 1.6.I المروحة:

يضمن ضاغط الطرد المركزي أو المروحة التدفق العالي مع نسبة ضغط منخفضة. المراوح والضواغط المخصصة لنقل الموائع لها هدف نقل الطاقة الميكانيكية إلى هاته الموائع التي تعبرها من أجل زيادة الضغط. تظهر المراوح كمنظيرات لمضخات الموائع الغير قابلة للانضغاط.

يمكننا أن نصنف المراوح كما يلي:

• حسب الشكل الهندسي: نميز نوعين أساسيين هما:

- آلات الطرد المركزي: حيث يدخل المائع محوريا في العجلة ثم يتوزع حول هذا المحور في اتجاه

عمودي عليه قبل مغادرته محيطيا على المحيط .

- الآلات المحورية: حيث يظل التدفق متوازيا إلى حد كبير مع المحور خلال عبور العجلة

المتحركة بالكامل.

• حسب الاستخدام: نستطيع تصنيفها إلى ثلاث فئات:

- مراوح (ventilateurs): توفر نسبة ضغط منخفضة (أقل من 1.2 في الهواء) وسرعة منخفضة

للمائع الذي يعبر الآلة.

- منافيخ (soufflantes): تتميز بالمظهر الملحوظ للانضغاط مع نسبة انضغاط عالية (بين

1.2 و 2) وسرعات كبيرة.

- ضواغط (compresseurs): تتميز بنسبة انضغاط عالية جدا (أكبر من 2) قد يتطلب استخدام

عدة طوابق ضغط مركبة في سلسلة.



الشكل (13.I): مروحة شافطة



الشكل (12.I): مروحة ناسفة

### 2.5.I ناشر المدخل:

يستخدم لتقليل السرعة العالية نسبيا عند مخرج الناسفة و لتقليلها يتم استخدام جهاز يجعل من الممكن إبطاء التدفق لخفض مستوى الاضطراب في غرفة التهئة. بشكل عام يجب أن يحتوي ناشر المدخل على حواجز شبكية مما يجعل من الممكن كسر الاضطراب إلى اضطرابات أصغر بكثير وأسهل في الإدارة. ملاحظة: في حالة السرعات المنخفضة ( $M < 0.1$ ) لا يتم استخدام ناشر المدخل.

### 3.5.I غرفة التهئة:

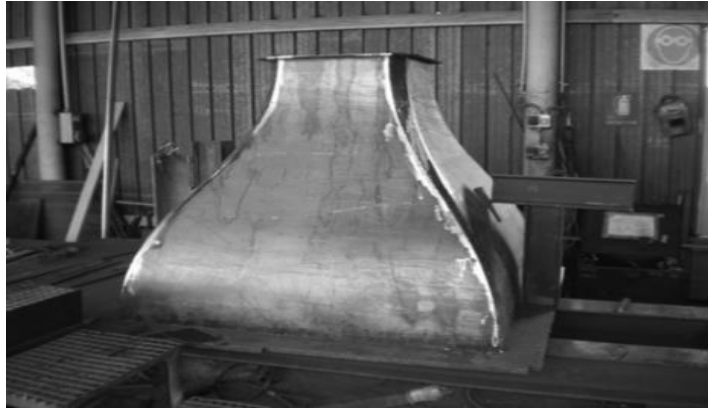
هي قناة ذات مقطع عبور مربع و ثابت، تحتوي على بيت نحل و حواجز شبكية. دور غرفة التهئة هو تخفيض اضطراب الجريان وتوزيع المائع بشكل أفضل في مدخل المتقارب.

### 4.5.I المتقارب:

المتقارب أو المجمع هو عضو يهدف بشكل أساسي من خلال شكله إلى تسريع الجريان عن طريق تحويل طاقة ضغط المائع إلى طاقة حركية ، نقول إذن أنه يسرع المائع. إذا كان التدفق يتسارع (حالة المتقارب) يتم

توجيه فرق الضغط في اتجاه التدفق وبالتالي توجيه قوى الضغط في الاتجاه المعاكس لقوى اللزوجة التي يسببها الجدار أي تعزيز التدفق. تزداد السرعة خارج الطبقة الحدية وتبقى صفراً عند الحائط، لكن وقت التقارب أقصر من أن يسمح بتأسيس ملف تعريف الطبقة الحدية النهائية وبالتالي هناك زيادة في تدرج السرعة في هذه الطبقة، ومنه انخفاض الضغط. يؤخذ هذا التأثير بعين الاعتبار على الصعيد العام عند تحديد معامل انخفاض الضغط الكلي للمتقارب يلاحظ بشكل عام أن السرعة موزعة بشكل منتظم عند مخرج المتقارب في معظم المقطع، وهكذا نستنتج أن المتقارب هو عضو يمكن استخدامه لتجانس السرعات. يكشف تحليل التدفق في المتقارب عن ثلاثة خصائص مهمة لهذا الأخير هي:

- الجريان يتسارع ويتجانس عند المخرج.
- الضياعات في الضغط الكلية منخفضة.
- ملف تعريف السرعة موحد في أكبر قسم من المخرج.



الشكل (14.I): متقارب في هيئة ثلاثية الأبعاد

#### نسبة تقلص المتقارب:

يتميز المتقارب بنسبة تقلصه  $(n=Se/Ss)$ ، حيث يشير الرمز  $(Se)$  إلى مساحة الدخول والرمز  $(Ss)$  إلى

مساحة الخروج. تقدر هذه النسبة بشكل عام من 6 إلى 10.

### 5.5.I غرفة الإختبار:

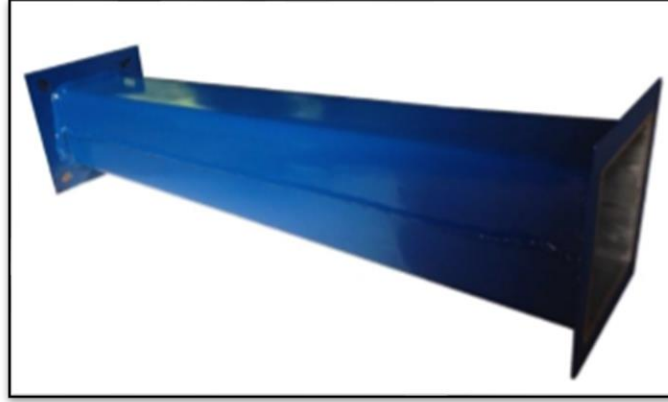
المائع الذي يخرج من المتقارب يدخل إلى غرفة لها مقطع عرضي تسمى: غرفة التجارب، قسم العمل أو منطقة الاختبار، تتكون من جدارين مسطحين موازيين لاتجاه الجريان.



الشكل (15.I) : غرف إختبار

### 6.5.I ناشر المخرج:

ناشر المخرج هو العنصر الأخير في نفق الرياح، إنه قناة ذات مساحة متزايدة حيث مساحة الدخول تكون مربعة أما مساحة الخروج فتكون إما مربعة أو مستطيلة الشكل. يتمثل الدور الرئيسي لهذا العنصر في تحويل الطاقة الحركية للمائع إلى طاقة ضغط كامنة، لتحقيق ظروف خروج مناسبة.



الشكل (16.I): ناشر في هيئة ثلاثية الأبعاد

#### 7.5.I أجهزة مضادة للإضطرابات:

في الجو يوجد الإضطراب بمعدلات منخفضة للغاية، لذلك سعينا للحصول على نتائج في تجربة مماثلة لتجربة الطيران، للحد من إضطراب أنفاق الرياح. التأثير الرئيسي للإضطراب في نفق الرياح هو العمل بشكل كبير جدًا على ظاهرة الانتقال من الجريان الصفيحي إلى الجريان المضطرب، وبالتالي فإن زيادة شدة الإضطراب تتسبب في انخفاض سريع جدًا في أرقام رينولدز الإنتقالية ولكن بمعدلات منخفضة، عندما يظل عدد رينولدز الحرج ثابتًا إلى حد كبير فإن الإضطراب لم يعد يؤثر على الانتقال.

تم الحصول على نتائج ملحوظة في أنفاق الرياح دون سرعة الصوت عن طريق ترتيبات مضادة للإضطراب باستخدام نسب تقلص عالية وإنشاء غرفة تهدئة مزودة بمرشحات وشاشات شبكة ضيقة.

#### • بيت النحل: (nid d'abeille)

يقوم بيت النحل بتوجيه الموائع عن طريق فرض شروط الجدار الاتجاهي، حيث يكون مقياس الدوامات أصغر في الشبكات الضيقة. يتم وضع بيت النحل في مدخل المتقارب. يتكون المرشح في نفق الرياح إيفال من شبكات دائرية بقطر 3mm. يتم تصميم المرشح بشكل عام من رقائق الألومنيوم.





الشكل (17.I) : بيت نحل

• الحواجز الشبكية: (les grillages)

يجب أن يولد النفق الهوائي معدل اضطراب منخفضًا ، ويتم الحصول على نتائج أفضل عن طريق إدخال حواجز شبكية ذات شبكات ضيقة جدًا في غرفة التهئة التي تدمر الاضطراب على نطاق واسع وتخلق اضطرابًا دقيقًا يتم امتصاصه بسرعة أكبر. يتم الحصول على هذه الحواجز الشبكية باستخدام الفولاذ، النحاس، النايلون وغيرها من المواد.

الهدف من استخدام الحواجز الشبكية هو:

- ❖ خفض مستوى الاضطراب.
- ❖ تقليل سمك الطبقة الحدية.
- ❖ توحيد ملف السرعة المتوسط.



الشكل (18.I) : حواجز شبكية

# الفصل الثاني:

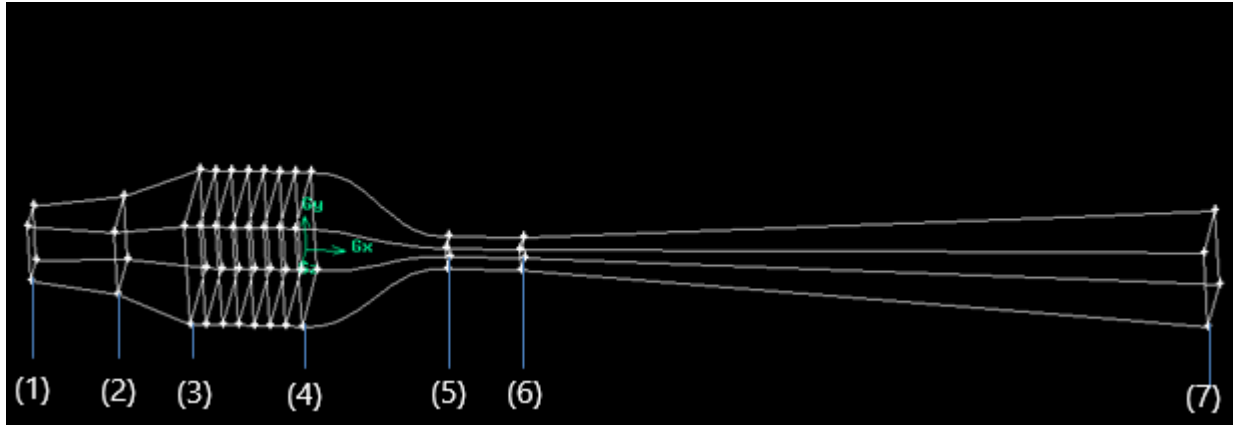
دراسة النفق الهوائي القابل

للانضغاط

## 1.II مقدمة :

يمر تصميم النفق الهوائي بمرحلتين رئيسيتين، المرحلة الأولى ترتبط بالجانب الهندسي المتمثل في حساب أبعاد عناصر النفق والمرحلة الثانية ترتبط بالجانب الديناميكي المتمثل في حساب الضياعات في الشحنة. سيتم في هذا الفصل اجراء دراسة هندسية لكل عنصر مع حساب انخفاض الضغط من خلال خصائص التدفق عند مخرج المروحة.

## 2.II الدراسة الهندسية لعناصر التصميم:



الشكل (1.II):عناصر النفق الهوائي

## 1.2.II الناسفة :

تسمى هذه الناسفة ب: CHERB EA 2000 RI RDO ADX STD لها الخصائص التالية[3]:

900[mm]	قطر العجلة	138.99[m/s]	(*) السرعة المحيطية
2949[t/min]	(*) سرعة الدوران	3540[t/min]	سرعة الدوران العظمى
23.25[kg/s]	(**) تدفق الامتصاص	101896.97[Pas]	(***) الضغط الكلي

1.2045[kg/m <sup>3</sup> ]	(**) الكتلة الحجمية	810[m]	الارتفاع
100600[Pas]	(***) الضغط الجوي	19°C	درجة الحرارة المتوسطة (***)

الجدول (1.II) : خصائص النافسة

مع :

(\*) : القيم التي قدمتها الشركة المصنعة للمروحة [4]

(\*\*) : القيمة المحسوبة

(\*\*\*) : القيمة المقاسة

المقطع له شكل مستطيل (0,54×0.84)م<sup>2</sup>

## 2.2.II تصميم ناشر المدخل الاول :

ناشر المدخل الاول هو العنصر الرئيسي الثاني لنفق الرياح المستقبلي في تبسة .

لذلك فهو بعد المروحة مباشرة. يتميز بنسبة الاتساع و زاوية الفتح و لا يحتوي على حواجز شبكية .

1. اختيار نسبة التوسيع :نسبة التوسيع هي النسبة بين مساحة الخروج ومساحة الدخول :

$$\eta_{elarg} = \frac{\text{مساحة الخروج}}{\text{مساحة الدخول}} \quad (1. II)$$

$$\eta_{elarg} = 2$$

2. زاوية فتح مدخل الناشر :

زاوية فتح المدخل :

في المستوي (X,Y)

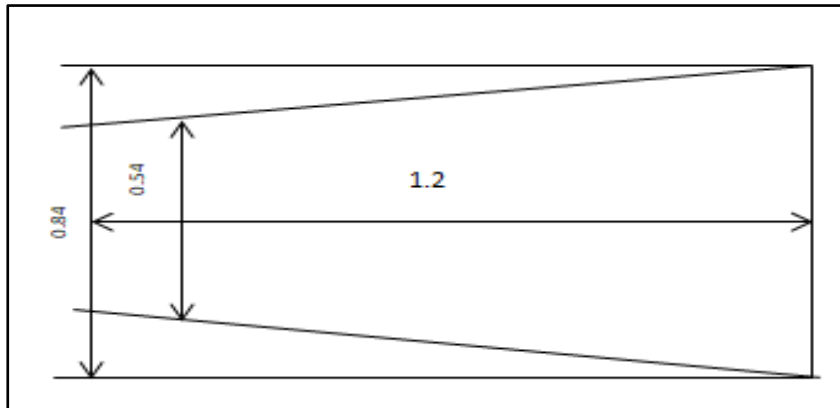
$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left( \frac{Y_2 - Y_1}{2.L} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{1.5 - 0.84}{2.(1.2)} \right) = 15.376 \text{deg} \quad (2.II)$$

$$2\alpha_1 = 30.752 \text{deg}$$

في المستوي (X,Z):

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{2.L} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{1.5 - 0.54}{2.(1.2)} \right) = 21.801 \text{deg} \quad (3.II)$$

$$2\alpha_2 = 43.602 \text{deg}$$



الشكل (2.II): ناشر المدخل الاول

1.2m	الطول
$(0.84 \times 0.54)m^2$	مساحة الدخول
$(0.9525 \times 0.9525)m^2$	مساحة الخروج
2	نسبة التوسيع
$2.68^\circ$	زاوية فتح المدخل (X,Y)
$9.75^\circ$	زاوية فتح المدخل (X,Z)

الجدول (2.II): أبعاد ناشر المدخل الاول

الخروج	الدخول	الخصائص
0.0625	0.125	عدد ماخ
101471.9	101471.9	الضغط الكلي (Pas)
100896.9	100100	الضغط الساكن (Pas)
288.75	288.96	درجة الحرارة الكلية (°k)
288.28	287.84	درجة الحرارة الساكنة (°k)
21.279	42.831	السرعة (m/s)

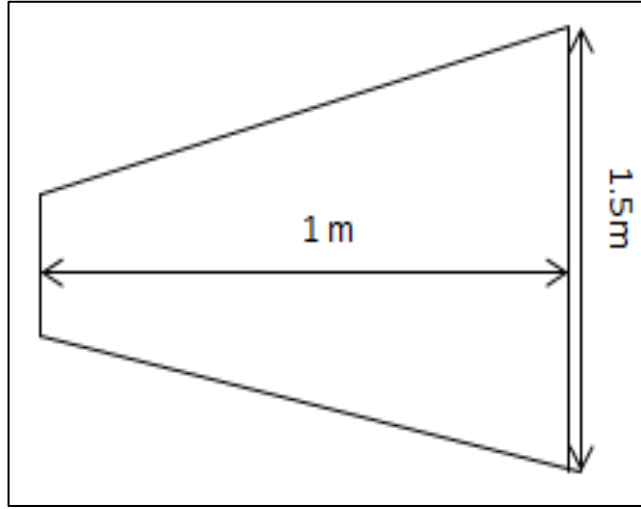
الجدول (3.II): خصائص ناشر المدخل الاول

### 3.2.II تصميم ناشر المدخل الثاني :

يتمثل دور الناشر الثاني في تقليل السرعات و تخفيض الضغط في غرفة التهئة , للوصول الى نسبة توسيع

كلية للناشرين تساوي 5 , يجب ان تكون الخاصة بالناشر الثاني :

$$\eta_{elarg} = 2.5$$



الشكل (3.II): ناشر المدخل الثاني

1m	الطول
$(0.9525 \times 0.9525)m^2$	مساحة الدخول
$(1.5 \times 1.5)m^2$	مساحة الخروج
2.5	نسبة التوسيع
$15.31^\circ$	زاوية فتح المدخل

الجدول (4.II): أبعاد ناشر المدخل الثاني

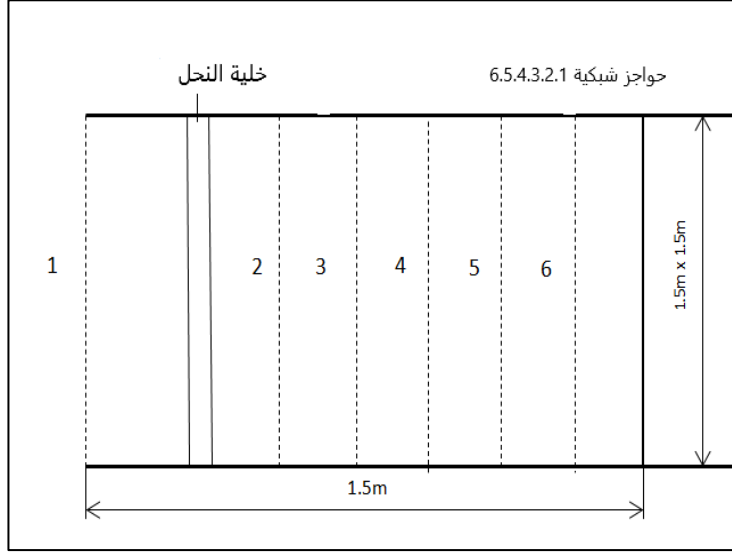
الخروج	الدخول	الخصائص
0.025	0.0625	عدد ماخ
101390.4	101471.9	الضغط الكلي (Pas)
101346.1	100896.9	الضغط الساكن (Pas)
288.51	288.75	درجة الحرارة الكلية ( $^\circ k$ )
288.47	288.28	درجة الحرارة الساكنة ( $^\circ k$ )
8.511	21.279	السرعة (m/s)

الجدول (5.II): خصائص ناشر المدخل الثاني



#### 4.2.II تصميم غرفة التهئة :

غرفة التهئة المقترحة لنفق الرياح الخاص بمذكرتنا , عبارة عن أنبوب ذو مقطع مربع ثابت و مساويا للمقطع العرضي لمدخل المتقارب . إن الهدف من غرفة التهئة هو تقليل اضطراب الجريان و تهدئته قبل دخوله إلى المتقارب من خلال احتوائها على بيوت نحل و حواجز شبكية.



الشكل (4.II): غرفة التهئة

الخصائص	الدخول	الخروج
عدد ماخ	0.025	0.0249
الضغط الكلي (Pas)	101390.4	101173.3
الضغط الساكن (Pas)	101346.1	101129.2
درجة الحرارة الكلية (°k)	288.51	288.51
درجة الحرارة الساكنة (°k)	288.47	288.47
السرعة (m\ s)	8.511	8.497

الجدول (6.II): خصائص غرفة التهئة

• تصميم بيت النحل:

من أجل تقليص التغيرات في السرعات المهتزة العرضية، يتم استخدام بيت النحل الذي يتميز بخلايا لها نفس إتجاه الجريان في غرفة التهئة (إتجاه محوري)، يعتبر تأثير بيت النحل على السرعة المحورية للجريان ضئيل وذلك بسبب الانخفاض الطفيف للضغط عبر هذا العنصر.

فيما يتعلق بعملية التصميم، يعد الطول المحوري لبيت النحل ( $L_h$ )، القطر الهيدروليكي للخلية ( $D_{hcell}$ ) والمسامية ( $\beta_h$ ) عوامل رئيسية في التصميم .

يمكن تعريف مسامية بيت النحل ( $\beta_h$ ) على أنها النسبة بين مساحة المقطع العرضي الذي يسري فيه المائع ( $A_{flow}$ ) و مساحة المقطع العرضي لغرفة التهئة ( $A_{sc}$ )، كما توضحه المعادلة التالية:

$$\beta_h = \frac{A_{flow}}{A_{sc}} = \frac{A_{flow}}{l_{sc}^2} = \frac{A_{flow}}{D_{hsc}^2} \quad (4. II)$$

حيث:

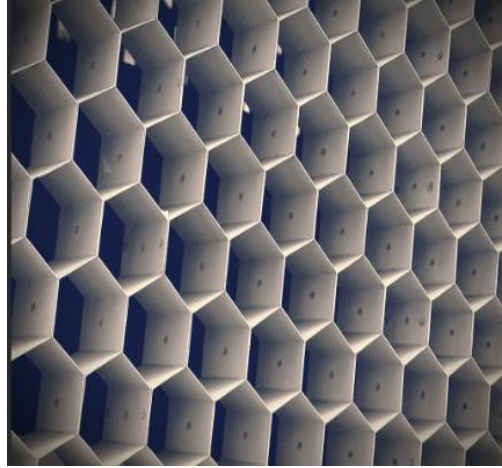
$l_{sc}$ : طول ضلع المقطع العرضي لغرفة التهئة.

$D_{hsc}$ : القطر الهيدروليكي لغرفة التهئة.

لابد من التحقق من شرطين رئيسيين عند تصميم بيت النحل [5] حيث يجب أن تكون النسبة بين الطول المحوري لبيت النحل و القطر الهيدروليكي للخلية في النطاق من 6 إلى 8 كما يجب أن تكون مسامية بيت النحل أكبر من أو تساوي 0.8 كما توضحه المعادلتين التاليتين:

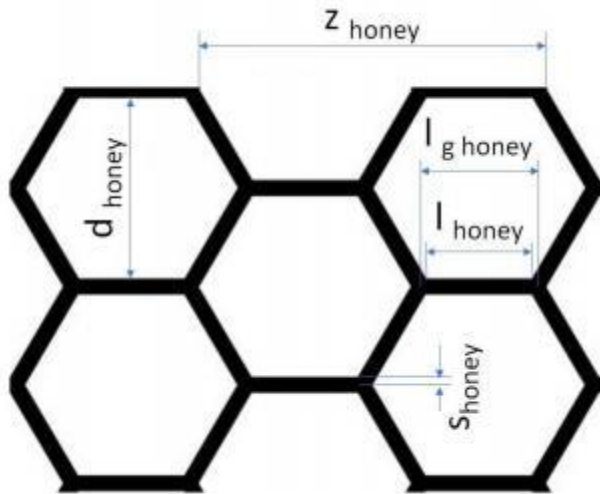
$$6 \leq \frac{L_h}{D_{hcell}} \leq 8 \quad (5. II)$$

$$\beta_h \geq 0.8 \quad (6. II)$$



الشكل (5.II): خلية النحل

❖ الأطوال الداخلية والخارجية لبيت النحل:



الشكل (6.II): أطوال خلية النحل

$$l_{\text{honey}} = \frac{d_{\text{honey}}}{2 \sin 30^\circ} \quad (7. \text{II})$$

$$l_{\text{ghoney}} = l_{\text{honey}} + 2 \frac{S_{\text{honey}}}{\tan 30^\circ} \quad (8. \text{II})$$

طول التقسيمة Z :

$$Z = 2l_{\text{honey}} + l_{\text{ghoney}} \quad (9. \text{II})$$

التقسيمية Z :

$$A_{\text{rectangle}} = l_{\text{honey}} S_{\text{honey}} \quad (10. \text{II})$$

$$A_{\text{trapeze}} = \frac{(l_{\text{honey}} + l_{\text{ghoney}}) S_{\text{honey}}}{2} \quad (11. \text{II})$$

$$A_z = 2(A_{\text{rectangle}} + A_{\text{trapeze}}) \quad (12. \text{II})$$

عدد التقسيمات في الإتجاه الشاقولي  $n_z$  :

$$n_z = \frac{l_{\text{sc}}}{Z} \quad (13. \text{II})$$

عدد التقسيمات في الاتجاه العرضي  $n_y$  :

$$n_y = \frac{l_{\text{sc}}}{S_{\text{honey}} + d_{\text{honey}}/2} \quad (14. \text{II})$$

مساحة المقطع العرضي للجزء الصلب من بيت النحل  $A_{\text{sol}}$  :

$$A_{\text{sol}} = A_z n_z n_y \quad (15. \text{II})$$

صلابة بيت النحل  $\sigma_h$  :

$$\sigma_h = \frac{A_{\text{sol}}}{A_{\text{sc}}} \quad (16. \text{II})$$

العلاقة بين مسامية النحل  $\beta_h$  وصلابته  $\sigma_h$  :

$$\beta_h + \sigma_h = 1 \quad (17. \text{II})$$

حساب القطر الهيدروليكي للخلية  $\beta_h$  والذي يتم تحديده بعد حساب مساحة الخلية  $A_{\text{cell}}$  :

$$A_{\text{cell}} = 6 \left( \frac{d_{\text{honey}} l_{\text{honey}}}{2} \right) = 6 \frac{d_{\text{honey}}}{2} \frac{d_{\text{honey}}}{2\sqrt{3}} = \frac{3 d_{\text{honey}}^2}{2\sqrt{3}} \quad (18. \text{II})$$

من جهة اخرى لدينا :

$$A_{\text{cell}} = \pi \frac{D_{\text{hcell}}^2}{4} = \frac{3 d_{\text{honey}}^2}{2\sqrt{3}} \quad (19. \text{II})$$

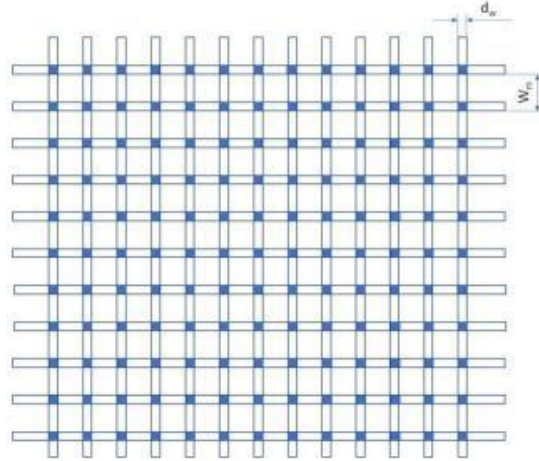
ومنه :

$$D_{\text{hcell}} = d_{\text{honey}} \sqrt{\frac{6}{\pi\sqrt{3}}} \quad (20. \text{II})$$

• تصميم الحواجز الشبكية :

في النفق الهوائي، يتم تثبيت الحواجز الشبكية داخل غرفة التهئة عمودية على اتجاه الجريان على إطار قابل للإزالة بهدف تسهيل التنظيف والصيانة. تقلل الحواجز الشبكية بشكل كبير من التغيرات في السرعة المهتزة الطولية للجريان مع تأثير ضئيل على اتجاهه. [6]

$d_w$	0.16mm
$w_m$	0.7mm



الشكل (7.II): الأبعاد الهندسية للحاجز الشبكي

مسامية الحاجز الشبكي  $\beta_s$  :

$$\beta_s = \frac{A_{\text{flow}}}{A_{\text{sc}}} \quad (21. \text{II})$$

حتى يكون الحاجز الشبكي فعال في الحد من الإضطراب يجب أن يتحقق الشرط الآتي:

$$0.58 \leq \beta_s \leq 0.8 \quad (22. \text{II})$$

❖ المساحة التي تشغلها أسلاك الحاجز الشبكي  $A_w$  :

$$A_w = 2n_w l_{sc} d_w - n_w^2 d_w^2 \quad (23. II)$$

حساب مساحة مسامية الحاجز الشبكي  $\beta_s$ :

$$\beta_s = \frac{A_{flow}}{A_{sc}} = \frac{A_{sc} - A_w}{A_{sc}} = \frac{l_{sc}^2 - 2n_w l_{sc} d_w + n_w^2 d_w^2}{l_{sc}^2} = 1 - \frac{2d_w n_w}{l_{sc}} + \frac{d_w^2 n_w^2}{l_{sc}^2} \quad (24. II)$$

$$\beta_s = \left(1 - \frac{d_w n_w}{l_{sc}}\right)^2 \quad (25. II)$$

❖ طول التقسيمة للحاجز الشبكي  $W_m$ :

$$w_m = \frac{l_{sc}}{n_w} \quad (26. II)$$

بالتعويض نجد :

$$\beta_s = \left(1 - \frac{d_w}{w_m}\right)^2 \quad (27. II)$$

## 5.2.II تصميم المتقارب:

يعمل المتقارب على تسريع الجريان من غرفة التهدة إلى غرفة الاختبار، بالإضافة إلى ذلك فإنه يقلل من التغيرات الحادثة على مستوى السرعة. في النفق الهوائي، يعد المتقارب أصعب عنصر في التصميم حيث تعتمد سرعة الجريان و انتظامه داخل المقطع العرضي لغرفة الاختبار على تصميم المتقارب. تتطابق أبعاد وشكل المقطع العرضي لمخرج المتقارب مع أبعاد و شكل المقطع العرضي لغرفة الاختبار نظرًا لربطهما معًا.

حسب الدراسات التجريبية التي قام بها الباحثون على الجريانات داخل المتقارب، يمكن تحديد أبعاد و شكل المقطع العرضي لمدخل المتقارب و ذلك بفرض نسبة بين مساحتي المقطعين العرضيين لمدخل و مخرج المتقارب و التي يجب أن تكون في المجال (6-10) [7]. يؤدي استعمال النسب الأكبر من 10 إلى إفراط

على مستوى أبعاد مدخل المتقارب بينما تؤدي النسب الأقل من 6 إلى فقدان عالي في الضغط من خلال الحواجز الشبكية. يتم تحديد شكل المتقارب من خلال كثير الحدود من الدرجة الخامسة المقترح من طرف الباحثين بيلو ميهتا (Bell-Mehta) [7] [3] و الممثل رياضيا بواسطة المعادلة التالية:

$$y = [-6 \xi^5 + 15 \xi^4 - 10 \xi^3](y_i + y_o) + y_i(28. II)$$

حيث:

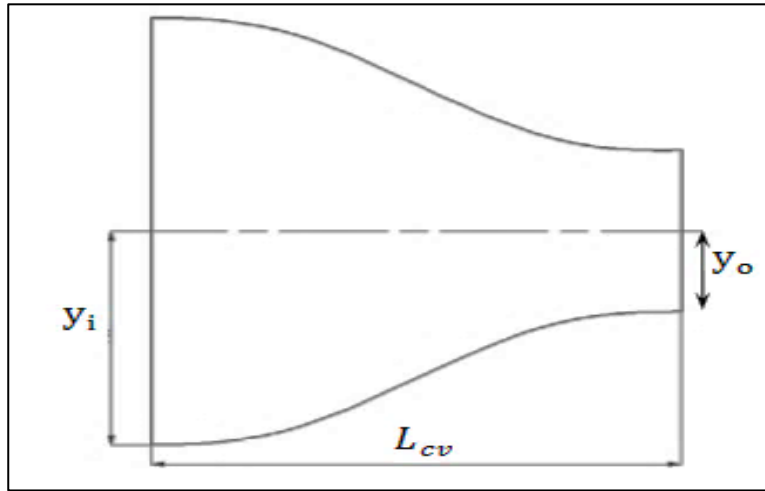
$y$ : نصف طول ضلع المقطع العرضي للمتقارب.

$y_i$ : نصف طول ضلع المقطع العرضي لمدخل المتقارب.

$y_o$ : نصف طول ضلع المقطع العرضي لمخرج المتقارب.

$\xi$ : متغير لا بعدي يعطى بدلالة كل من طول المتقارب ( $L_{cv}$ ) و المسافة المحورية ( $X$ ) كالآتي:

$$\xi = \frac{X}{L_{cv}} \quad ; \quad 0 \leq X \leq L_{cv} (29. II)$$



الشكل (8.II): المتقارب

1.9m	الطول
$(1.5 \times 1.5)m^2$	مساحة الدخول
$(0.3176 \times 0.3176)m^2$	مساحة الخروج

الجدول (7. II): أبعاد المتقارب

الخروج	الدخول	الخصائص
0.8	0.0249	عدد ماخ
101148.9	101173.3	الضغط الكلي (Pas)
66355.84	101129.2	الضغط الساكن (Pas)
288.37	288.51	درجة الحرارة الكلية ( $^{\circ}k$ )
255.65	288.47	درجة الحرارة الساكنة ( $^{\circ}k$ )
256.4	8.497	السرعة (m/s)

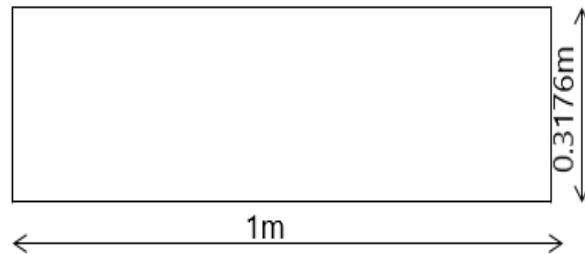
الجدول (8. II): خصائص المتقارب

## 6.2. II تصميم غرفة الاختبار :

قمنا بتحديد ابعاد نفق الرياح من خلال وضع عدد ماخ يساوي 0.8 .

في بحثنا هذا، تم استخدام غرفة اختبار ذات مقطع عرضي مربع الشكل طوله 1m وطول ضلعه

0.3176m يسري فيها الهواء بسرعة 256.4 m/s.



الشكل (9. II): غرفة الاختبار

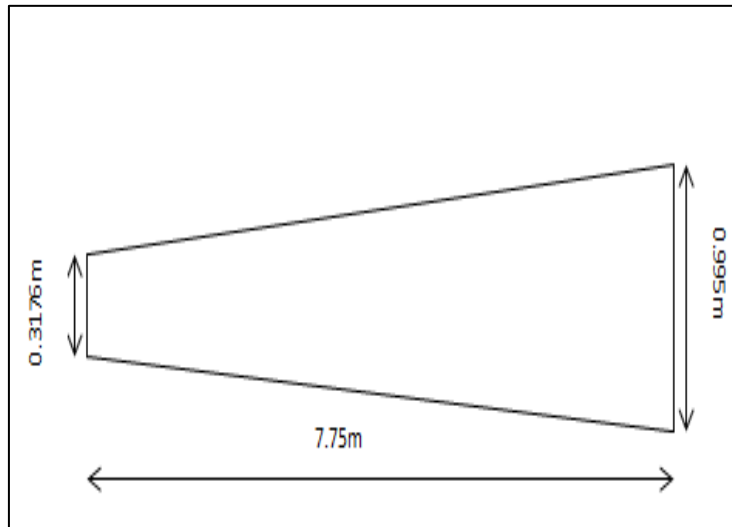


الخصائص	الدخول	الخروج
عدد ماخ	0.8	0.8
الضغط الكلي (Pas)	102024.5	101148.9
الضغط الساكن (Pas)	66930.27	66355.84
درجة الحرارة الكلية (°k)	288.37	288.37
درجة الحرارة الساكنة (°k)	255.65	255.65
السرعة (m\ s)	256.4	256.4

الجدول (9.II): خصائص غرفة الاختبار

## 7.2.II تصميم ناشر المخرج:

يبدأ تصميم الناشر من المقطع العرضي لمدخله الذي يكتسب شكلا مربعا و الذي تتساوى مساحته مع مساحة المقطع العرضي لغرفة الاختبار.



الشكل (10.II): ناشر المخرج

7.75m	الطول
$(0.3176 \times 0.3176)m^2$	مساحة الدخول
$(0.995 \times 0.995)m^2$	مساحة الخروج
9.8075	نسبة التوسيع
$2.5^\circ$	زاوية فتح المدخل

الجدول (10.II): أبعاد ناشر المخرج

الخروج	الدخول	الخصائص
0.057	0.8	عدد ماخ
101094.5	101148.9	الضغط الكلي (Pas)
100890	66355.84	الضغط الساكن (Pas)
288.16	288.37	درجة الحرارة الكلية ( $^\circ k$ )
288	255.65	درجة الحرارة الساكنة ( $^\circ k$ )
19.425	256.4	السرعة (m\ s)

الجدول (11.II): خصائص ناشر المخرج

### 3.II تقييم الضياعات في النفق الهوائي :

عموماً، يوجد نوعان من الضياعات في الضغط هما: الضياعات الخطية و الضياعات الثانوية. [3] فيما يتعلق بحساب خسائر الضغط في نفقنا الهوائي، قمنا باستخدام طريقة نيكورادس التجريبية لتقييم عامل الاحتكاك.

أولاً ، قمنا بحساب القطر الهيدروليكي واللزوجة الديناميكية عند مدخل كل عنصر باستخدام العلاقات التالية، على التوالي :

$$D_h = \frac{4S}{P} \quad (30. II)$$

$$\mu = 1.458 \cdot 10^{-6} \frac{T_2^3}{110.4 + T} \quad (31. II)$$

ثانياً ، عدد رينولدز:

$$Re_{Dh} = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (32. II)$$

ثالثاً ، نقرأ من بيان نيكورادس، معامل الاحتكاك  $\lambda$  ، مع العلم باختيار خشونة الجدار. معامل الاحتكاك :

$$C_f = \frac{\lambda}{4} \quad (33. II)$$

إجهاد قص :

$$\tau_p = \frac{1}{2} C_f \rho V^2 \quad (34. II)$$

ضیاعات الضغط الإجمالية :

$$\Delta p_{frot} = \frac{\tau_p S_{lat}}{S_{ent}} \quad (35. II)$$

في بحثنا هذا، نجد على مستوى كل عنصر من النفق الهوائي الضیاعات التالية:

Re <sub>1</sub>	Re <sub>2</sub>	Re <sub>3</sub>	Re <sub>4</sub>	Re <sub>5</sub>	Re <sub>6</sub>	Re <sub>7</sub>
2.42 10 <sup>6</sup>	1.36 10 <sup>6</sup>	8.6 10 <sup>5</sup>	8.4 10 <sup>5</sup>	8.37 10 <sup>5</sup>	5.48 10 <sup>6</sup>	1.3 10 <sup>6</sup>

الجدول (12.II): أعداد رينولدز

❖ على مستوى ناشر المدخل الأول : نميز نوعان من الضیاعات هما:

✓ ضیاعات ناتجة عن الإحتكاك.

✓ ضیاعات ناتجة عن التباعد الهندسي.

$$C_f = 0.001$$

$$[\text{Pas}]\Delta p_{\text{frot}} = 8.70$$

❖ على مستوى ناشر المدخل الثاني : نميز ثلاثة أنواع من الضياعات هي:

- ✓ ضياعات ناتجة عن الإحتكاك.
- ✓ ضياعات ناتجة عن التباعد الهندسي.
- ✓ ضياعات عبر الحواجز الشبكية.

$$C_f = 0.001$$

$$[\text{Pas}]\Delta p_{\text{frot}} = 1.52$$

عدد الحواجز	$Re_\beta$	K	$\Delta p_t[\text{Pas}]$
1	382.24	1.0254	278.135
2	153.307	1.3878	61.18

الجدول (13.II): ضياعات الضغط على مستوى ناشر المدخل الثاني

❖ على مستوى غرفة التهئة: نميز ثلاثة أنواع من الضياعات هي:

- ✓ ضياعات ناتجة عن الإحتكاك.
- ✓ ضياعات عبر الحواجز الشبكية.
- ✓ ضياعات عبر بيت النحل.

$\Delta p_t[\text{pa}]$	$Re_\beta$	K	المنطقة
21.57	—————	0.5	خلية النحل
59.881	153.875	1.3876	الحاجز الشبكي الأول
59.881	153.869	1.3876	الحاجز الشبكي الثاني
59.881	153.899	1.3875	الحاجز الشبكي الثالث
59.881	153.919	1.3874	الحاجز الشبكي الرابع
59.881	153.919	1.3874	الحاجز الشبكي الخامس

الجدول (14.II): ضياعات الضغط على مستوى غرفة التهئة

❖ على مستوى المتقارب: يوجد سوى الضياعات الناتجة عن الاحتكاك.

$$C_f = 0.001$$

$$[\text{Pas}]\Delta p_{\text{frot}} = 46.51$$

❖ على مستوى غرفة الاختبار: يوجد سوى الضياعات الناتجة عن الاحتكاك.

$$C_f = 0.001$$

$$[\text{Pas}]\Delta p_{\text{frot}} = 1136.03$$

❖ على مستوى ناشر المخرج: نميز نوعان من الضياعات هما:

✓ ضياعات ناتجة عن التباعد الهندسي.

✓ ضياعات الناتجة عن الاحتكاك

$$C_f = 0.001$$

$$[\text{Pas}]\Delta p_{\text{frot}} = 300$$

# الفصل الثالث:

تحليل النفق الهوائي القابل

للانضغاط

### 1.III. مقدمة:

يعد تصميم و تحليل الآلات الميكانيكية عملية مكلفة و تحتاج الى الكثير من الوقت و القدرات للوصول الى التصميم المثالي المحتمل الذي يمكن تكييفه صناعيا , تعد تقنية CFD داعما قويا لكون المعامل البحثية اكثر فاعلية و اقل تكلفة , وتعمل على حل الظواهر الفيزيائية المعقدة للموائع التي يصعب فحصها من خلال التجارب .

يهدف هذا الفصل الى محاكاة نفق هوائي قابل للانضغاط في هيئة ثلاثية البعد 3D بطريقة المحاكاة العددية بعد تصميمه من طرف البروفيسور عبد الرحمان قحموص وطلبته جدي خالد و قتال رشيد , دراسة مقارنة في توزيع المتغيرات (السرعة,  $V$  الضغط,  $P$  عدد ماك  $M \dots$ ) بين نتائج التصميم الديناميكي الهوائي وتحليل CFD بالنسبة للجريان اللزج والغير لزج .

#### • ديناميكا الموائع المحوسبة (CFD)

علم ديناميكا الموائع المحوسبة هو اسلوب يقوم بالتنبؤ بحركة الموائع , انتقال الحرارة وانتقال الكتلة , التفاعلات الكيميائية والعديد من المسائل الهندسية المتعلقة بسريران الموائع حيث يتم صياغة المسألة المعينة في شكل نموذج رياضي فيزيائي وذلك بتحديد المعادلات التفاضلية الجزئية الحاكمة للمشكلة وتحويل هذه المعادلات التفاضلية الحاكمة الى معادلات جبرية ويتم ذلك باستخدام الطرق العددية مثل :

- طريقة العناصر المنتهية (FEM).
- طريقة الحجوم المنتهية (FVM).
- طريقة الفروق المنتهية (FDM).

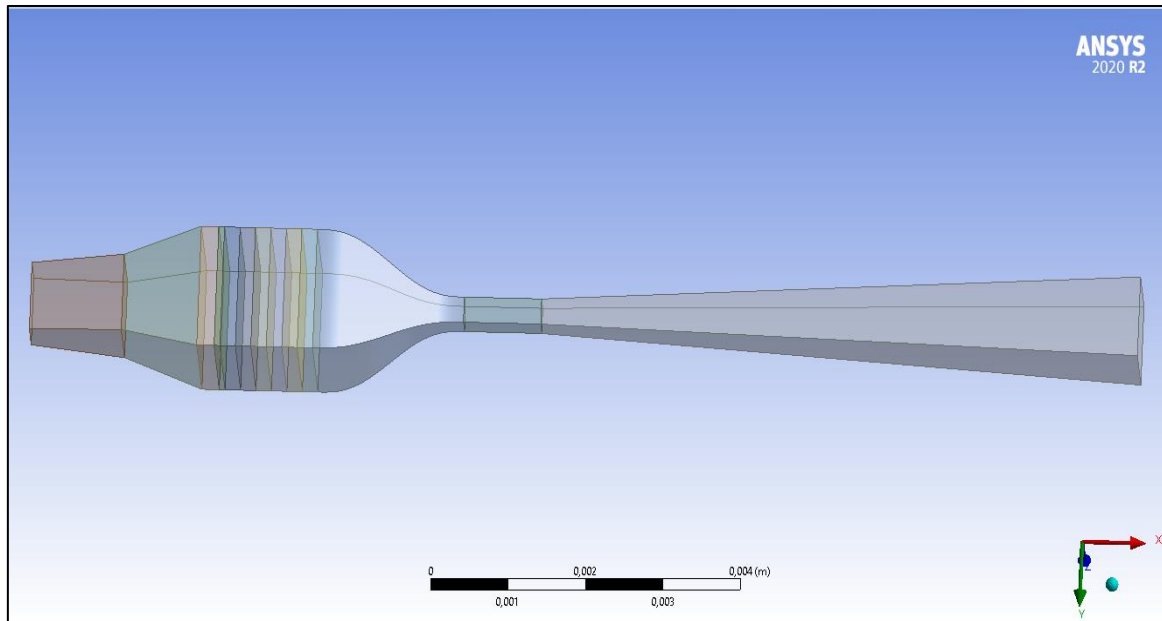
### 2.III المحاكاة العددية للجريان الغير لزج (Euler) :

#### 1.2.III إعداد المسألة- ما قبل المعالجة العددية PRE- PROCESSING:

وهي المرحلة التي يتم فيها رسم الشكل الهندسي للمسألة المدروسة و تشكيل الشبكة والتعريف بنوع الشروط الحدية:

#### • رسم الشكل الهندسي :

باستعمال برنامج الرسم Gambit 2.4.6 قمنا برسم النفق الهوائي في الهيئة ثلاثية البعد 3D وانطلاقا من الملف المتحصل عليه بعد تنفيذ برنامج خاص بتصميم النفق الهوائي قمنا بتحديد الأبعاد الهندسية للمجال الحسابي.



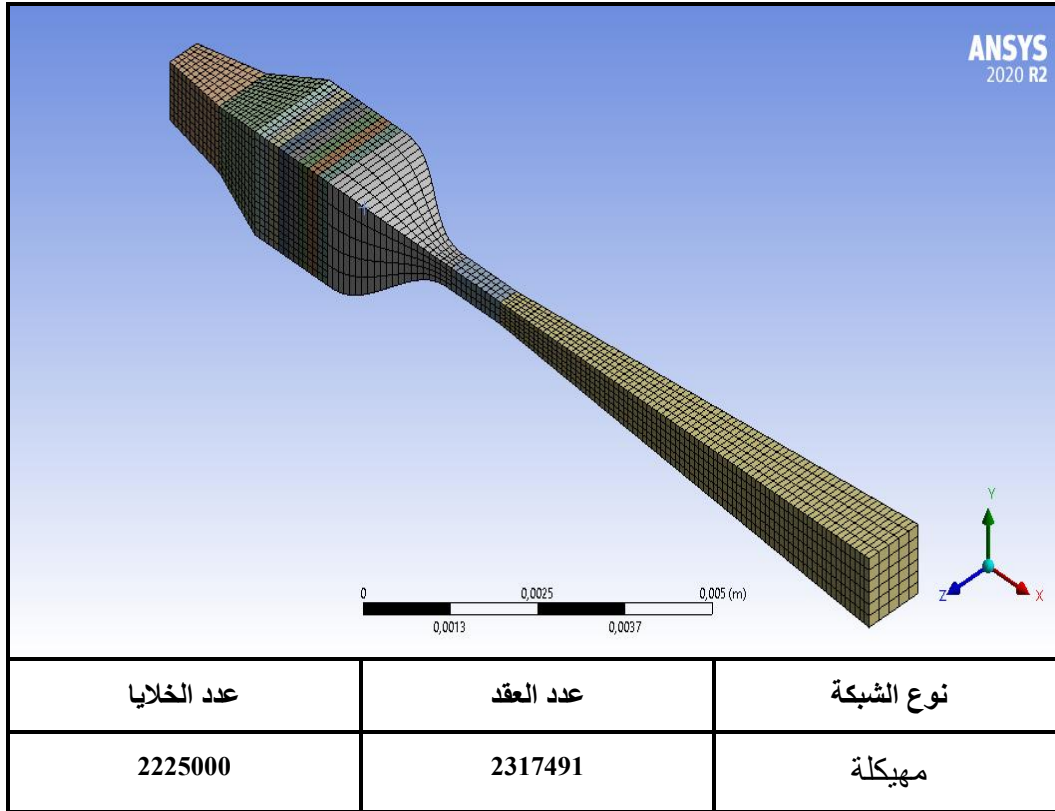
الشكل (1.III): الشكل الهندسي للنفق القابل للانضغاط



• تشكيل الشبكة :

تعد عملية تشكيل الشبكة خطوة مهمة جدًا في مرحلة ما قبل المعالجة فهي عملية تقسيم المجال إلى نقاط، فكلما قل حجم الشبكة ( تقسيم أكثر دقة) يعني ذلك الحل في نقاط أكثر و بالتالي زيادة دقة الحل لكن يكون ذلك على حساب زمن الحل ومساحة المعالج والعكس بالعكس. ثم يتم إختيار نوع الشبكة الملائمة لحل هذه المسألة إذ تعتمد نتائج المحاكاة على جودة الشبكة، يمكن أن تنتج شبكة منخفضة الجودة نتيجة محاكاة سيئة وحتى مختلفة.

تعتمد مواصفات الشبكة على مدى تعقيد الشكل الهندسي، في دراستنا لدينا اشكال بسيطة لذلك اعتمدنا على شبكة مهيكلة (structuré) اما بالنسبة لخلية النحل و الحواجز الشبكية نظرا لتعقيد شكلها قمنا باستعمال شرطي Porous zone و Porous jump الخاصة ببرنامج Ansys Fluent .



الشكل(3.III): تشكيل الشبكة في النفق القابل للانضغاط

• تعريف الشروط الحدية :

تعرف الشروط الحدية على أنها الحدود المحيطة بمجال الحساب والتي يكون عندها مدخل، مخرج، جدران موضحة في الجدول :

الحد	الشروط الحدي
مدخل الجريان	Mass flow inlet
مخرج الجريان	Pressure outlet
الجدران	Wall

الجدول(1.III): الشروط الحدية للنفق

2.2.III المعالجة العددية: Processing:

بعد تحديد المجال الهندسي وتشكيل الشبكة وتعريف الشروط الحدية تليها مرحلة حل المسألة عدديا باستعمال برنامج ANSYS FLUENT 19.2 ، حيث قمنا بمحاكاة النفق الهوائي القابل للانضغاط في الجريان اللزج.

من أجل البدء في حل المسألة يجب إتباع خطوات أساسية كالتالي :

1. قراءة الملف الذي يحتوي إحدائيات الشبكة التي تم إنشاءها وفحص جودة الشبكة واختيار نوع حل

قائم على الضغط Pressure-based.

2. إعداد النموذج العددي : يوفر برنامج الحساب FLUENT إمكانية اختيار أحد نماذج

الاضطراب التالية: تم استخدام Inviscid Model للمحاكاة العددية لجريان غير لزج (Euler)

حيث يعمل هذا النموذج على اهمال جميع الاحتكاكات الموجودة على مستوى النفق.

3. تعريف خصائص المواد المكونة للنموذج:

- السائل : غاز مثالي .
- الصلب : تم تحديد مادة الألمنيوم بالنسبة لجدران النفق .
- 4. التعريف بالشروط الحدية وإدخال القيم الخاصة بكل شرط .

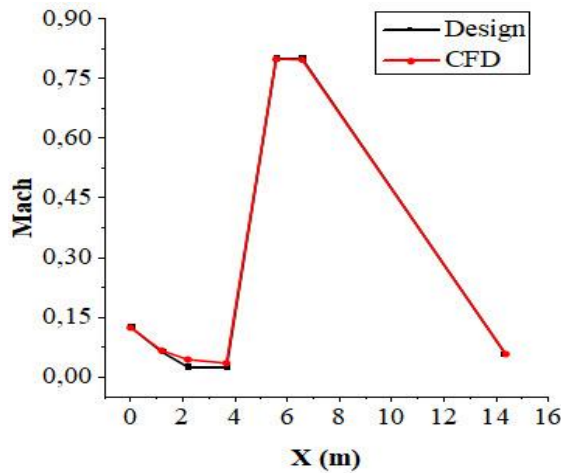
5. طريقة الحل: استعمال الخوارزمية SIMPLE

6. مقياس التقارب:  $10^{-6}$  لجميع المتغيرات.

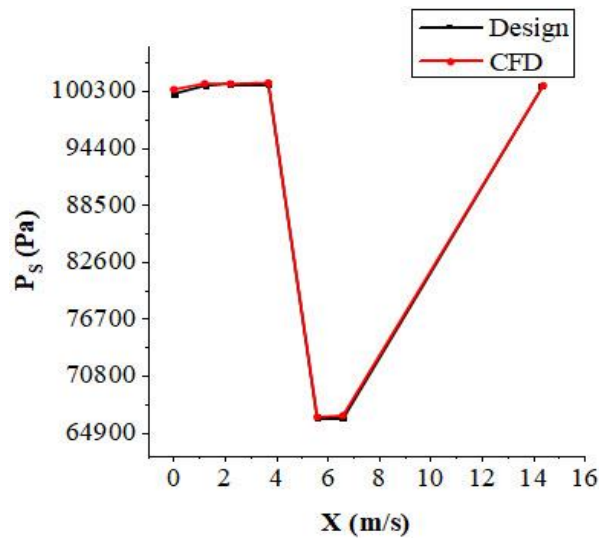
7.بدا الحساب .

3.2.III المعالجة النهائية Post Processing:

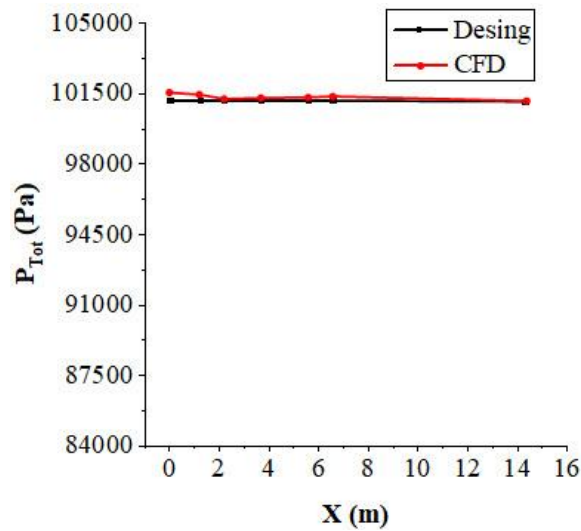
بعد اتمام عملية الحساب, تأتي مرحلة اظهار النتائج من خلال دراسة مقارنة بين نتائج التصميم الديناميكي ونتائج المحاكاة CFD.



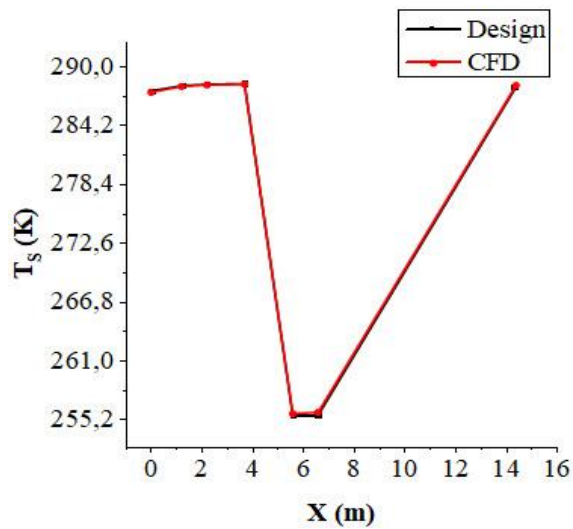
الشكل (4.III): منحنى تغيرات عدد ماخ ل CFD و Design لجريان غير لزج



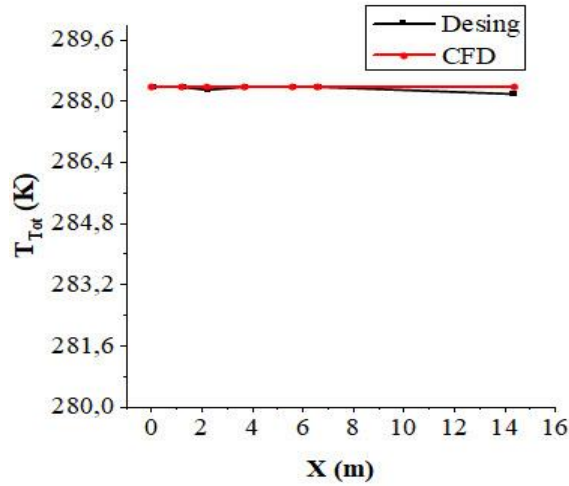
الشكل (5.III): منحنى تغيرات الضغط الساكن ل Design و CFD لجريان غير لزج



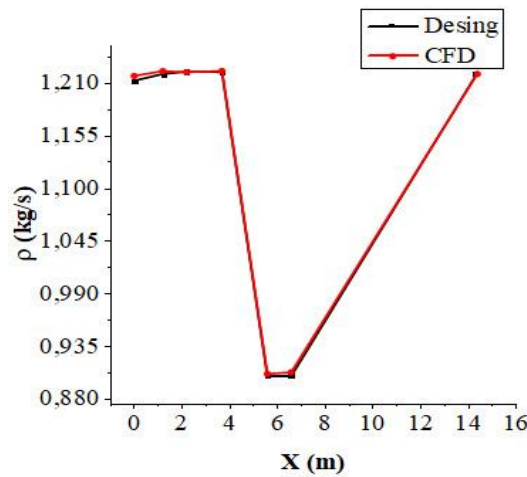
الشكل (6.III): منحنى تغيرات الضغط الكلي ل Design و CFD لجريان غير لزج



الشكل (7.III): منحنى تغيرات درجة الحرارة الساكنة ل Design و CFD لجريان غير لزج



الشكل (8.III): منحني تغيرات درجة الحرارة الكلية لـ Design و CFD لجريان غير لزج

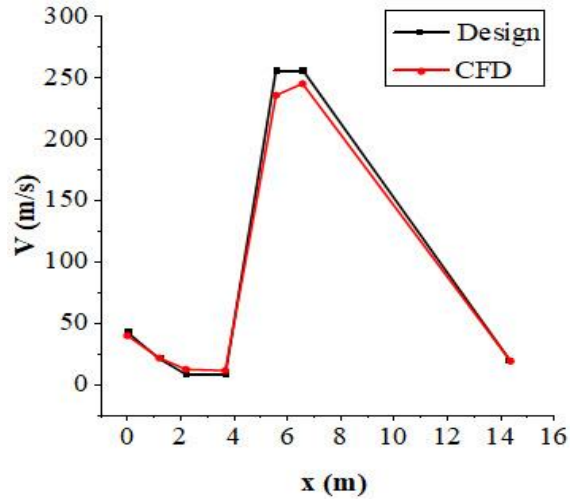


الشكل (9.III): منحني تغيرات الكتلة الحجمية لـ Design و CFD لجريان غير لزج

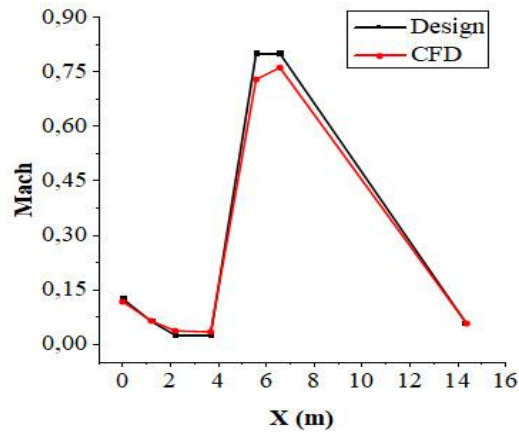
### 3.III المحاكاة العددية للجريان اللزج (Viscous):

من خلال تطبيق نفس المراحل السابقة و بتغيير نموذج العصف الى k-epsilon-Standard للمحاكاة العددية حيث يعمل هذا النموذج على ادراج جميع الاحتكاكات الموجودة على مستوى النفق، كذلك استعملنا الشرط الحدي Porous jump الخاص بالحواجز الشبكية و الخاصة Porous zone الخاصة بخلية النحل.

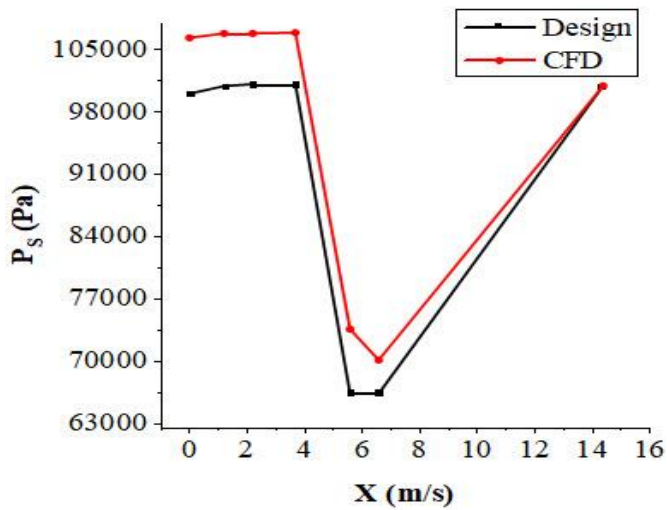
بعد اجراء الحساب تحصلنا على النتائج التالية :



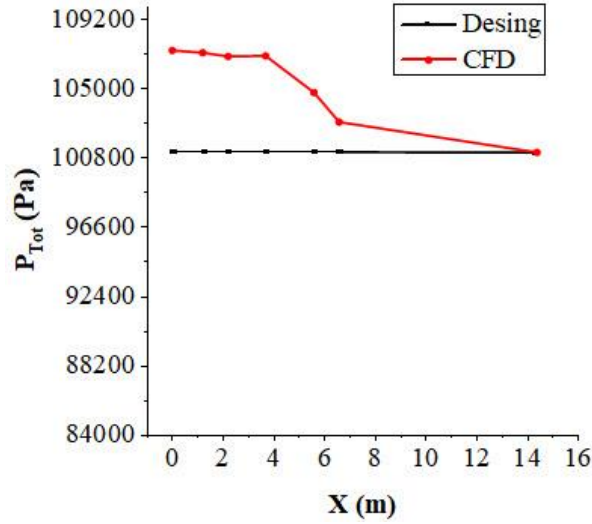
الشكل (10.III): منحنى تغيرات السرعة لـ Design و CFD لجريان لزج



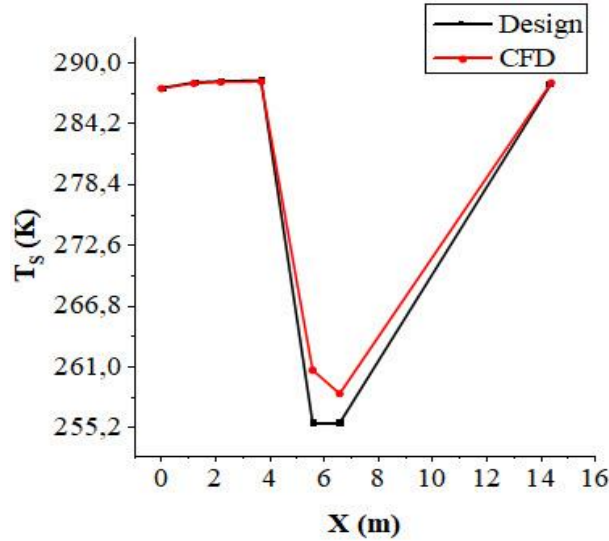
الشكل (11.III): منحنى تغيرات عدد ماخ لـ Design و CFD لجريان لزج



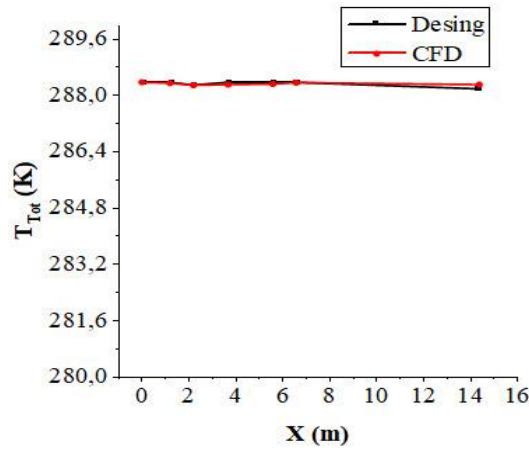
الشكل (12.III): منحنى تغيرات الضغط الساكن ل CFD و Design لجريان لزج



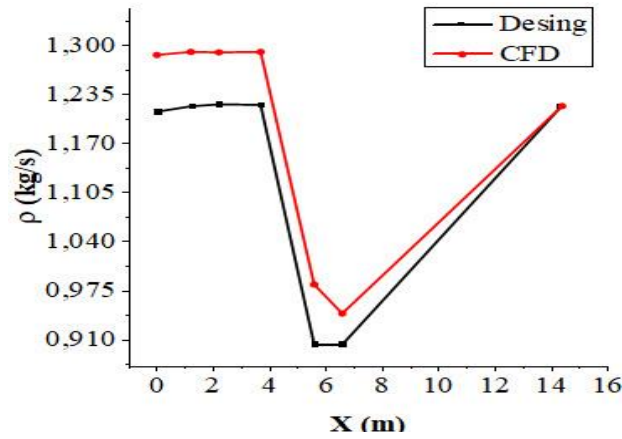
الشكل (13.III): منحنى تغيرات الضغط الكلي ل CFD و Design لجريان لزج



الشكل (14.III): منحنى تغيرات درجة الحرارة الساكنة ل CFD و Design لجريان لزج

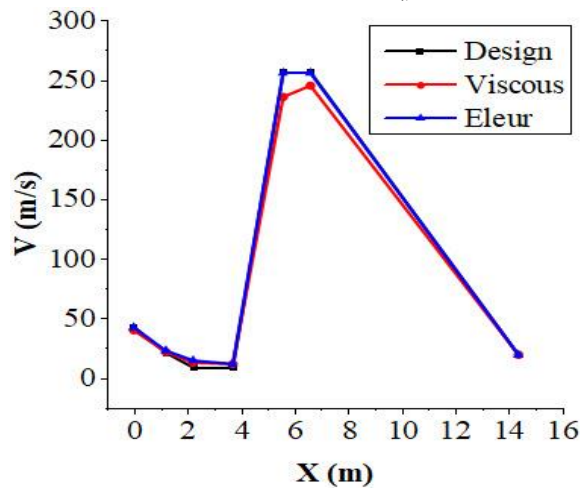


الشكل (15.III): منحنى تغيرات درجة الحرارة الكلية لـ Design و CFD لجريان لزج



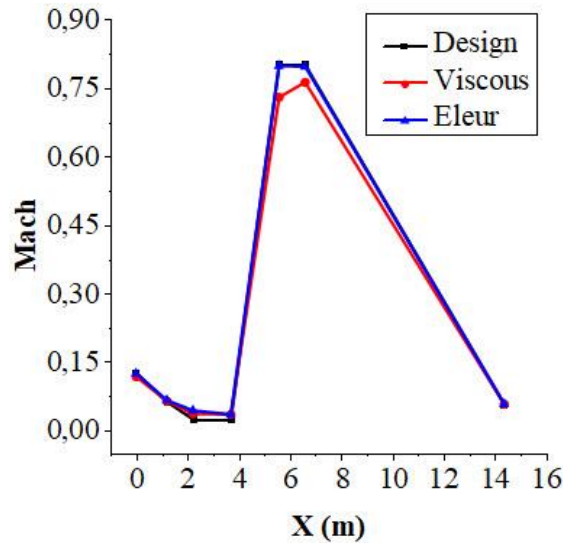
الشكل (16.III): منحنى تغيرات الكتلة الحجمية لـ Design و CFD لجريان لزج

- دراسة مقارنة لنتائج التصميم في الجريان اللزج و الغير لزج :

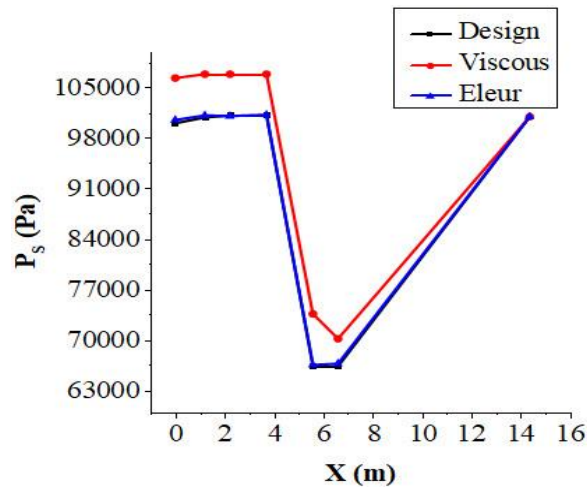


الشكل (17.III): منحنى تغيرات السرعة بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج

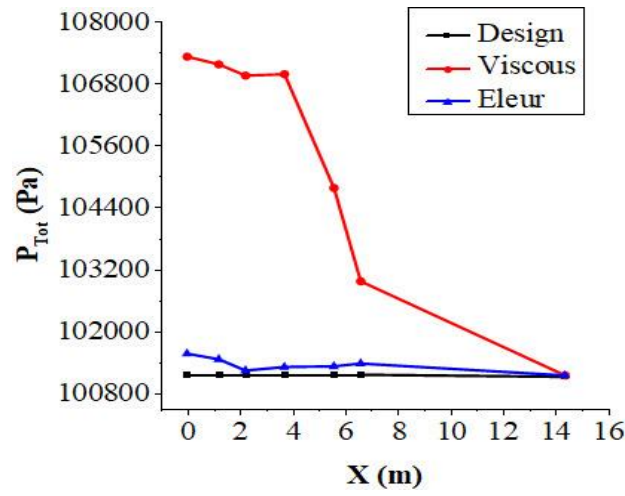




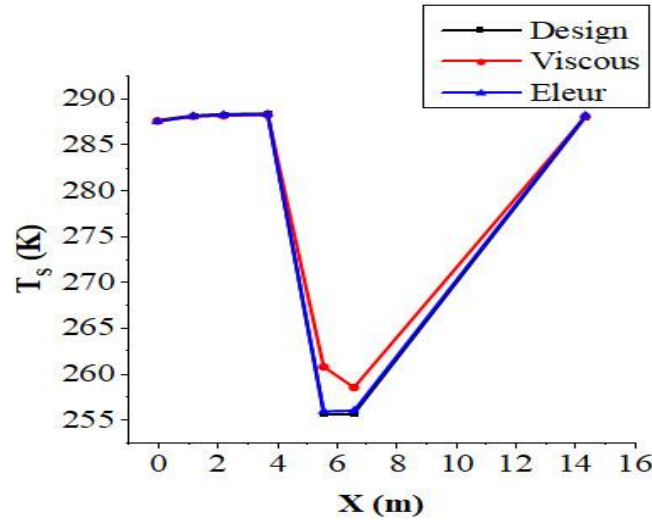
الشكل (18.III): منحنى تغيرات عدد ماخ بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج



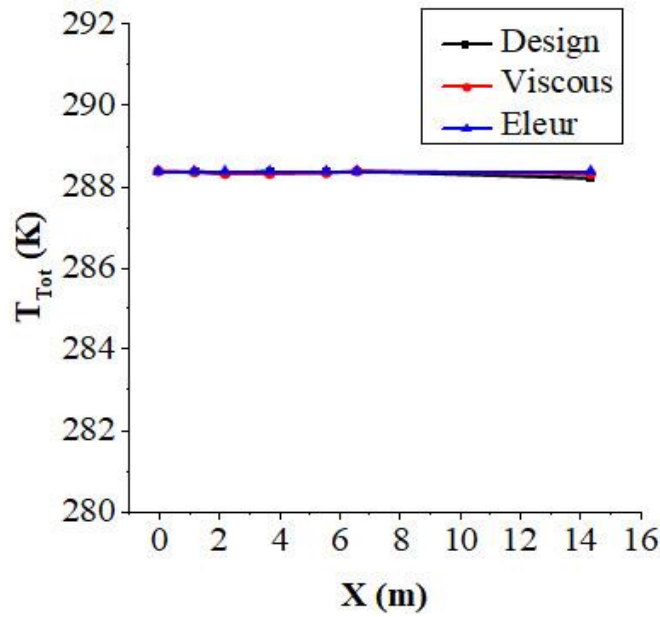
الشكل (19.III): منحنى تغيرات الضغط الساكن بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج



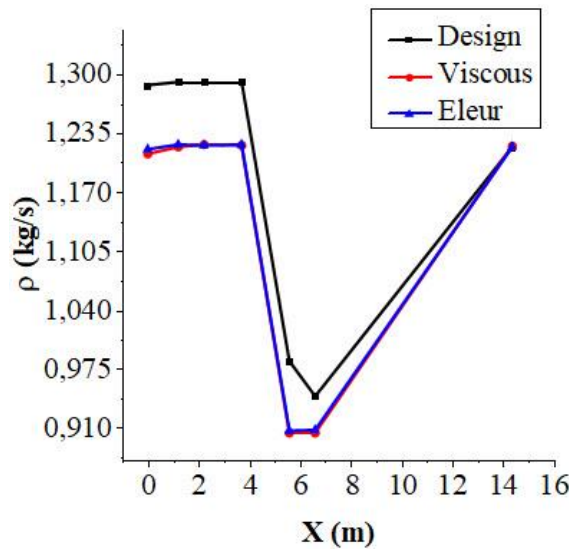
الشكل (20.III): منحنى تغيرات الضغط الكلي بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج



الشكل (21.III): منحنى تغيرات درجة الحرارة الساكنة بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج



الشكل (22.III): منحنى تغيرات درجة الحرارة الكلية بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج



الشكل (23.III): منحنى تغيرات الكتلة الحجمية بين التصميم و الجريان اللزج و الغير لزج

تعليقات :

- للجريان الغير لزج :

حسب المعطيات السابقة فان : عدد ماخ، الضغط الساكن ، الضغط الكلي ، درجة الحرارة الساكنة ، درجة الحرارة الكلية ، الكتلة الحجمية تتغير بتغير مساحة سريان المائع. حسب القيم المعطاة من المحاكاة العددية

فان جميع الاحتكاكات الموجودة على مستوى النفق مهمة ، مما يؤدي الى وجود اختلاف بين نتائج التصميم الديناميكي ونتائج المحاكاة ، نلاحظ بأن تغيرات السرعة ، عدد ماخ ، الضغط الساكن ، درجة الحرارة الساكنة ، درجة الحرارة الكلية، الكتلة الحجمية ل CFD تتوافق مع نتائج التصميم .

أما بالنسبة للضغط الكلي فيوجد اختلاف طفيف بين نتائج التصميم ونتائج المحاكاة وهذا راجع لوجود الاحتكاكات الناتجة عن الحواجز الشبكية وخليية النحل الموجودة في التصميم.

#### • للجريان اللزج :

نفس الشيء بالنسبة للجريان اللزج الا أن هذه المرحلة يتم فيها ادراج جميع الاحتكاكات المذكورة سابقا ، بالإضافة الى عدة أسباب تؤدي الى وجود فوارق بين نتائج المحاكاة ونتائج التصميم أهمها :

- نموذج الاضطراب
- الشروط الحدية
- خشونة السطح
- نوع العصف

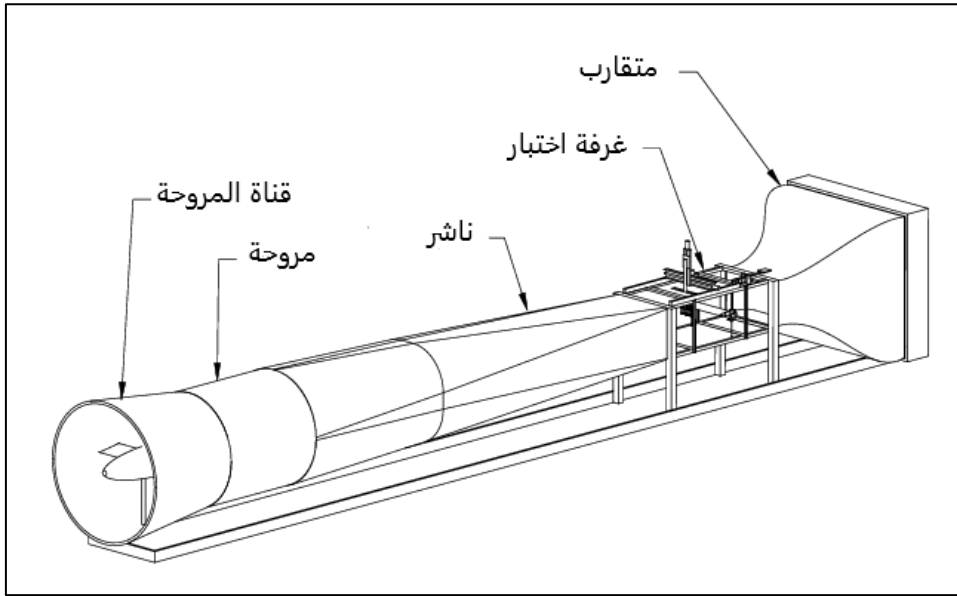
الفصل الرابع :

تصميم النفق الهوائي الغير

قابل للضغط

## 1.IV مقدمة :

يهدف هذا الفصل الى تصميم نفق هوائي تحت صوتي (جريان غير قابل للانضغاط  $M < 0.3$ ) بحلقة مفتوحة , وذلك من خلال برنامج بلغة الفورترن قام به البروفيسور رمزي مدوكي انطلاقا بوضع شرطي التصميم على مستوى غرفة الاختبار ( $S_{ts}=21\text{cm}\times 21\text{cm}$  و  $V=20\text{m/s}$ ).



الشكل(1.IV): العناصر الرئيسية للنفق الهوائي المراد تصميمه.

## 2.IV تصميم النفق الهوائي الغير قابل للانضغاط :

### 1.2.IV تصميم غرفة الاختبار :

لتصميم النفق الهوائي المطلوب , يتم اولا تحديد الابعاد والشكل وسرعة الهواء المطلوبة , بالنسبة لدراستنا تم اختيار غرفة اختبار ذات مقطع عرضي مربع الشكل طول ضلعه  $21\text{cm}$  يسري فيه الهواء بسرعة  $20\text{m/s}$ .

لتحديد طول غرفة الاختبار يجب مراعاة الشرطين التاليين :

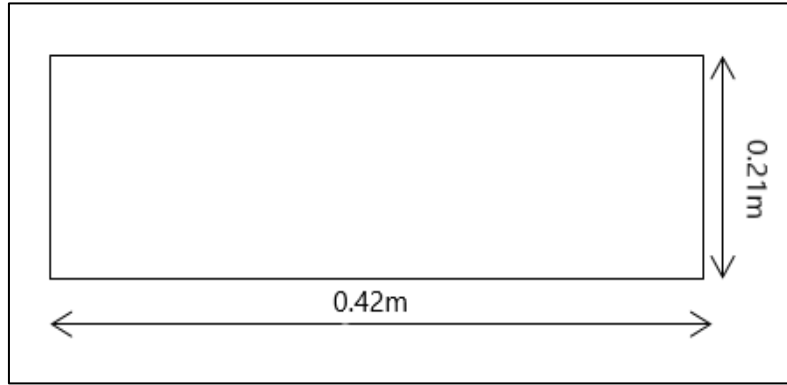
- الشرط الاول: يجب أن يكون طول غرفة الاختبار يساوي على الأقل نصف قطرها الهيدروليكي ( $L_{ts} \geq 0.5 \times D_{hts}$ ) و ذلك بهدف الحصول على جريان منتظمًا تقريبًا داخل غرفة الاختبار.
- الشرط الثاني : يجب أن لا يتجاوز طول غرفة الاختبار ثلاثة أضعاف قطرها الهيدروليكي ( $L_{ts} \leq 3 \times D_{hts}$ ) و ذلك لتفادي زيادة سمك الطبقة الحدية و الذي يتسبب في انفصالها عند مخرج غرفة الاختبار.

حيث :

$$D_{hts} = 4 \times \frac{A_{ts}}{P_{ts}} = 4 \times \frac{l_{ts} \times l_{ts}}{4 \times l_{ts}} = l_{ts} \quad (1. IV)$$

في دراستنا قمنا باختيار طول غرفة الاختبار  $l_{ts}$  يساوي ضعف قطرها الهيدروليكي :

$$l_{ts} = 2 \times D_{hts} \quad (2. IV)$$



الشكل (2.IV): غرفة الاختبار

الخصائص	الدخول	الخروج
عدد ماخ	0.058	0.058
الضغط الساكن	100349.954	100342.688
الضغط الكلي	100599.954	100592.688
السرعة	20	20

الجدول (1.IV): خصائص غرفة الاختبار

#### 2.2.IV تصميم المتقارب :

كما تطرقنا له في الفصل الثاني ,فان المتقارب يعد اصعب عنصر في التصميم لذلك قمنا بتحديد شكله من خلال كثير الحدود من الدرجة الخامسة المقترح من طرف الباحثين بيل و مهتا (Bell-Mehta) والممثل رياضيا بالمعادلة التالية :

$$y = [-6 \xi^5 + 15 \xi^4 - 10 \xi^3](y_i + y_o) + y_i \quad (3. IV)$$

حيث:

$y$  : نصف طول ضلع المقطع العرضي للمتقارب.

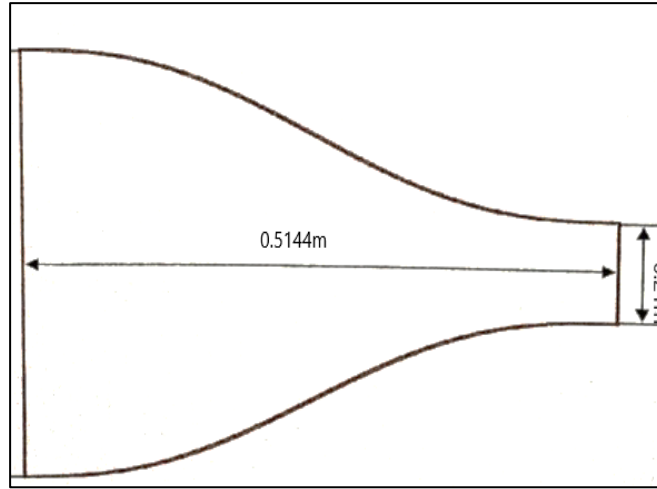
$y_i$  :نصف طول ضلع المقطع العرضي لمدخل المتقارب.

$y_o$  :نصف طول ضلع المقطع العرضي لمخرج المتقارب.

$\xi$  : متغير عديم البعد يعطى بدلالة كل من طول المتقارب ( $L_{cv}$ ) و المسافة المحورية ( $X$ ) كالاتي:

$$\xi = \frac{X}{L_{cv}} \quad ; \quad 0 \leq X \leq L_{cv} \quad (4. IV)$$





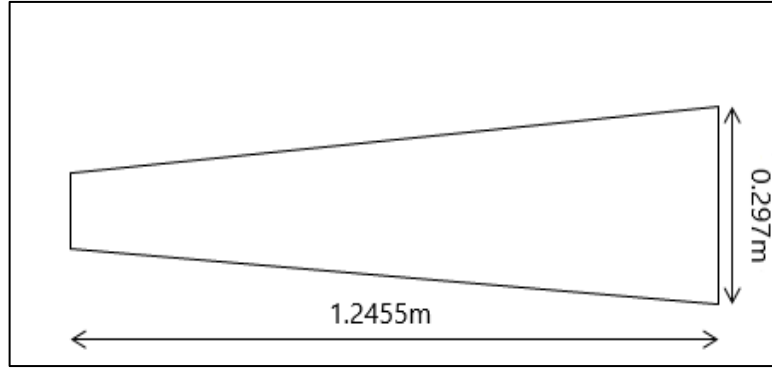
الشكل (3.IV): المتقارب

الخصائص	الدخول	الخروج
عدد ماخ	0.0082	0.058
الضغط الساكن	100594.898	100349.954
الضغط الكلي	100600	100599.954
السرعة	2.857	20

الجدول (2.IV): خصائص المتقارب

### 3.2.IV تصميم الناشر :

يبدأ تصميم الناشر من المقطع العرضي لمدخله الذي يكتب شكلًا مربعًا و الذي تتساوى مساحته مع مساحة المقطع العرضي لغرفة الاختبار، بينما تتساوى مساحة المقطع العرضي لمخرجه مع مساحة المقطع العرضي للمروحة نظرًا لربطهما معًا.



الشكل (4.IV): الناشر

الخصائص	الدخول	الخروج
عدد ماخ	0.058	0.0288
الضغط الساكن	100342.688	100512.689
الضغط الكلي	100592.688	100575.189
السرعة	20	10

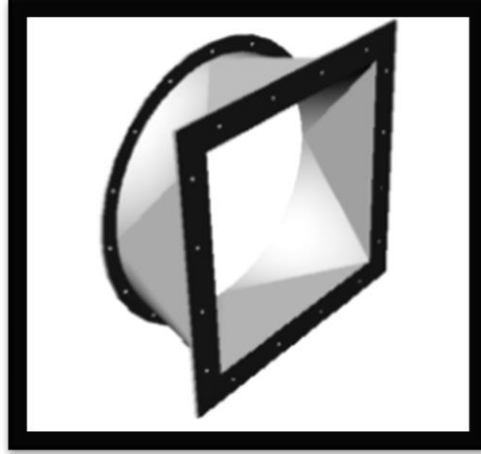
الجدول (3.IV): خصائص الناشر

#### 4.2.IV تصميم المروحة :

يتمثل دور المروحة داخل النفق الهوائي في توليد حركة الهواء تحت تدفق معين مع إحداث فرق في الضغط و تكون محورية أو طاردة مركزية كما يمكن أن تكون ناسفة أو شافطة. في دراستنا هذه، قمنا باستعمال مروحة شافطة من النوع المحوري و تتموقع في آخر النفق الهوائي عند مخرج الناشر.

#### 5.2.IV تصميم الرابط :

بما ان المقطع العرضي لمخرج الناشر مربع ومقطع المروحة دائري , فهذا يستوجب علينا استعمال رابط يعمل على تحويل الشكل الهندسي من مربع الى دائري . يبلغ طول الرابط في دراستنا حوالي 16.7cm.



الشكل (5.IV): الرابط

الخصائص	الدخول	الخروج
عدد ماخ	0.0288	0.0288
الضغط الساكن	100512.689	100510.431
الضغط الكلي	100575.189	100572.931
السرعة	10	10

الجدول (4.IV): خصائص الرابط

#### 6.2.IV تصميم قناة المروحة :

هي قناة لتثبيت المروحة، يكتسب مقطعها العرضي شكلا دائريا ويمتاز بأنه ثابت و يساوي المقطع العرضي للمروحة.



الشكل (6.IV): قناة المروحة

الخصائص	الدخول	الخروج
عدد ماخ	0.0288	0.0288
الضغط الساكن	100510.431	100509.482
الضغط الكلي	100572.931	100571.982
السرعة	10	10

الجدول (5.IV): خصائص قناة المروحة

## الفصل الخامس :

تخليد النفق الهوائي غير قابل

للانضغاط

## 1.V مقدمة :

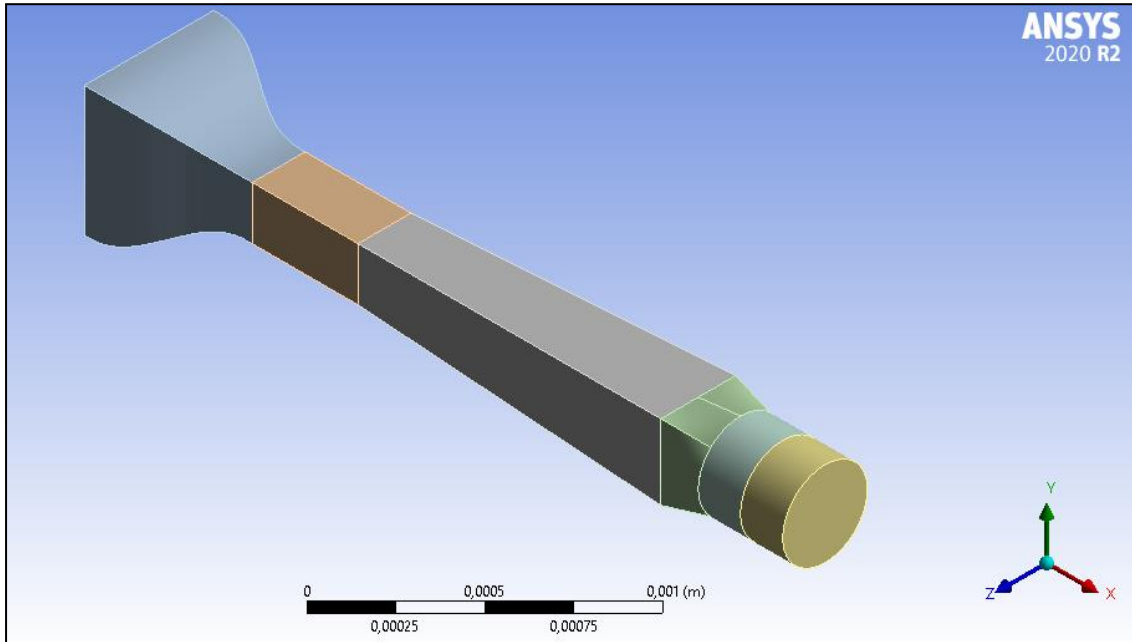
بعد تصميم النفق تأتي مرحلة المحاكاة ، حيث يهدف هذا الفصل الى محاكاة نفق هوائي غير قابل للانضغاط في هيئة ثلاثية البعد 3D بدون مروحة و بمروحة .

## 2.V المحاكاة العددية للنفق الهوائي بدون مروحة :

### 1.2.V إعداد المسألة- ما قبل المعالجة العددية PRE- PROCESSING:

- رسم الشكل الهندسي :

باستعمال برنامج الرسم Gambit 2.4.6 قمنا برسم النفق الهوائي في الهيئة ثلاثية البعد 3D وانطلاقا من الملف المتحصل عليه بعد تنفيذ برنامج خاص بتصميم النفق الهوائي قمنا بتحديد الأبعاد الهندسي للمجال الحسابي.



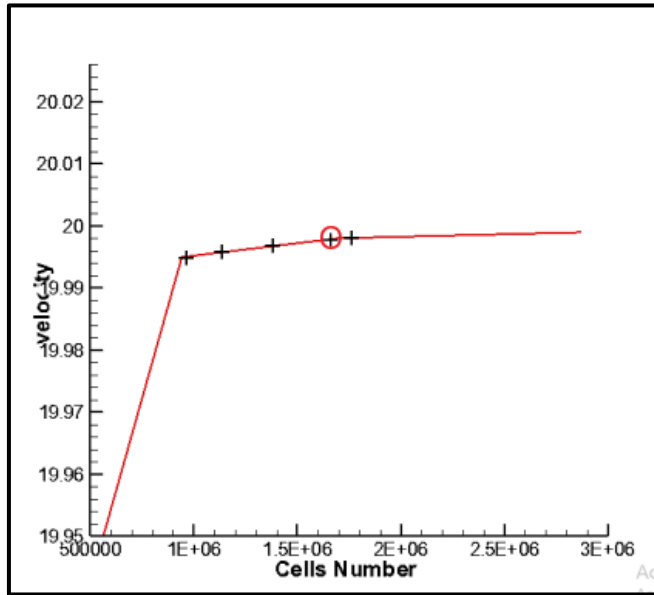
الشكل (1. V): الشكل الهندسي للنفق الغير قابل للانضغاط

• تشكيل الشبكة :

تعتمد مواصفات الشبكة على مدى تعقيد الشكل الهندسي, في دراستنا لدينا اشكال بسيطة لذلك اعتمدنا على شبكة مهيكلة. (structured)

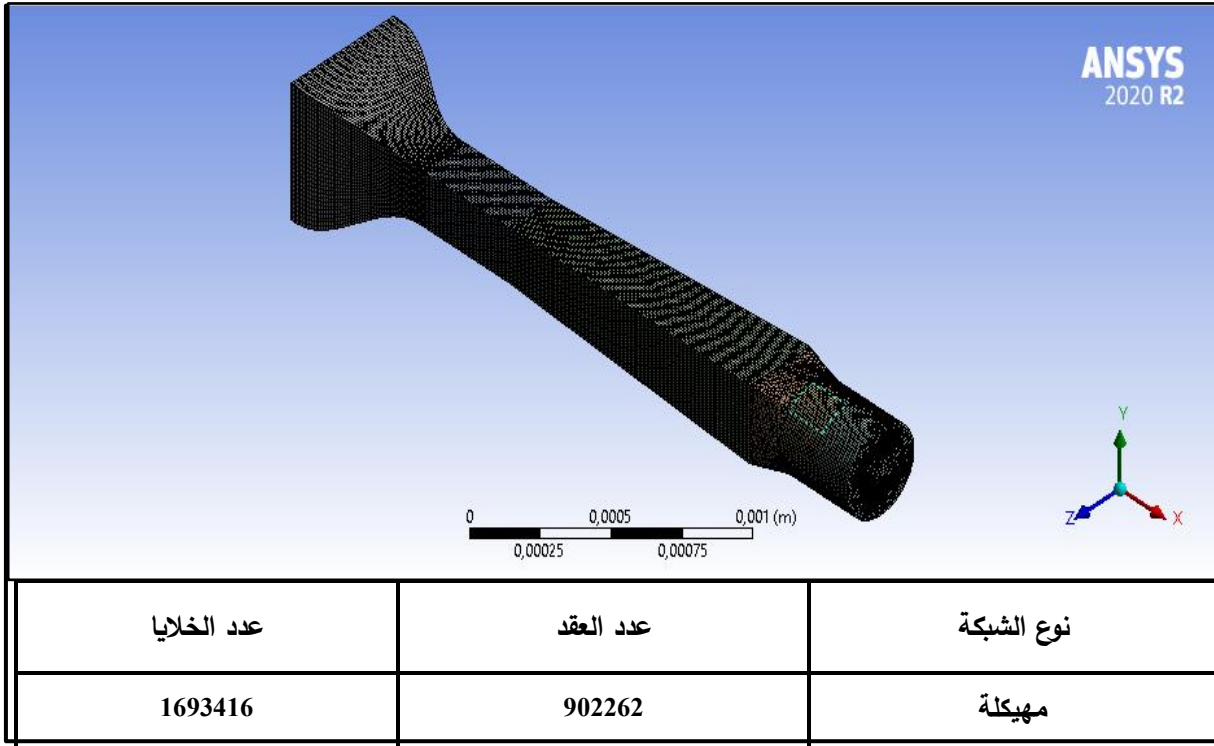
• استقلالية الشبكة :

بعد القيام بعدة محاولات من اجل اختيار شبكة مناسبة لرصد حل دقيق في وقت حساب قصير .



الشكل (2. V): منحنى السرعة عند مخرج النفق بدلالة عدد الخلايا

عند ثبات السرعة في غرفة الاختبار قمنا باختيار الشبكة التي تتكون من 1693416 خلية .



الشكل (3. V): الشكل الهندسي للنفق الغير قابل للانضغاط

• تعريف الشروط الحدية :

تعرف الشروط الحدية على أنها الحدود المحيطة بمجال الحساب والتي يكون عندها مدخل، مخرج،

جدران موضحة في الجدول :

الشروط الحدي	الحد
Mass flow inlet	مدخل الجريان
Pressure outlet	مخرج الجريان
Wall	الجدران

الجدول (1. V): الشروط الحدية لنفق بدون مروحة



## 2.2.V Processing: المعالجة العددية:

بعد تحديد المجال الهندسي وتشكيل الشبكة وتعريف الشروط الحدية تليها مرحلة حل المسألة عدديا باستعمال برنامج ANSYS FLUENT 19.2 ، حيث قمنا بمحاكاة النفق الهوائي الغير قابل للانضغاط بدون مروحة .

من أجل البدء في حل المسألة يجب إتباع خطوات أساسية كالتالي :

1. قراءة الملف الذي يحتوي إحدائيات الشبكة التي تم إنشاءها وفحص جودة الشبكة وإختيار نوع حل

قائم على الضغط Pressure-based ،الذي قابل للتطبيق على نطاق واسع للجريانات الغير القابل للانضغاط ومنخفضة السرعة. وتحديد نظام دائم.

2. إعداد النموذج العددي :يوفر برنامج الحساب FLUENT إمكانية اختيار أحد نماذج الاضطراب

التالية: تم استخدام نموذج العصف k-epsilon-Standard للمحاكاة العددية.

3. تعريف خصائص المواد المكونة للنموذج:

- المائع : هواء عند درجة حرارة  $25^{\circ}\text{C}$ .

- الصلب : تم تحديد مادة الألمنيوم بالنسبة لجدران النفق .

4. التعريف بالشروط الحدية وإدخال القيم الخاصة بكل شرط :

القيمة	الشرط الحدي
$\dot{m}=1.08 \text{ kg/s}$ , $P=100600 \text{ pas}$ شدة العصف : 10%	Mass flow inlet
$P=100600 \text{ pas}$ شدة العصف : 10%	Pressure Outlet

الجدول (2. V):الشروط الحدية للنفق مع القيم

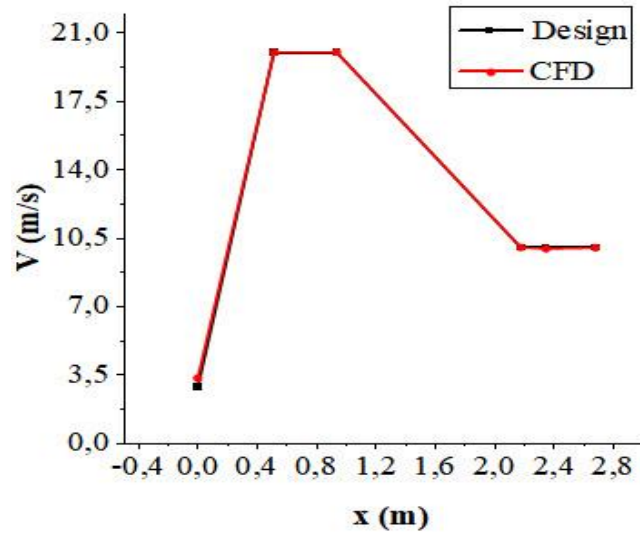
طريقة الحل: يتم إختيار طريقة الحل على النحو التالي:

- المخطط (الخوارزمية): Coupled.
- مقياس التقارب:  $10^{-6}$  لجميع المتغيرات.
- بدأ الحساب .

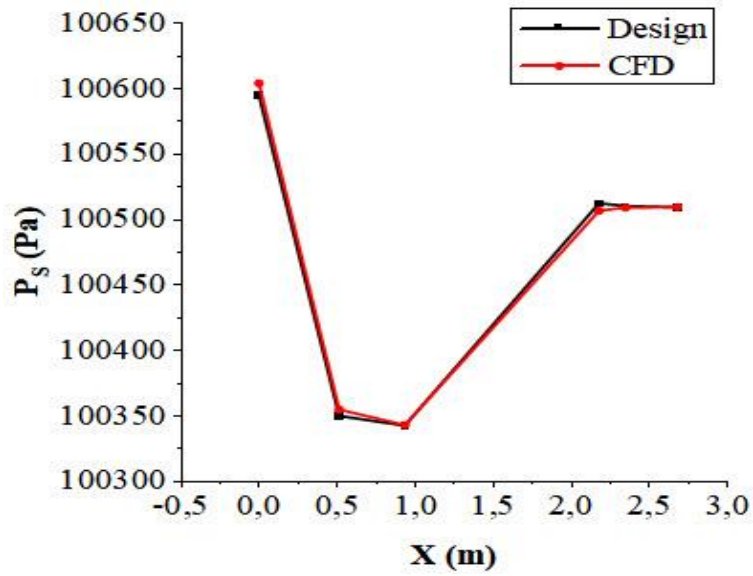
### 3.2.V المعالجة النهائية Post Processing:

وهي مرحلة إظهار النتائج بعد إنجاز الحل ،يمكن عرض وتحليل النتائج في عدة أشكال مختلفة(مخططات،

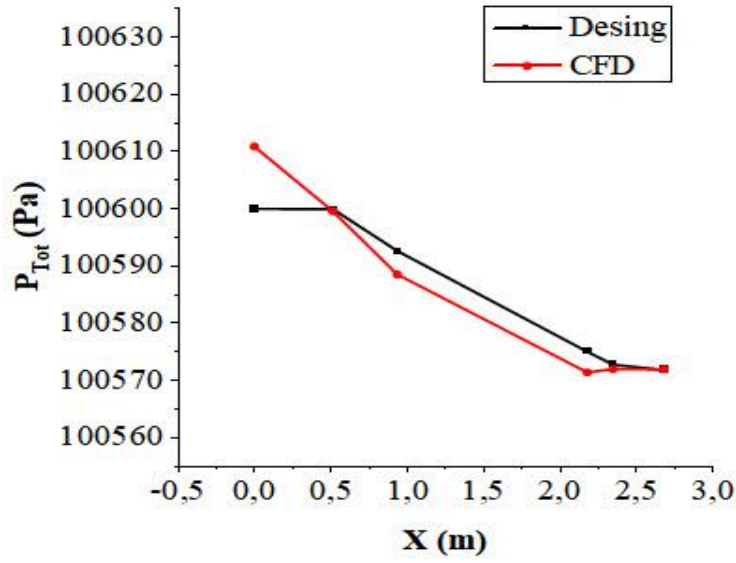
رسوم بيانية ) .



الشكل (4. V): منحنى تغيرات السرعة ل Design و CFD لنفق بدون مروحة



الشكل (5. V): منحنى تغيرات الضغط الساكن ل Design و CFD لنفق بدون مروحة



الشكل (6. V): منحنى تغيرات الضغط الكلي لـ Design و CFD لنفق بدون مروحة

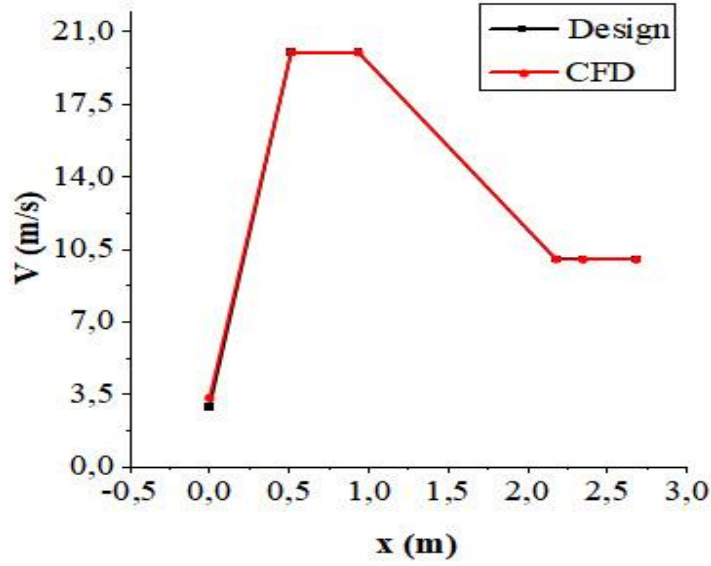
### 3.V المحاكاة العددية للنفق الهوائي بمروحة :

من خلال تطبيق نفس الخطوات التي سبق ذكرها مع تغيير بسيط في الشروط الحدية :

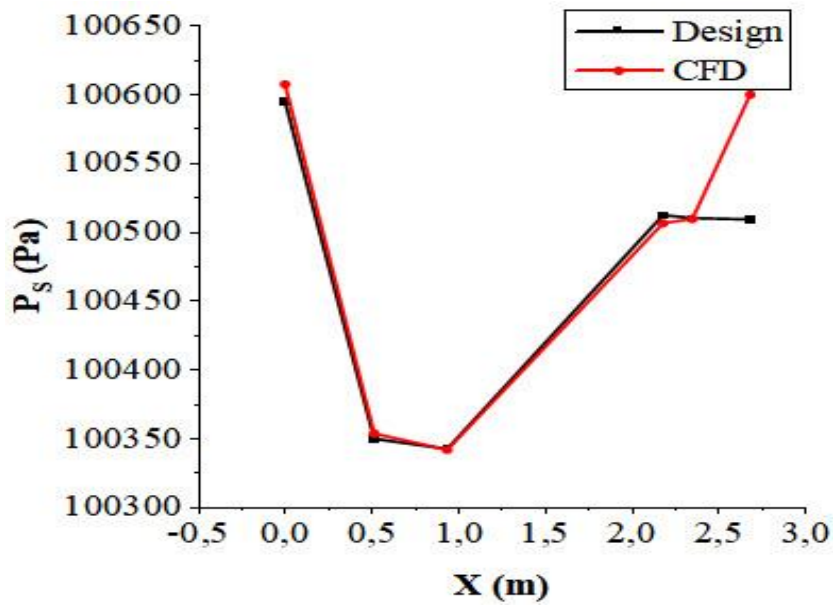
القيمة	الشروط الحدي
$\dot{m}=1.08 \text{ Kg/s}$ , $P=100600 \text{ Pas}$ شدة العصف : 10%	Mass flow inlet
$P=100600 \text{ Pas}$ شدة العصف : 10%	Pressure Outlet
$\Delta P=91 \text{ Pas}$	Fan

الجدول (3. V): الشروط الحدية لنفق بمروحة

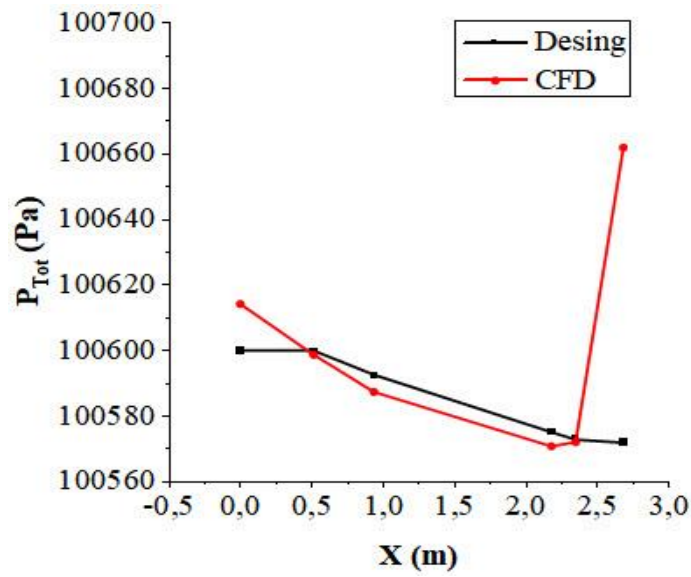
النتائج المحصلة عليها :



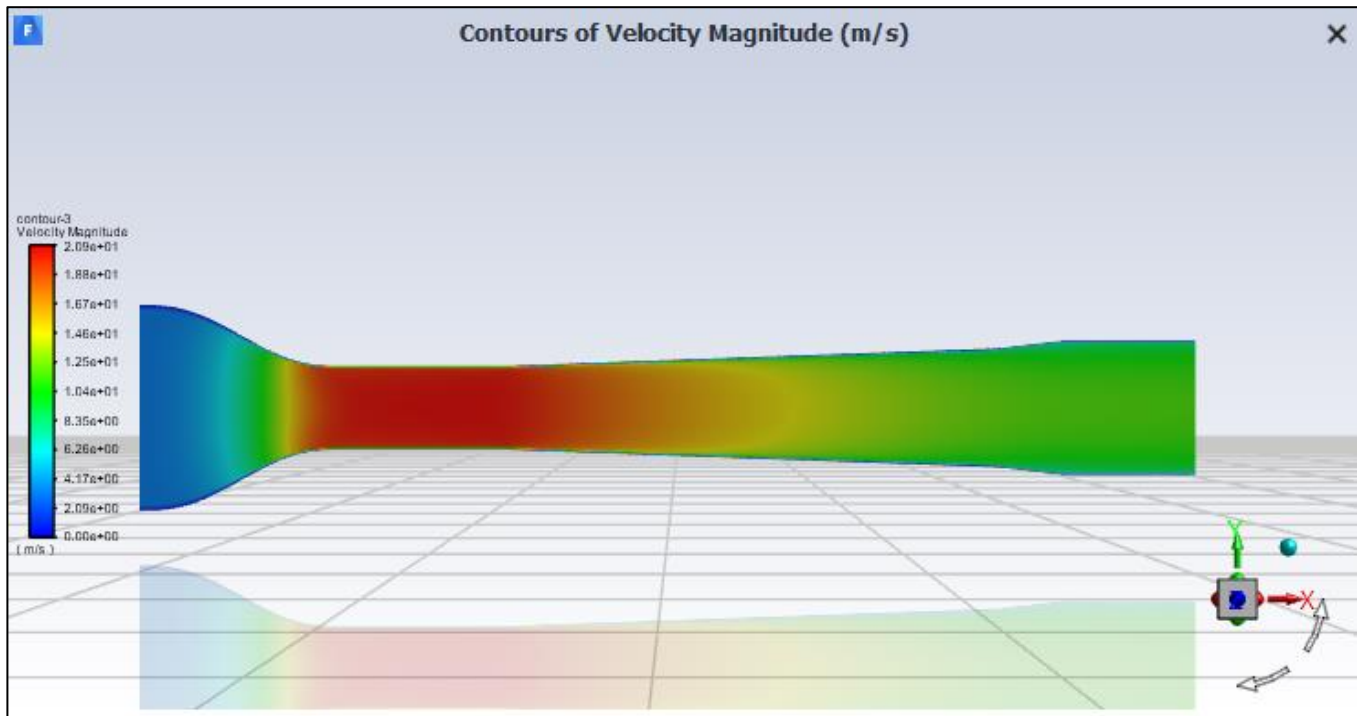
الشكل (7. V): منحنى تغيرات السرعة ل Design و CFD لنتق بمروحة



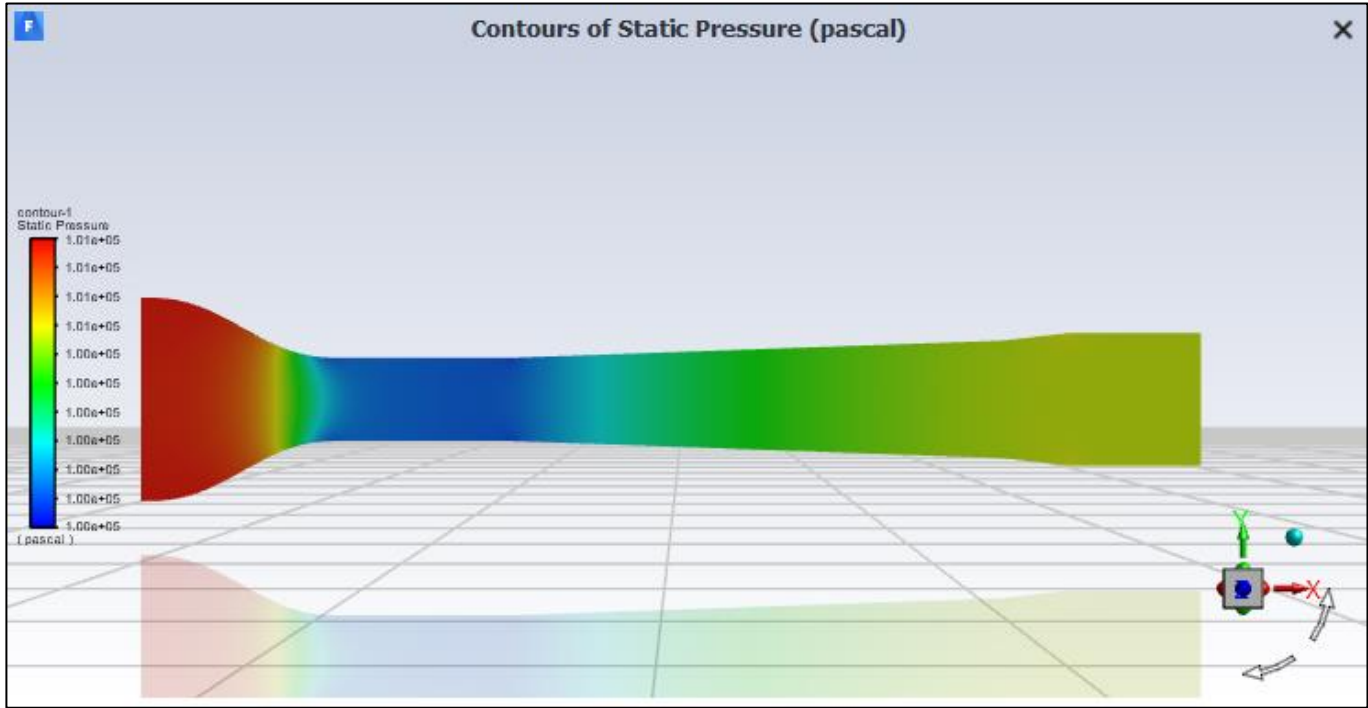
الشكل (8. V): منحنى تغيرات الضغط الساكن ل Design و CFD لنتق بمروحة



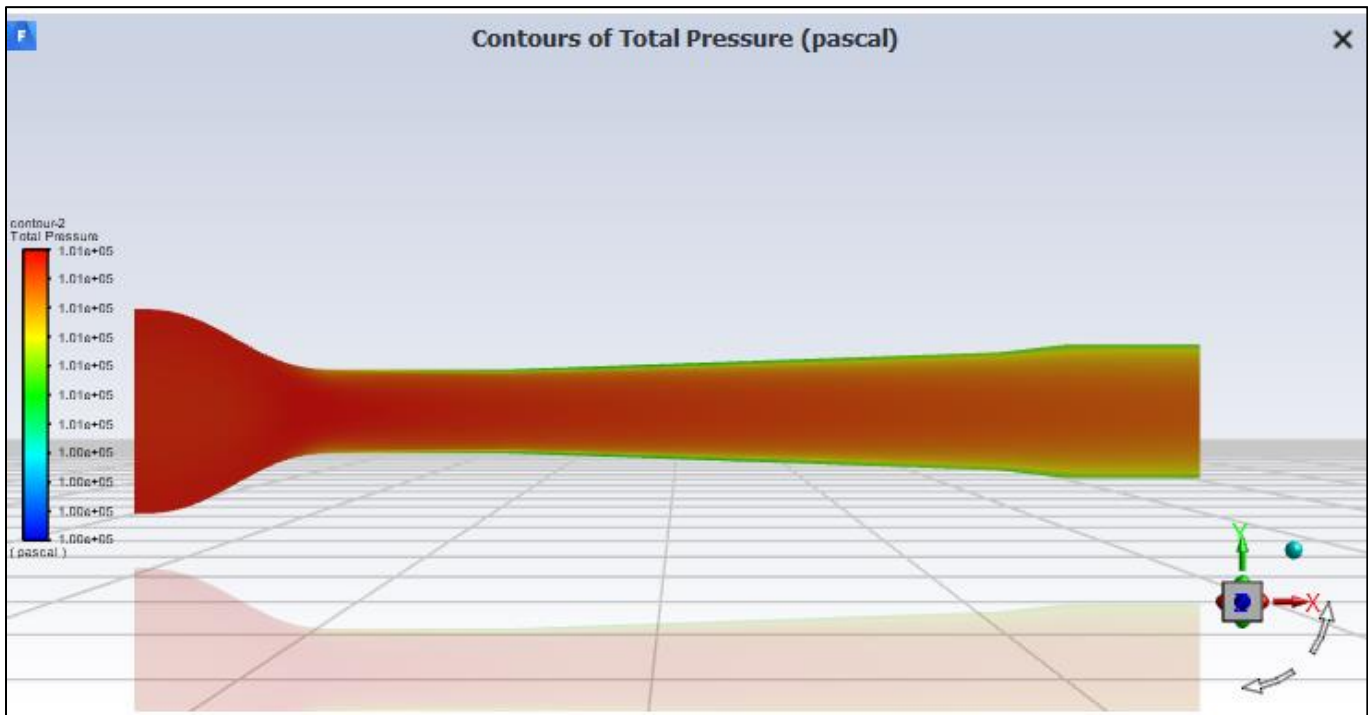
الشكل (9. V): منحنى تغيرات الضغط الكلي ل CFD و Design لنفق بمروحة



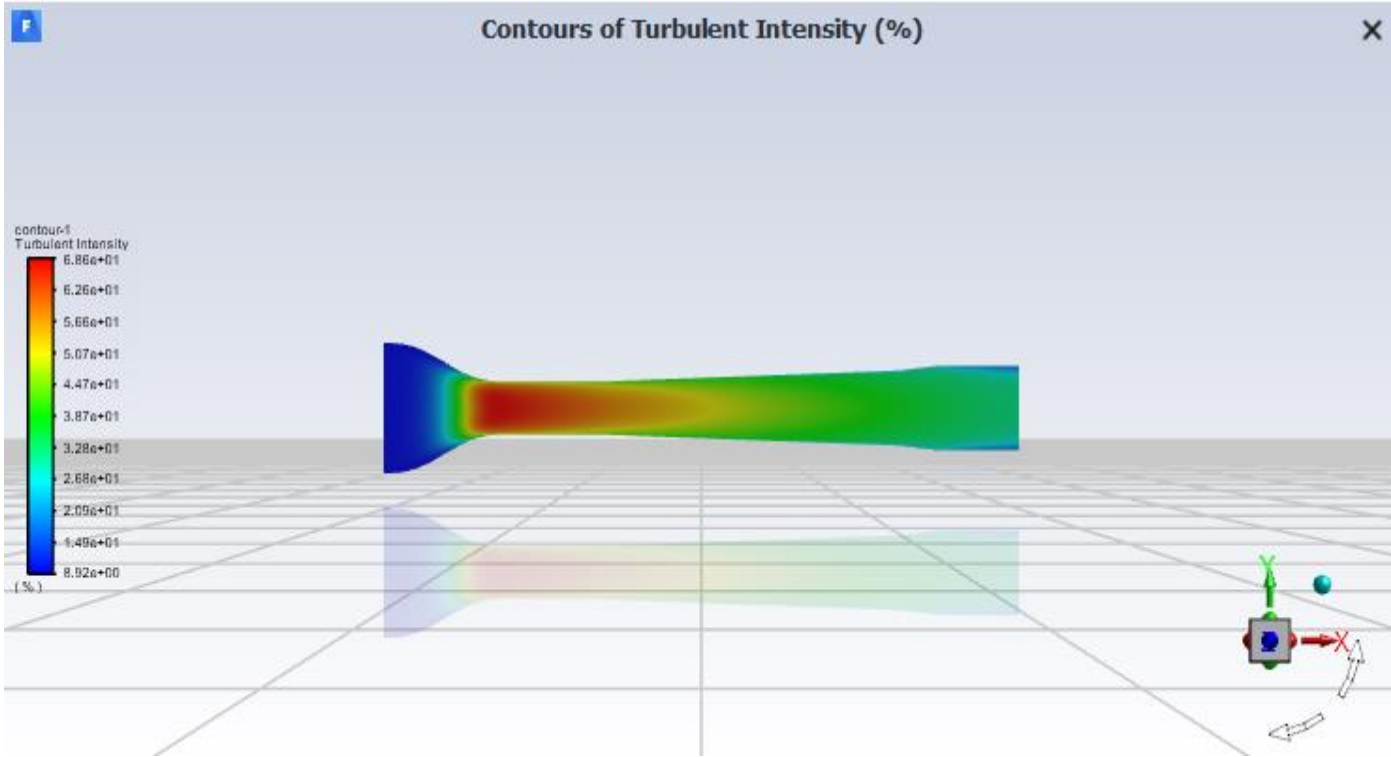
الشكل (10. V): خريطة تبين تغيرات السرعة في النفق بمروحة.



الشكل(11.V): خريطة تبين تغيرات الضغط الساكن في النفق بمروحة.



الشكل(12.V): خريطة تبين تغيرات الضغط الكلي في النفق بمروحة.



الشكل (13.V): خريطة تبين تغيرات شدة الاضطراب في النفق بمروحة.

#### تعليقات :

بعد القيام بالمحاكاة العددية تبين لنا بأن النتائج المحصل عليها في النفق الهوائي الغير قابل للانضغاط بدون مروحة تتوافق مع نتائج التصميم من حيث : السرعة ، الضغط الساكن، الضغط الكلي .

أما بالنسبة للنفق الهوائي بمروحة هناك فرق بمقدار 90Pas والتي تمثل قيمة المروحة المضافة عند مخرج النفق التي تؤدي بالضرورة الى الزيادة في الضغط الساكن والضغط الكلي الى حد الوصول الى الضغط الجوي.



الفصل السادس :

تجسير نفق هوائي غير قابل

للانضغاط

## 1.VI مقدمة :

يعتبر النفق الهوائي وسيلة هامة لاجراء التجارب والابحاث التي تدرس تأثير حركة الهواء على الأجسام، في هذا الفصل سنقوم بانجاز نفقين هوائيين قابل للانضغاط وغير قابل للانضغاط، نظرا لعدم توفر الامكانيات اللازمة لتجسيد النفق الهوائي القابل للانضغاط، فقد قمنا بتجسيد نفق هوائي غير قابل للانضغاط للتطبيقات التعليمية التي تتوافق مع جميع معايير التشابه من اجل الاقتراب قدر الامكان من الظروف الحقيقية.

## 2.VI الأدوات المستعملة :

- 3 أوراق حديدية: ذات سمك 1mm وأبعاد 2m×1m.
- 18 متر من حواف الحديدية على شكل حرف ل ذات سمك 2mm.
- طاحونة قرص
- متقاب كهربائي عمودي
- آلة حدادة
- براغي وحلقات و صامولات (8mm).
- صفائح زجاجية بسمك 6mm.
- لوح اردوينو Nano
- شاشة لعرض القيم المدروسة من نوع LCD
- مستشعر لقياس الضغط ,درجة الحرارة و الرطوبة من نوع BMP280

## 1.2.VI المثقاب الكهربائي العمودي :

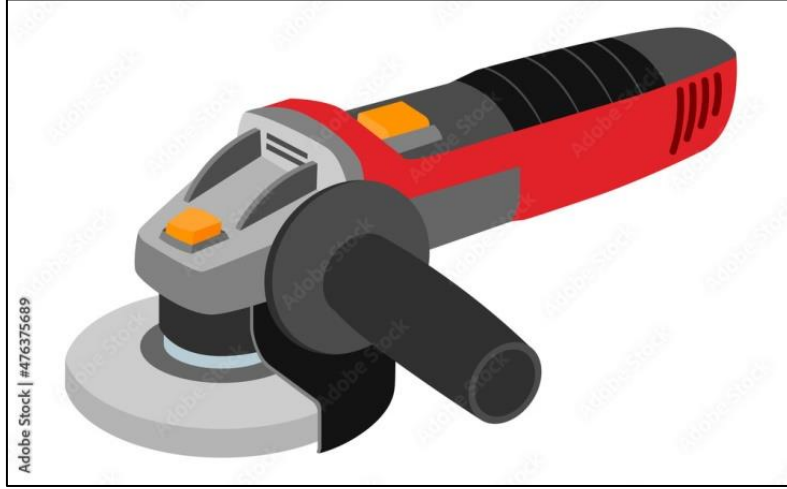
المثاقب الكهربائية عبارة عن أدوات التي يتم استعمالها كثيرا في ورش النجارة والآلات او مشاريع .المثقاب أداة مفيدة للغاية تتمثل مهمتها الأساسية في الحفر على الأسطح والمواد المختلفة مثل الخشب والمواد والمعادن المختلفة، على الرغم من أننا نعتبر المثاقب أداة للحفر، إلا أن هذا ليس استخدامها الوحيد. نرى اليوم مجموعة متنوعة من المثاقب التي تستخدم في مجالات وعمليات مختلفة مثل قص وشد وفك البراغي أو حتى تلميع الأسطح المعدنية.



الشكل (1.VI): مثقاب كهربائي عمودي

## 2.2.VI طاحونة القرص :

هي أداة جليخ تستخدم لقطع وتلميع الألياف الزجاجية البلاستيك المسلح. وهي تستخدم أساسا لقطع وطحن وتنظيف المعادن والحجارة.



الشكل (2.VI): طاحونة القرص

### 3.2.VI آلة لحيم :

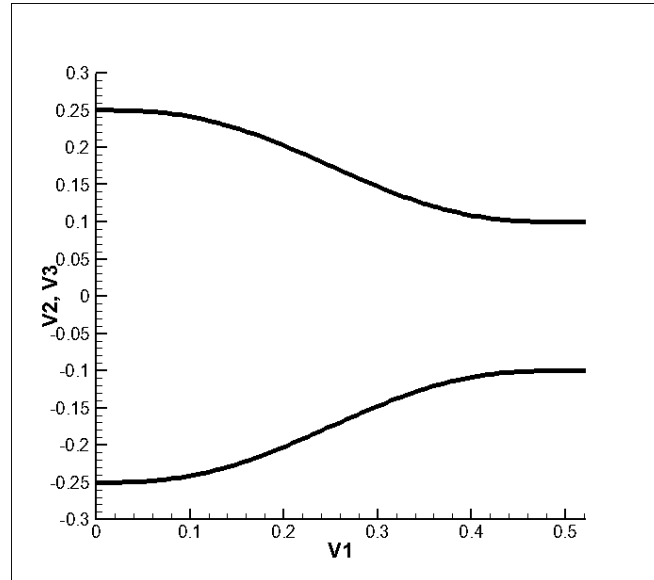
آلة اللحام هي الأداة المستخدمة لأداء عمليات اللحام. إنها وحدة توفر الطاقة الكهربائية اللازمة لتوليد قوس كهربائي بين قطب لحام والقطب المراد لحامها، مما يسمح بانصهارها معًا. يمكن لآلة اللحام أن تعمل بمختلف عمليات اللحام مثل اللحام بالقوس الكهربائي بقطب مغلف (SMAW) ، أو اللحام بالقوس تحت غاز حماية (MIG/MAG) ، أو اللحام بالقوس تحت غاز محمي بالتنجستن (TIG). يمكن استخدامها في العديد من الصناعات، من الهندسة المعدنية إلى تصنيع المعدات السيارات، وصيانة وإصلاح المعدات



الشكل (3.VI): آلة التلحيم

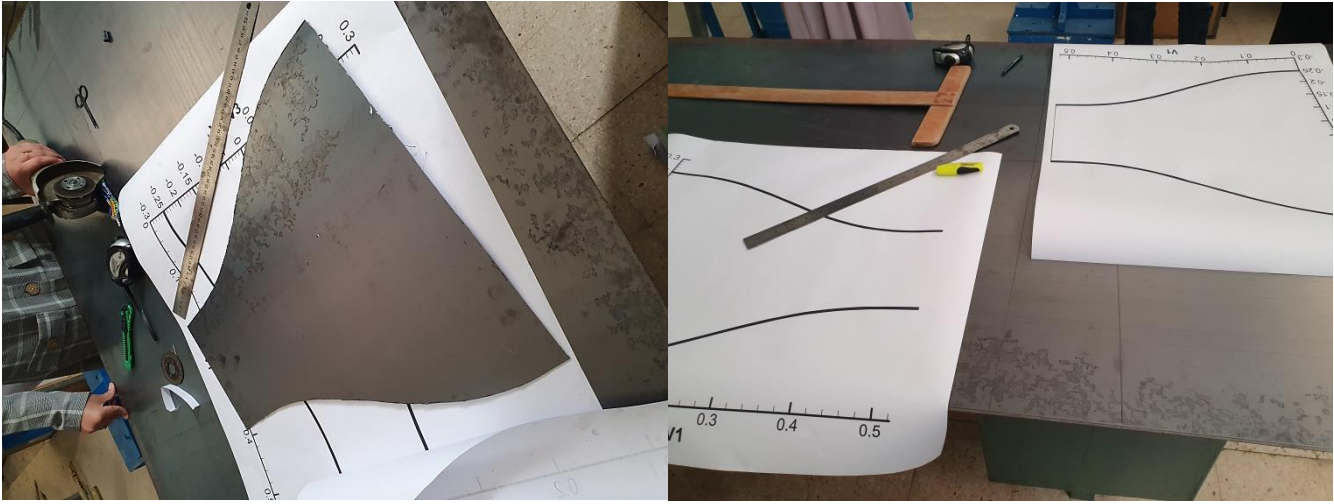
### 3.VI انجاز المتقارب :

المتقارب هو أول جزء قمنا بإنجازه في نفقنا الهوائي، باستخدام برنامج Tecplot تمكنا من رسم شكل المتقارب بأبعاده الحقيقية وطباعته في ورقة A0 كما هو موضح في الشكل (4.VI):



الشكل (4.VI): شكل المتقارب باستخدام برنامج Tecplot

قمنا بقص أربعة أوجه في الورقة الحديدية بواسطة طاحونة القرص كما هو موضح في الشكل (5.VI):



الشكل (5.VI): وجه المتقارب بعد قصه

بعد الحصول على أوجه المتقارب قمنا بإنجاز اطارين لمدخل ومخرج المتقارب بواسطة الحواف الحديدية :



الشكل (6.VI): اطار مدخل ومخرج المتقارب

بعدها قمنا بتركيب أوجه المتقارب داخل الإطار الأول لارتكازه وتحقيق أبعاده الحقيقية .



الشكل (7.VI): تركيب أوجه المتقارب داخل الاطار

من بعد تشكيله حسب هيئته ثلاثية البعد ثم تلحيمة



الشكل (8.VI): شكل المتقارب بعد تلحيمة

وفي الأخير تحصلنا على الشكل النهائي للمتقارب كما هو موضح في الشكل (9.VI):



الشكل (9.VI): الشكل النهائي للمتقارب

#### 4.VI انجاز غرفة الاختبار :

غرفة الاختبار هي العنصر الثاني الذي قمنا بإنجازه في نفقنا الهوائي. حيث تم انجازها بواسطة زجاج بسمك

6mm، تحتوي على 3 أوجه ثابتة ووجه متحرك عبارة عن بوابة تساعدنا في التحكم بإدخال وإخراج الجسم

المراد دراسته. كما هو موضح في الشكل:



الشكل (10.VI): غرفة الاختبار



## 5.VI انجاز الناشر :

هو العنصر الثالث فينققنا، حيث قمنا بقص 4 أوجه بالأبعاد المراد تجسيدها كما هو موضح في الشكل:



الشكل(11.VI):أوجه الناشر

بعد تلحيم أوجه الناشر وتجسيده في هيئة ثلاثية الابعاد تحصلنا على الشكل النهائي كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل(12.VI): الشكل النهائي لناشر

## 6.VI انجاز الرابط :

هو العنصر الذي يربط بين الناشر وقناة المروحة حيث ان مقطع الدخول مربع ومقطع الخروج دائرة، قمنا بتجسيده بواسطة الورقة الحديدية والحواف الحديدية كما هو موضح في الشكل:



الشكل(13.VI):الشكل النهائي للرابط

## 7.VI انجاز قناة المروحة :

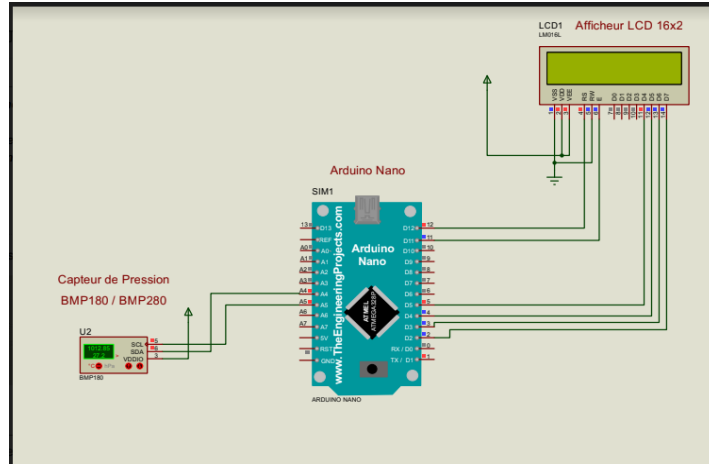
قمنا بلف قطعة من الورقة الحديدية بالأبعاد اللازمة وتلحيمها للحصول على الشكل النهائي:



الشكل(14.VI):الشكل النهائي لقناة المروحة

## 9.VI تركيب لوح الأريونو:

قمنا بربط لوح أريونو ومستشعر لقياس الضغط ودرجة الحرارة والرطوبة كما هو موضح في الشكل  
الشكل(15.VI)



الشكل(15.VI):ربط جهاز الارونو

## 10.VI الشكل النهائي :

بعد انجاز كل عنصر من عناصر النفق على حدى، قمنا بربطهم بواسطة براغي و حلقات و صامولات  
8mm و في الأخير تحصلنا على الشكل النهائي لنفقنا:



الشكل (16.VI): الشكل النهائي

الخاتمة العامة

في البداية كان هدفنا الرئيسي هو تجسيد وإنشاء نفقين هوائيين قابل للانضغاط وغير قابل للانضغاط بالخصائص المذكورة في هذه المذكرة بعد المرور بالطبع على مرحلة التحليل إلا أن الظروف حالت دون ذلك وبالتالي اكتفينا بتجسيد وإنشاء النفق الهوائي الغير قابل للانضغاط وبتوفير وتهيئة المعلومات اللازمة لاستعمالها مستقبلا بهدف إنشاء النفق الهوائي القابل للانضغاط وذلك من خلال استعمال وسيلة المحاكاة العددية لتحليل خصائص الجريان داخل النفقين والتأكد من شروط التصميم.

تم الحصول على شكل هندسي تفصيلي ثلاثي البعد للنفق الهوائي الذي يتكون من ثلاثة عناصر لها مقاطع عرضية مربعة الشكل: المتقارب، غرفة الاختبار والناشر وعنصرين لهما مقاطع عرضية دائرية الشكل: المروحة وأنبوب المروحة بالإضافة إلى رابط وظيفته وصل مخرج الناشر بمدخل أنبوب المروحة وتكييف الشكل الهندسي من مربع إلى دائري.

اختير البرنامج غامبيت كمشكل للشبكات وأنسيس فلوانت كبرنامج يقوم بحل معادلات النقل الواصفة للجريانات و CFD Post كبرنامج معلوماتي لعرض النتائج بشكل جيد، مكننا من الحصول على نتائج جد مرضية لخصائص الجريان تتوافق مع نتائج التصميم وذلك من خلال رسم منحنيات وخرائط خاصة بالسرعة، شدة العصف وكل من الضغط الساكن والضغط الكلي.

بعد عملية تجسيد كل عنصر من عناصر النفق على حدى و ربطهم ببعضهم البعض تم الحصول على مجسم للنفق الهوائي، هدفنا بعد الانشاء هو قياس الضغط الساكن و درجة الحرارة للجسم المراد دراسته في غرفة الاختبار باستعمال جهاز الارديونو و مستشعر خاص.

## قائمة المراجع:

- [1] :Barlow JB.Rae WH, Pope A (1999) Low speed wind tunnel testing. Wiley, New York.
- [2] :Etude expérimentale des profils aérodynamiques dans une soufflerie de laboratoire, BELLIFA Nasreddine, université de Tlemcen,2015.
- [3] :conception de la soufflerie  $M=0.8$  de Tébessa, Khaled DJEDDI et Rachid GATTAL, université de Tébessa ,2004.
- [4] :Catalogue de constructeur de la soufflante « PHYWE-BOSCH-BREITE 10,D37079 GÖTTINGEN ».
- [5] :Mehta R. D., Bradshaw P. Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels Journal of Royal Aeronautical Society 1979, Vol. 73.
- [6]:Prandtl L. Attaining a Steady Stream in Wind Tunnel NACA TM 726, Oct. 1933.
- [7]:Bell J. H., Mehta R. D. Contraction Design for Small Low-Speed Wind TunnelsNASACR-182747, April 1988.