



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الميكانيك العام

تطوير ناشرة قصيرة مدمجة مع حافة حول دوار توربين ريحي

مرسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقات المتجددة

إعداد

م. جواد غازي البعيني

إشراف

د. م. حمزة مكارم

2021م

قرار لجنة الحكم

أ.د.م. علي خلوف

د.م. حمزة مكارم

د.م. ثناء حسن

جزيل الشكر والتقدير إلى الدكتور المهندس حمزة مكارم

على الجهد الكبير في المتابعة والتوجيه، ووافر الاحترام

لشخصه الكريم ...

يقال: "الوجه الأول في حياة الطفل هو الحاسم."

إلى وجهك الذي علمنا بأن الحياة عدد ونغم، إلى يدك التي بها دوماً نتزن، إلى عاطفتك التي تبعث فينا دفناً يكسر جليد أيامنا، إلى دمعك العصي ...

"أمي"

لم يمت أحد تمامًا، تلك أرواح متغيرة الأشكال والمقامات، لم أعتد الكتابة عن الراحلين، لأنّ الفقد يدعو إلى صمت طويل، إلى روحك ومبادئك الباقية فينا.

"أبي"

إلى من أهدتنا صدق اهتمامها، إلى تضحياتك الكثيرة وحبك غير المشروط ...

"خالتي كوكب"

هناك تفاصيل مخبأة، لاتضيع في زحام الذاكرة، إلى إيقاعي الأول ...

"إيهاب"

إلى من عوضتني عن حنان الأخت ...

"تسرين"

إلى طفلنا الداخلي، وأحلامنا الأولى ...

"أيهم، وائل، يزن، لبنى، ديمة، ... وكلّ الأصدقاء"

كلّ الشكر والحبّ

"د.م.خلدون الديب، م.إيمان الشريحي"

إلى كلّ ما أحبّ وما أكره

جواد البعيني

فهرس المحتويات

IV.....	فهرس المحتويات
IX.....	فهرس الجداول
XI.....	فهرس الأشكال
XIX.....	جدول الرموز والمصطلحات
XX.....	الملخص
1.....	المقدمة
2.....	المشكلة العلميّة للبحث:
2.....	أهميّة البحث:
3.....	مسوغات البحث وهدفه:
3.....	خطة البحث:
5.....	الفصل الأول الدراسات المرجعية
6.....	1-1- الدراسة المرجعية الأولى:

9	1-2- الدراسة المرجعية الثانية:
16	1-3- الدراسة المرجعية الثالثة:
19	1-4- الدراسة المرجعية الرابعة:
20	1-5- الدراسة المرجعية الخامسة:
22	1-6- الدراسة المرجعية السادسة:
26	الفصل الثاني الدراسة النظرية
27	تمهيد:
31	2-1- معادلات نافير ستوكس:
33	2-2- الصفات العامة لمعادلات نافير-ستوكس وإمكانات حلها:
41	2-3- دراسة الجريان في الطبقة الحدية:
45	2-4- العلاقات النظرية لدراسة الطبقة الحدية:
45	2-4-1- الطبقة الحدية في الجريان الصفائحي:
49	2-4-2- الطبقة الحدية في الجريان المضطرب:
53	2-5- وصف انفصال الطبقة الحدية :
58	2-6- معادلة الاستمرار:

60 الفصل الثالث الدراسة العددية والحاسوبية

61 - تمهيد:

62 1-3- الطرق العددية لحل معادلات نافير-ستوكس (طريقة العناصر المنتهية):

65 2-3- النموذج الأول:

66 1-2-3- نتائج المحاكاة للنموذج الأول بدون حافة عند سرعة رياح اسمية 3m/s:

67 2-2-3- نتائج المحاكاة للنموذج الأول مع حافة عند سرعة رياح اسمية 3m/s:

68 3-2-3- نتائج المحاكاة للنموذج الأول بدون حافة عند سرعة رياح اسمية 6m/s:

69 4-2-3- نتائج المحاكاة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s:

71 5-2-3- نتائج المحاكاة للنموذج الأول بدون حافة عند سرعة رياح اسمية 8m/s:

72 6-2-3- نتائج المحاكاة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s:

74 3-3- النموذج الثاني:

77 1-3-3- نتائج محاكاة النموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 3m/s:

78 2-3-3- نتائج محاكاة النموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s:

82 3-3-3- نتائج محاكاة النموذج الثاني بدون حافة عند سرعة 6m/s:

83 4-3-3- نتائج محاكاة النموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s:

- 87 3-3-5- نتائج محاكاة النموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 8m/s:
- 88 3-3-6- نتائج محاكاة النموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s:
- 92 الفصل الرابع الدراسة التجريبية
- 93 4-1-1- تصنيع النشرة (النموذج الثاني مع حافة):
- 95 4-2-1- الأنفاق الهوائية (Wind Tunnels):
- 95 4-2-1- النفق الهوائي:
- 96 4-2-2- القياسات المنجزة في مقطع تجارب الأنفاق الهوائية:
- 97 4-3-3- تجربة النفق الهوائي EA 102 الموجود في مركز الاختبارات والأبحاث الصناعية التابع لوزارة الصناعة.
- 97 4-3-1- الغاية من التجربة:
- 97 4-3-2- جهاز التجربة:
- 100 4-4- النتائج التجريبية للنموذج المدروس عند سرعات رياح مختلفة (3,6,8)m/s:
- 102 4-5- النتائج الحاسوبية للنموذج المدروس عند سرعات رياح مختلفة (3,6,8)m/s:
- 104 4-6- مقارنة النتائج بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة رياح اسمية 3m/s:

4-7- مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسمية للرياح تعادل

6m/s 105

4-8- مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسمية للرياح تعادل

8m/s 107

الخاتمة 111

الاستنتاجات 112

المقترحات والتوصيات 113

قائمة المراجع 114

Abstract 121

فهرس الجداول

- الجدول (1-1): (نتائج المحاكاة والزيادة في سرعة الرياح الحاصلة ضمن النشرة) 18
- الجدول (2-1): يوضح المحددات الأساسية لكل نموذج اعتماداً على القطر المتضيق من النشرة D. 22.
- الجدول (3-1): يوضح المحددات الأساسية لعدة أشكال من النموذج C وذلك اعتماداً على القطر المتضيق منه D. 23
- الجدول (1-3): أهم البارامترات والقيم المرجعية وطرق الحل والتقطيع 63
- الجدول (2-3): الشروط الحدية 64
- الجدول (3-3): يبين قيم السرعة وتغير الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع حافة، عند سرعة رياح اسمية 3m/s 80
- الجدول (4-3): يبين قيم السرعة وتغير الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسمية 3m/s 80
- الجدول (5-3): يبين قيم السرعة وتغير الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع حافة، عند سرعة رياح اسمية 6m/s 85
- الجدول (6-3): يبين قيم السرعة وتغير الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسمية 6m/s 85

الجدول (7-3): يبيّن قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع حافة، عند

سرعة رياح اسميّة 8m/s 89

الجدول (8-3): يبيّن قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني بدون حافة، عند

سرعة رياح اسميّة 8m/s 89

الجدول (1-4): خصائص مادة الفايرر غلاس (GRP) 95

الجدول (2-4): يوضّح قيم انخفاض الضغط (pa) وقيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند

سرعات رياح (3,6,8m/s) تجريبياً. 100

الجدول (3-4): يوضّح قيم السرعات (m/s) وانخفاض الضغط (pa) عند السرعات (3,6,8 m/s)

حاسوبياً على طول الناشرة. 102

الجدول (4-4): مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسميّة

للرياح تعادل 3m/s 104

الجدول (5-4): مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسميّة

للرياح تعادل 6m/s 106

الجدول (6-4): مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسميّة

للرياح تعادل 8m/s 107

فهرس الأشكال

- الشكل (1-1): أشكال الناشرات المدروسة. 6.....
- الشكل (2-1): مخططات توزع الضغط في الناشرات الأربع. 7.....
- الشكل (3-1): مخططات لقيم السرعة ضمن الناشرات الأربع. 7.....
- الشكل (4-1): مقارنة بين الخرج الطاقّي لكل من النماذج الأربعة المدروسة في هذه المحاكاة والتوربين التقليدي بدون ناشرة. 8.....
- الشكل (5-1): نموذج ناشرة الرياح المدمجة مع حافة وبدون حافة. 9.....
- الشكل (6-1): مقارنة معدلات التدفق الكتلي بين التوربين بدون ناشرة، توربين مع ناشرة، توربين مع ناشرة وحافة. 9.....
- الشكل (7-1): أبعاد النموذج الأول. 10.....
- الشكل (8-1): مخطط تغيير الضغط ضمن النموذج الأول. 10.....
- الشكل (9-1): مخطط السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الأول. 11.....
- الشكل (10-1): شكل وأبعاد النموذج الثاني. 11.....
- الشكل (11-1): مخطط تغيير الضغط ضمن النموذج الثاني. 12.....
- الشكل (12-1): مخطط السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الثاني. 12.....

- الشكل (13-1): بروفيل السرعة ضمن النموذج الثاني. 13
- الشكل (14-1): أبعاد النموذج الثالث. 13
- الشكل (15-1): مخطط تغير الضغط ضمن النموذج الثالث. 14
- الشكل (16-1): مخطط السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الثالث. 14
- الشكل (17-1): أبعاد النموذج الرابع. 15
- الشكل (18-1): بروفيل السرعة للنموذج الرابع. 15
- الشكل (19-1): الناشرة القصيرة المدمجة مع حافة المدروسة في هذه المحاكاة. 17
- الشكل (20-1): سرعة الرياح ضمن الناشرة المدروسة عند سرعة رياح اسمية 2m/s. 17
- الشكل (21-1): سرعة الرياح ضمن الناشرة المدروسة عند سرعة رياح اسمية 10m/s. 18
- الشكل (22-1): الناشرة المستقيمة مع حافة المدروسة في هذه المحاكاة. 19
- الشكل (23-1): نتائج المحاكاة وقيم السرعة ضمن الناشرة. 19
- الشكل (24-1): شكل الناشرة المدروسة. 21
- الشكل (25-1): مقارنة بين معاملات الطاقة لكل من: توربين بلا ناشرة، توربين مع ناشرة فقط، توربين مع ناشرة وفوهة عند مدخلها. 21
- الشكل (26-1): أشكال النماذج المدروسة. 22
- الشكل (27-1): مقارنة بين معاملات الطاقة للنماذج الأربعة المدروسة وتوربين بدون ناشرة. 23

- الشكل (1-28): مقارنة بين معاملات الطاقة لأشكال النموذج C وتوربين بدون ناشرة. 24
- الشكل (2-1): الجريان الصفائحي والمضطرب حول الجناح الحامل 28
- الشكل (2-2): توزيع السرعة في الطبقة الحدية في حالتي الجريان الصفائحي والمضطرب 30
- الشكل (2-3): توزيع السرعة لجريان كوني بين صفيحتين مستويتين ومتوازيتين في حالة تناقص وتزايد الضغط باتجاه الجريان: $J > 0$ ، الضغط يتناقص باتجاه سرعة الجر U ، $J > 0$ ، الضغط يتزايد باتجاه ويسبب جرياناً عكسياً، $J = 0$ ، تدرج الضغط معدوم. 39
- الشكل (2-4): الجريان في الطبقة الحدية 43
- الشكل (2-5): مقارنة بين الجريان الصفائحي والمضطرب 45
- الشكل (2-6): تولد الجريان المعاكس وتشكل الأثر الذيلي خلف الأسطوانة الشكل (A) الجريان أمام أسطوانة عندما $dpdx \leq 0$ - الشكل (B) الجريان خلف أسطوانة عندما $dpdx \geq 0$ 53
- الشكل (2-7): انفصال الطبقة الحدية وحالات تدرج الضغط 54
- الشكل (2-8): حدوث الانفصال وعلاقته بالتغيرات الفجائية في ميل السطوح الصلبة 57
- الشكل (2-9): الأعاصير المتشكلة واتجاه حركتها بالنسبة للجريان. 57
- الشكل (2-10): توضيح لمصونية الكتلة في معادلة الاستمرار. 59
- الشكل (3-1): شبكة الحجوم الجزئية 62
- الشكل (3-2): الحجم الجزئي Ω 62

- الشكل (3-3): خوارزمية الحل في البرنامج 64
- الشكل (4-3): أبعاد النموذج الأول 65
- الشكل (5-3): شكل النموذج الأول بدون حافة 65
- الشكل (6-3): شكل النموذج الأول مع حافة 66
- الشكل (7-3): تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 3m/s 66
- الشكل (8-3): تدرج السرعة للنموذج الأول بدون حافة عند السرعة 3m/s 67
- الشكل (9-3): تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 3m/s 67
- الشكل (10-3): تدرج السرعة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 3m/s 68
- الشكل (11-3): تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 6m/s 69
- الشكل (12-3): تدرج السرعة في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 6m/s 69
- الشكل (13-3): تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s 70
- الشكل (14-3): تدرج السرعة في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s 70
- الشكل (15-3): تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 8m/s 71
- الشكل (16-3): تدرج السرعة في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 8m/s 72
- الشكل (17-3): تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s 72
- الشكل (18-3): تدرج السرعة في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s 73

- الشكل (3-19): أبعاد النموذج الثاني. 74
- الشكل (3-20): الزوايا التصميمية للناشرة المدروسة (زوايا ميل) 75
- الشكل (3-21): شكل النموذج الثاني مع حافة. 75
- الشكل (3-22): شكل النموذج الثاني بدون حافة 76
- الشكل (3-23): التابع الرياضي الناظم لتدرج انحناء النموذج الثاني. 77
- الشكل (3-24): تدرج الضغط للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 3m/s. 77
- الشكل (3-25): تدرج السرعة للنموذج الثاني بدن حافة عند السرعة 3m/s. 78
- الشكل (3-26): تدرج الضغط للنموذج الثاني مع حافة عن السرعة 3m/s. 78
- الشكل (3-27): تدرج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s. 79
- الشكل (3-28): موقع المحور الذي تم أخذ القراءات الخمس عليه. 79
- الشكل (3-29): مخطط بياني يوضح تغير السرعة على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 3m/s. 81
- الشكل (3-30): مخطط بياني يوضح مقدار انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 3m/s. 81
- الشكل (3-31): تدرج الضغط للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 6m/s. 82
- الشكل (3-32): تدرج السرعة للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 6m/s. 83

- الشكل (3-33): تدرّج الضغط للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s 83
- الشكل (3-34): تدرّج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s 84
- الشكل (3-35): مخطط بياني يوضّح تغير السرعة على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 6m/s 85
- الشكل (3-36): مخطط بياني يوضّح انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 6m/s 86
- الشكل (3-37): تدرّج الضغط للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 8m/s 87
- الشكل (3-38): تدرّج السرعة للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 08m/s 87
- الشكل (3-39): تدرّج الضغط للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s 88
- الشكل (3-40): تدرّج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s 88
- الشكل (3-41): مخطط بياني يوضّح تغيّر السرعة على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 8m/s 90
- الشكل (3-42): مخطط بياني يوضّح مقدار انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 8m/s 90
- الشكل (4-1): قالب الألمنيوم 93
- الشكل (4-2): نموذج الفايبر غلاس 94

- الشكل (3-4): مقطع في النفق الهوائي 96
- الشكل (4-4): النفق الهوائي EA102 99
- الشكل (5-4): أجزاء النفق الهوائي EA102 والأجهزة المستخدمة فيه 99
- الشكل (6-4): مخطط يوضح قيم انخفاض الضغط (pa) على طول الناشرة عند سرعات رياح تجريبيًا (3,6,8m/s) 101
- الشكل (7-4): مخطط يوضح قيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) تجريبيًا 101
- الشكل (8-4): مخطط يوضح قيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) حاسوبيًا 102
- الشكل (9-4): مخطط يوضح قيم انخفاض الضغط (pa) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) حاسوبيًا 103
- الشكل (10-4): مقارنة نتائج السرعة حاسوبيًا وتجريبيًا للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s 104
- الشكل (11-4): مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبيًا وتجريبيًا للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s 105
- الشكل (12-4): مقارنة نتائج السرعة حاسوبيًا وتجريبيًا للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s 106

الشكل (13-4): مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة

106..... 6m/s

الشكل (14-4): مقارنة نتائج السرعة حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s.

108.....

الشكل (15-4): مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة

108..... 8m/s

جدول الرموز والمصطلحات

المصطلح	معناه	الواحدة
ρ	كثافة المائع	kg/m^3
U_{∞}	سرعة التيار الحر بعيداً عن الجسم	m/s
μ	اللزوجة التحريكية	N.s/m ²
τ_w	إجهاد القص الجداري	Pa
P	الضغط	Pa
s	سطح الجناح	m ²
c_d	معامل جر	-
Λ	معامل شكل بروفيلات السرعة	-
c_L	معامل الرفع	-
d	قوة الجر	N
l	قوة الرفع	N
a	سرعة الصوت	m/s
V	سرعة الهواء	m/s
M	عدد ماخ	—
Re	عدد رينولد	—
c	طول الوتر	m
U	سرعة الجريان	m/s
u	سرعة الجريان في الطبقة الحدية	m/s
δ	السماكة	m
δ_1	سماكة الانزياح	m
δ_2	سماكة خسارة تيار الدفع	m
L	طول الناشرة	cm
D	القطر المتضيق من الناشرة	cm
D_{out}	قطر الخروج	cm
α	زاوية انفراج الناشرة	degree
C_p, C_w	معامل الطاقة	-
U_0	السرعة الاسمية للهواء	m/s
w	السرعة الزاوية	rad/s
r	نصف قطر الدوار الريحي	m
div	مؤثر تفاضلي (تباعد)	-
grad	مؤثر تفاضلي (تدرج)	-

الملخص

تمّ في هذا البحث إجراء دراسة مرجعية لتصميم ناشرة قصيرة مدمجة مع حافة، كما تمّ تصميم نموذجين لناشرة قصيرة مدمجة مع وبدون حافة، وإجراء المحاكاة الحاسوبية على كلّ منهما عند ثلاث سرعات للرياح (3,6,8)m/s، ثم تمّت المفاضلة بينهما واعتماد النموذج الأفضل تصميمياً، وإظهار قيم السرعة وانخفاض الضغط ضمنه في خمس نقاط موزّعة على طوله، وذلك لتبيان أثر الحافة وشكل النموذج على زيادة السرعة ضمن النموذج (الناشرة)، ثم تمّ تصنيع النموذج الأفضل، وإجراء التجارب العملية عليه في نفق ريحي، وإيجاد القيم التجريبية لكلّ من السرعة وانخفاض الضغط على طول النموذج أيضاً، والمقارنة بين النتائج الحاسوبية والتجريبية.

الكلمات المفتاحية: ناشرة، حافة، سرعة رياح، انخفاض الضغط.

المقدمة

استغلَّ الإنسان منذ القدم طاقة الرياح في العديد من المجالات، ومن أشهر الاستخدامات القديمة لطاقة الرياح هي دفع السفن الشراعية، وطحن الحبوب عن طريق طواحين الهواء، حيث كان يتم تحويل طاقة الرياح إلى طاقة ميكانيكية لتدوير الطواحين ومضخات الرياح التي كانت تُستعمل لضخ المياه أيضاً، أما بعد اكتشاف الاستخدامات المتعددة للوقود الأحفوري، واكتشاف المصار المترتبة عليه، وخوفاً من نضوبه أيضاً، فإنَّ العالم أصبح مهتماً بطاقة الرياح بشكل أكبر من قبل، وذلك لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الرياح، ولكنَّ المعوق الأساسي أمام استثمار طاقة الرياح وانتشارها على نطاق جغرافي واسع تكمن في ضرورة اختيار أماكن تتحقَّق فيها سرعات رياح مناسبة لأنَّ كمية الطاقة المستخلصة من الرياح تتناسب بشكل طردي مع مكعب سرعة الرياح، وهذا يعني أنَّ الزيادة الطفيفة في سرعة الرياح تؤدي إلى زيادة كبيرة في الخرج الطاقوي والعكس صحيح، بناءً على ذلك أُجريت الأبحاث على أنواع عديدة من الناشرات لزيادة سرعة الرياح والوصول إلى خرج طاقي جيّد عند سرعات رياح منخفضة، ولكي يكون ذلك ممكناً يجب ان يكون مقطع خروج الرياح من الناشرة أكبر من مقطع الدخول إليها، وعندما تتدفق الرياح عبر الناشرة فإنَّها تنتقل على طول الناشرة مما يتسبب في خروج الرياح منها مشكلة دوامات تؤدي إلى توليد منطقة ضغط منخفض خلف الناشرة حيث يعمل فرق الضغط بين مدخلها ومخرجها على تسريع الرياح ضمنها، مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في السرعة. إذا تمَّ التعديل على الناشرة كإضافة حافة عند مقطع الخروج فإنَّ أثرها الإيجابي على زيادة الخرج الطاقوي سيكون أكبر لأنَّها

ستتشكل لدينا دَوّامات أقوى وفرق ضغط أكبر بين مدخلها ومخرجها مقارنةً بالناشرة العادية بدون حافة، ونتيجة لذلك تستطيع الرياح الوصول إلى سرعات أعلى ضمن الناشرة المُعدّلة، يضاف إلى ذلك أهمية شكل مدخل الناشرة الذي يجب أن يكون مُقوّم للجريان بغية الاستفادة من طاقة الرياح بالشكل الأمثل، وبالتالي استثمارها على أوسع نطاق لتحقيق التنمية المستدامة.

المشكلة العلميّة للبحث:

إنّ الاستطاعة الناتجة عن التوربينات الريحيّة التقليديّة تعتمد على سرعة الرياح الواردة، وطول ريشة التوربين، لذلك عند الحاجة إلى خرج طاقي بقيمة عالية وعند سرعة رياح منخفضة، يلزمنا توربينات بأبعاد هندسيّة كبيرة مما يزيد من التكلفة الاقتصادية وارتفاع نسبة الضجيج، مما دفع الباحثين لتصميم نماذج مختلفة ودراساتها لمعالجة السلبيات آنفة الذكر.

أهميّة البحث:

رفع كفاءة التوربينات الريحيّة نتيجة لزيادة السرعة في منطقة الدوّار الريحي لتوربين مغطى بناشرة قصيرة مدمجة مع حافة، وبالتالي إمكانية توليد الطاقة نفسها عند سرعات رياح منخفضة، التي يمكن أن تنتج عن التوربينات التقليديّة عند سرعة الرياح الواردة نفسها، ولكن باستخدام توربينات ذات قطر دَوّار أصغر. إنّ عدم حدوث تغيّر مفاجئ بالمقطع ضمن الناشرة القصيرة المدمجة يؤدّي إلى

تأخير ظاهرة الانفصال وذلك نتيجةً لصغر زاوية الانفراج في هذا التصميم مقارنةً بالناشر الطويلة المستخدمة سابقاً.

مسوغات البحث وهدفه:

إيجاد التصميم المناسب لناشرة قصيرة مع حافة لزيادة سرعة الرياح في المنطقة حول الدوار الريحي وبالتالي الحصول على استطاعة أعلى عند استخدام توربين مغطى بناشرة مدمجة مع حافة، مقارنةً بتوربين تقليدي له نفس الأبعاد وعند نفس سرعة الرياح الواردة إلى الدوار مما يؤدي إلى الاستفادة من طاقة الرياح بشكل أوسع وكفاءة أعلى.

خطة البحث:

- الإطلاع على دراسات مرجعية عن تصميم الناشرات، بالإضافة إلى دراسة نظرية لقوانين فيزيائية ومبادئها في ميكانيك الموائع عن علاقة الضغط بالسرعة، انفصال الجريان وآثاره السلبية، وغيرها من الظواهر الفيزيائية المتعلقة بموضوع البحث.

- تصميم ناشرة قصيرة مدمجة (مع وبدون حافة) واختيار أبعادها وزواياها على أحد برامج

التصميم الهندسي، وإيجاد التابع الرياضي الناظم لتدرج انحناءتها.

- إجراء المحاكاة الحاسوبية على الناشرة (مع وبدون حافة) على برنامج ANSYS عند ثلاث سرعات $(3,6,8)\text{m/s}$ ، وسيتم في هذا البحث عرض النتائج لنموذجين من الناشرات (الأسوأ تصميمياً، والأفضل تصميمياً).

- تصنيع النموذج الأفضل لاختباره تجريبياً ضمن نفق ريحي.

- إيجاد قيم السرعات وانخفاض الضغط الحاصلين ضمن النموذج الأفضل تجريبياً.

- مقارنة النتائج الحاسوبية مع النتائج التجريبية للنموذج الأفضل تصميمياً.

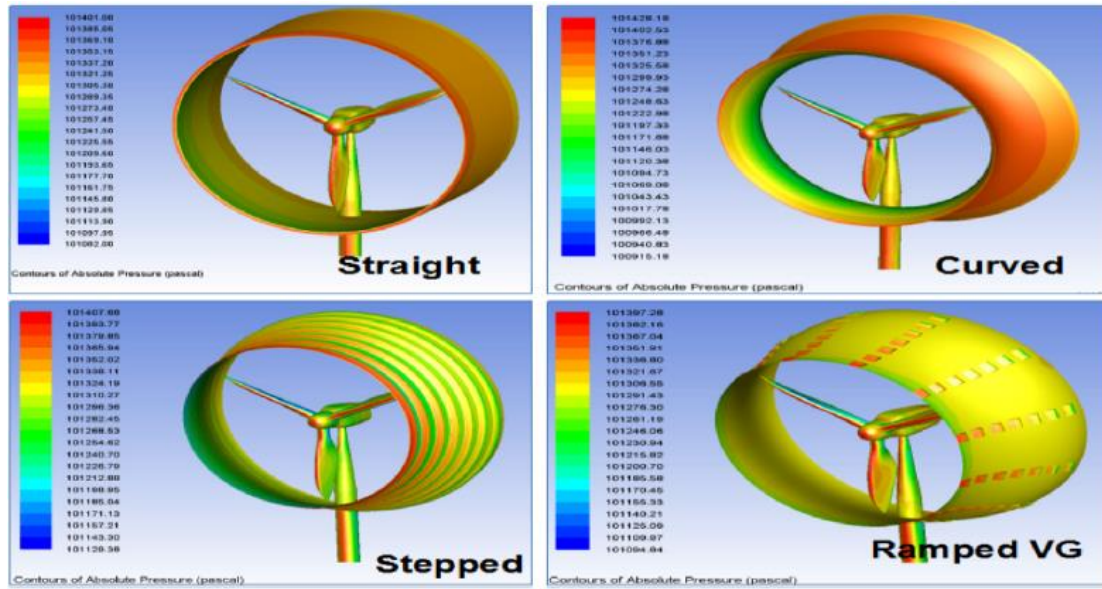
الفصل الأول

الدراسات المرجعية

1-1- الدراسة المرجعية الأولى: [32]

(k.Prasad, V.Kumar, G.Swaminathan, G.Loganathan, Comutational investigation and design optimization of a duct augmented wind turbine (DAWT): ELSEVIER, Volume 22, Issue 3, India, 2020, pp.1186-1191.)

في هذه الدراسة قام الباحثون في الهند في عام 2020 بدراسة أربعة نماذج من الناشرات ومحاكاتها حاسوبياً لمعرفة توزع الضغط والزيادة الحاصلة في السرعة ضمن الناشرات المدروسة. الموضحة في الشكل أدناه، حيث يوضح الشكل (1-1) أشكال الناشرات المدروسة.

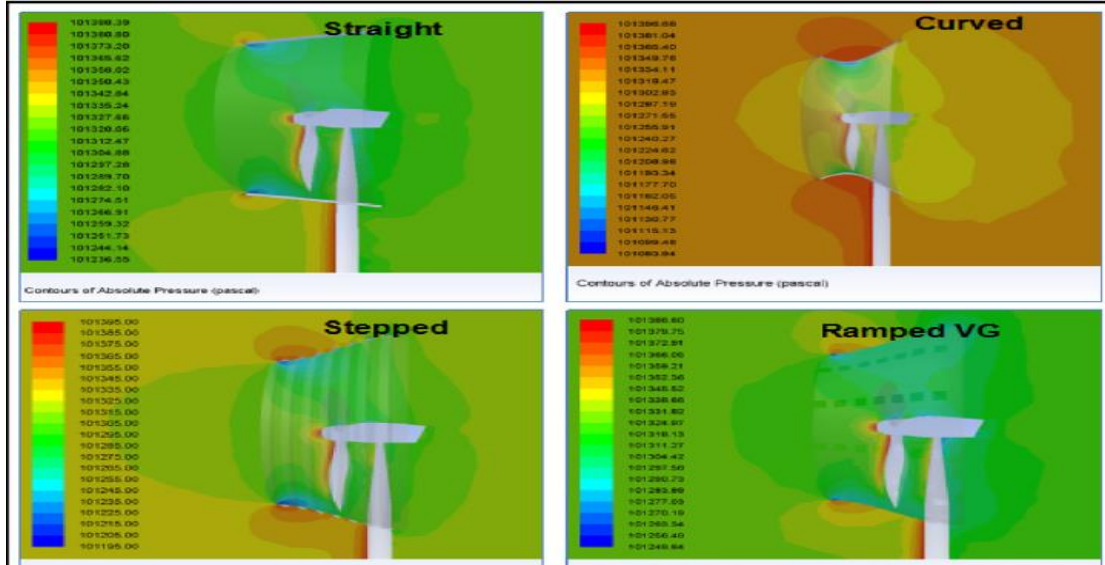


الشكل (1-1): أشكال الناشرات المدروسة.

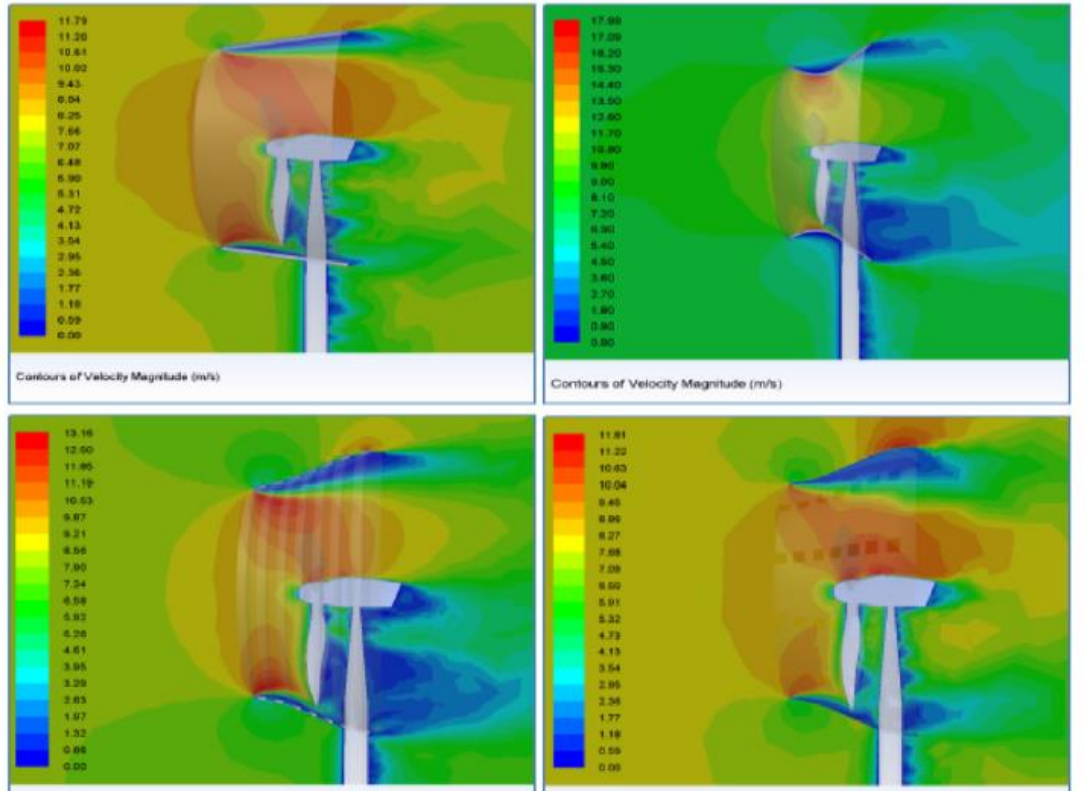
تمت المحاكاة على النماذج الأربعة السابقة فكانت نتائج الضغط والسرعة كما هو موضح

بالشكل (2-1) و (3-1) حيث يحدد كل منهما مخططات توزيع الضغط و قيم السرعة في الناشرات

الأربع على التوالي.



الشكل (2-1): مخططات توزيع الضغط في الناشرات الأربع.



الشكل (3-1): مخططات لقيم السرعة ضمن الناشرات الأربع.

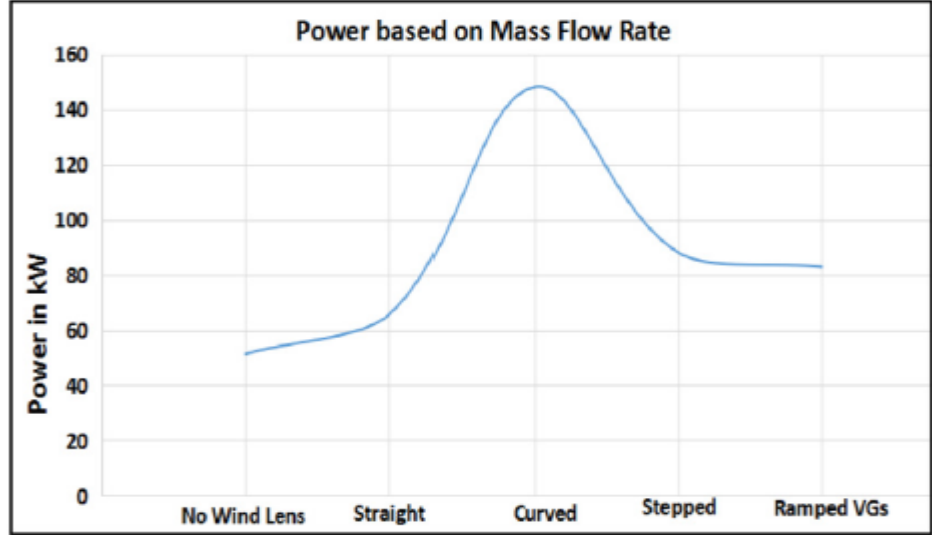
بيّنت هذه الدراسة أن توزيع الضغط ضمن الناشرة ذات الانحناء (Curved) هو الأفضل مقارنةً

بالنماذج الثلاثة الأخرى، وبالتالي حققت هذه الناشرة زيادة في السرعة بمقدار أكبر من النماذج الثلاثة

الأخرى، حيث وصلت السرعة ضمن هذه الناشرة إلى 14m/s بينما لم تتجاوز السرعة في باقي

النماذج أكثر من 12m/s عند سرعة رياح اسمية تعادل 8m/s. يوضح الشكل (4-1) مقارنة بين الخرج

الطاقة لكل من النماذج الأربعة المدروسة في هذه المحاكاة والتوربين التقليدي بدون ناشرة.



الشكل (4-1): مقارنة بين الخرج الطاقة لكل من النماذج الأربعة المدروسة في هذه المحاكاة والتوربين التقليدي بدون ناشرة.

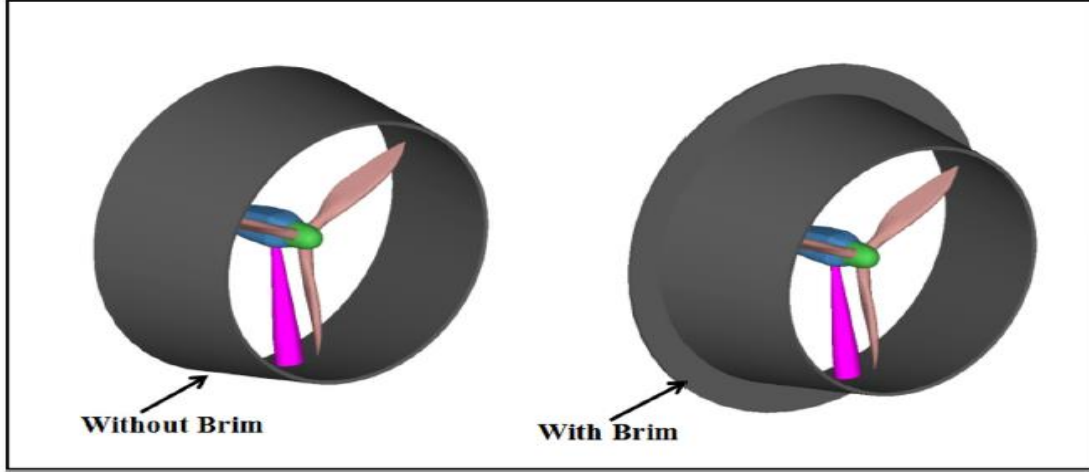
وأوضحت الدراسة أيضًا أنّ للحافة المضافة عند مقطع الخروج في الناشرة (curved) أثر

بزيادة معدل التدفق الكتلي بمقدار 26% مما يؤدي إلى زيادة كمية الطاقة الناتجة عنها مقارنة بنفس

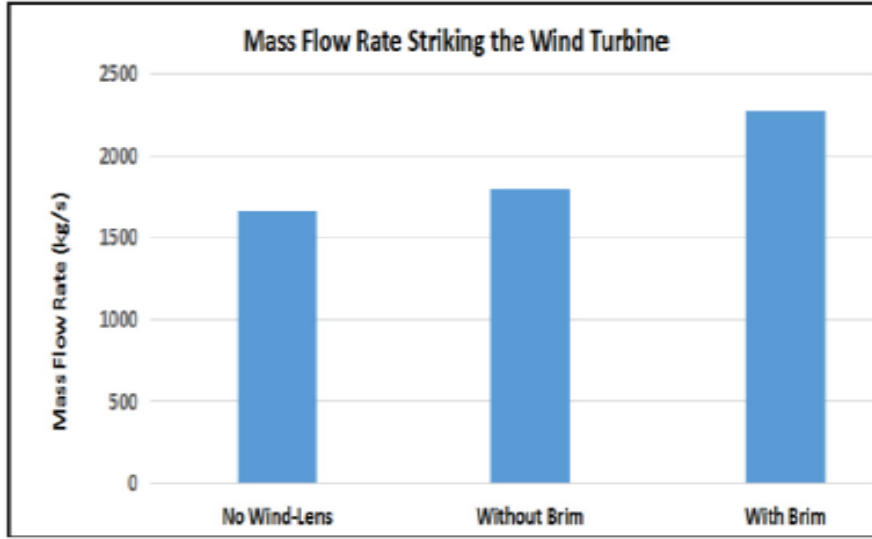
النموذج بدون حافة.

يبين الشكل (5-1) نموذج ناشرة الرياح المدمجة مع حافة وبدون حافة. ويبين الشكل (6-1)

مقارنة معدلات التدفق الكتلي بين التوربين بدون ناشرة، توربين مع ناشرة، توربين مع ناشرة وحافة.



الشكل (5-1): نموذج ناشرة الرياح المدمجة مع حافة وبدون حافة.



الشكل (6-1): مقارنة معدلات التدفق الكتلي بين التوربين بدون ناشرة، توربين مع ناشرة، توربين مع ناشرة وحافة.

1-2- الدراسة المرجعية الثانية: [33]

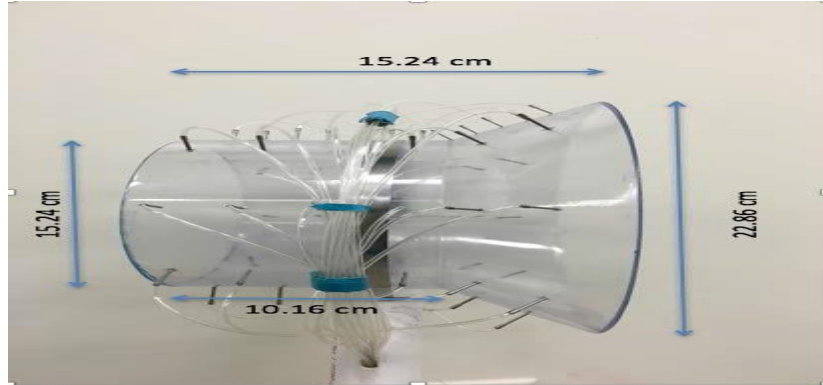
(Scheuerman, Jonathan P.(2017). WIND FLOW THROUGH SHROUDED WIND TURBINES.Masterthesis.NAVALPOSTGRADUATESCHOOL,MONTEREY,CALIFORNIA.)

تمّت هذه الدراسة في كاليفورنيا في عام 2017، قام الباحث بدراسة تجريبية لأربعة نماذج من

الناشرات، لمعرفة مقدار الزيادة في السرعة الناتجة عن كلّ منها وتوزّع الضغط ضمنها، وذلك لاعتماد

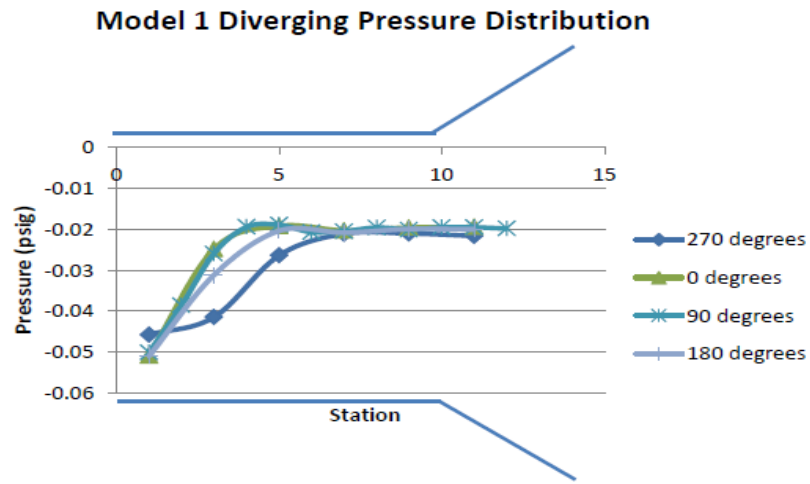
النموذج الأمثل، حيث تمّت الدراسات عند سرعة رياح اسمية تساوي 14m/s.

أظهر الباحث النموذج الأول في الشكل (7-1) مع أبعاده.



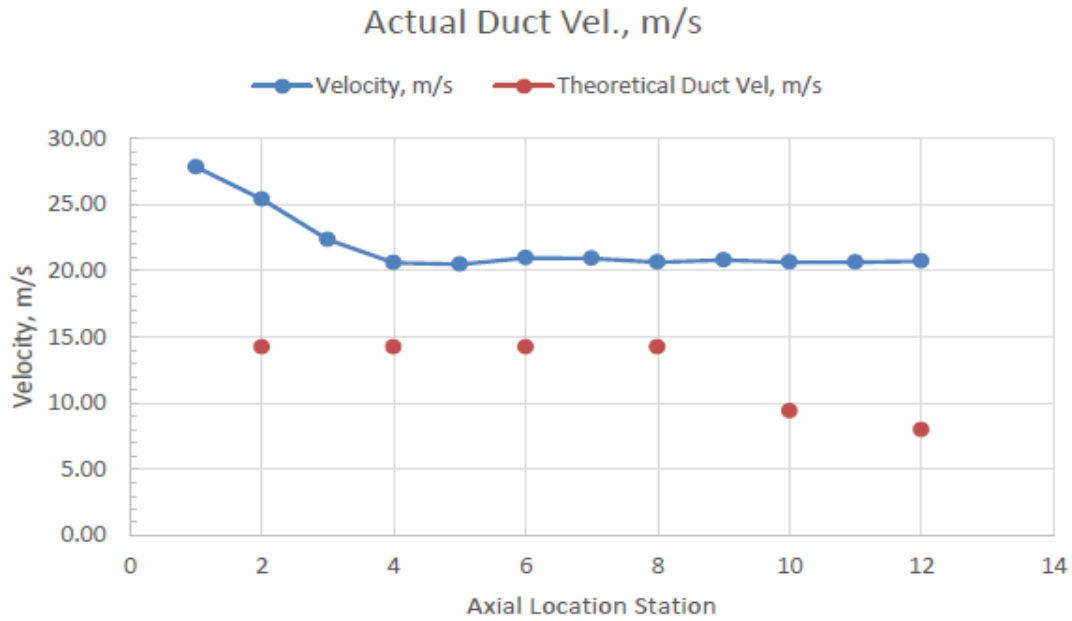
الشكل (7-1): أبعاد النموذج الأول.

بين الباحث مخطط تغير الضغط ضمن النموذج الأول في الشكل (8-1).



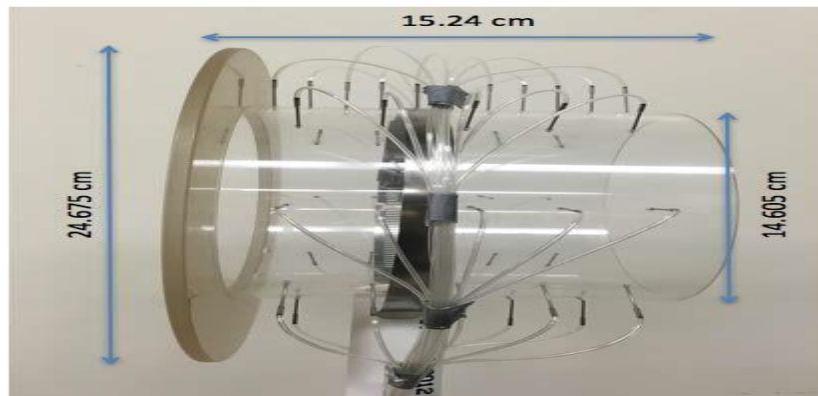
الشكل (8-1): مخطط تغير الضغط ضمن النموذج الأول.

في الشكل (9-1) تم توضيح مخطط السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الأول.



الشكل (9-1): مخطط السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الأول.

بين الباحث أن التغيّر المفاجئ بمقطع النموذج الأول أدى إلى حدوث تدفق مضطرب غير مرغوب فيه ضمن الناشرة، وأدت زيادة زاوية الانفراج حتى 39.9° عند مقطع الخروج إلى حدوث انفصال في الجريان ، لذا لم يتم الحصول على الفوائد المرجوة من طول الناشرة وتباعد مقطعيها. حيث شكل وأبعاد النموذج الثاني موضحة في الشكل (10-1).

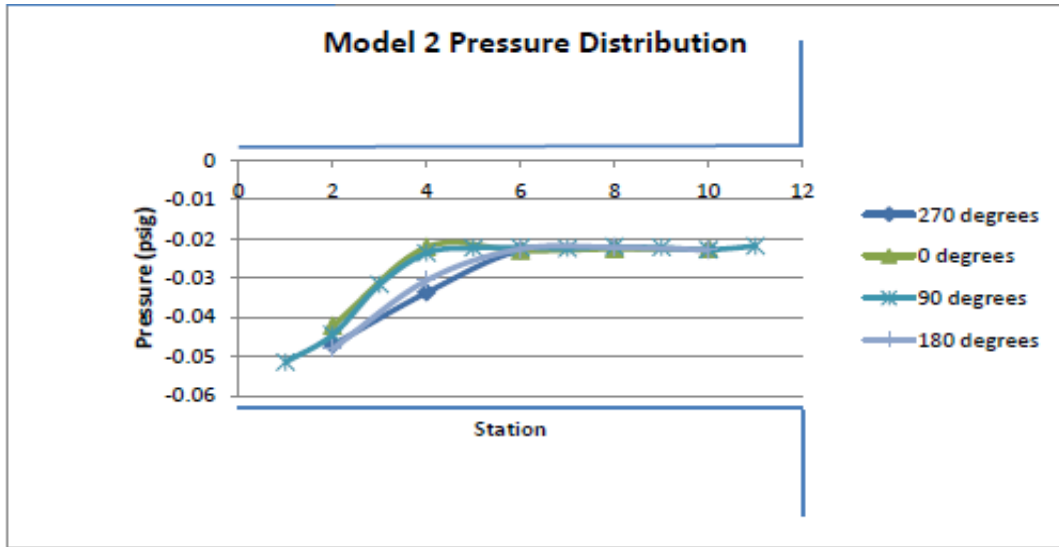


الشكل (10-1): شكل وأبعاد النموذج الثاني.

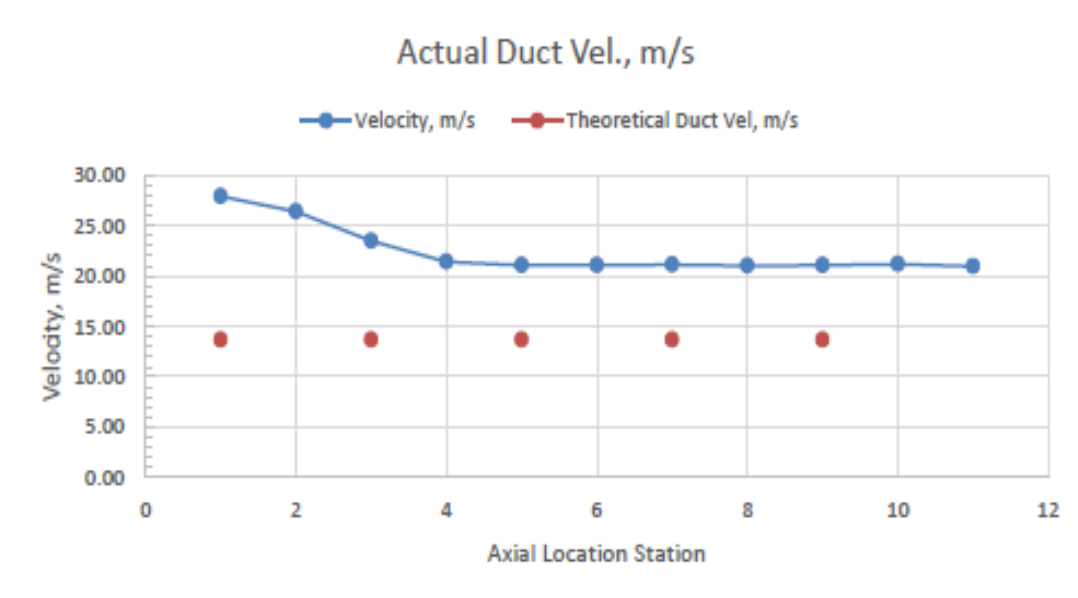
وضّحت الدراسة مخطط تغير الضغط ضمن النموذج الثاني في الشكل (11-1)، كما وضّحت

مخطط كل من السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الثاني في الشكل (12-1). بالإضافة إلى

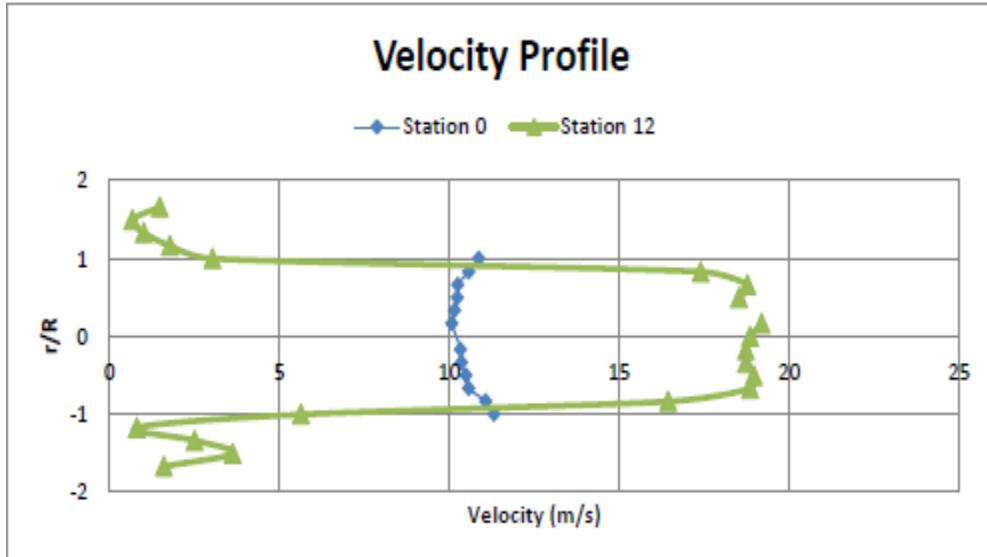
بروفيل السرعة ضمن النموذج الثاني الموضح بالشكل (13-1).



الشكل (11-1): مخطط تغير الضغط ضمن النموذج الثاني.



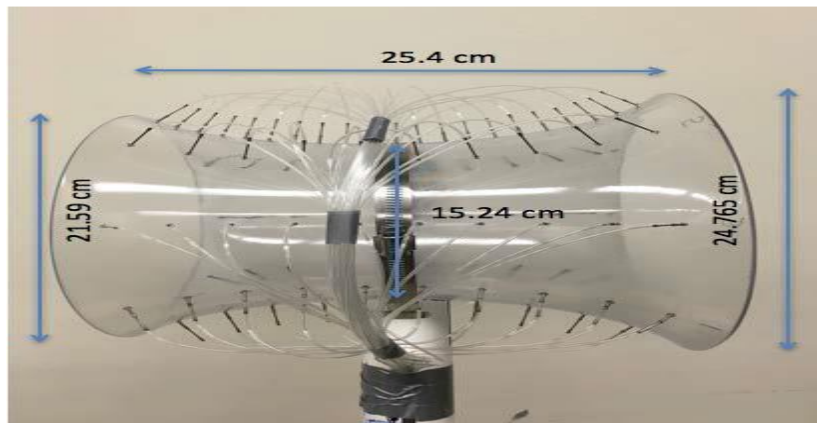
الشكل (12-1): مخطط السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الثاني.



الشكل (13-1): بروفيل السرعة ضمن النموذج الثاني.

لوحظ أنّ لاستخدام الحافة في هذا النموذج أثر إيجابي على زيادة السرعة، ولم تؤثر بشكل سلبي في الجريان ضمن الناشرة، ولكنها أدت إلى انسداد بقيمة 14% عند مقطع الخروج وهذا يتجاوز الحدود المسموح بها، لذا يجب تصميم الحافة بطريقة دقيقة.

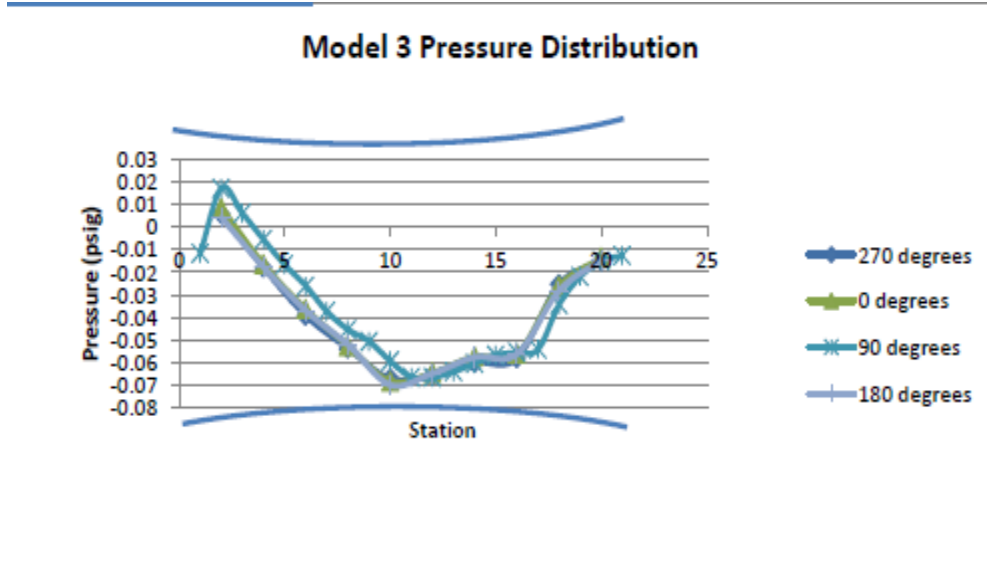
وضّح الباحث شكل وأبعاد النموذج الثالث في الشكل (14-1).



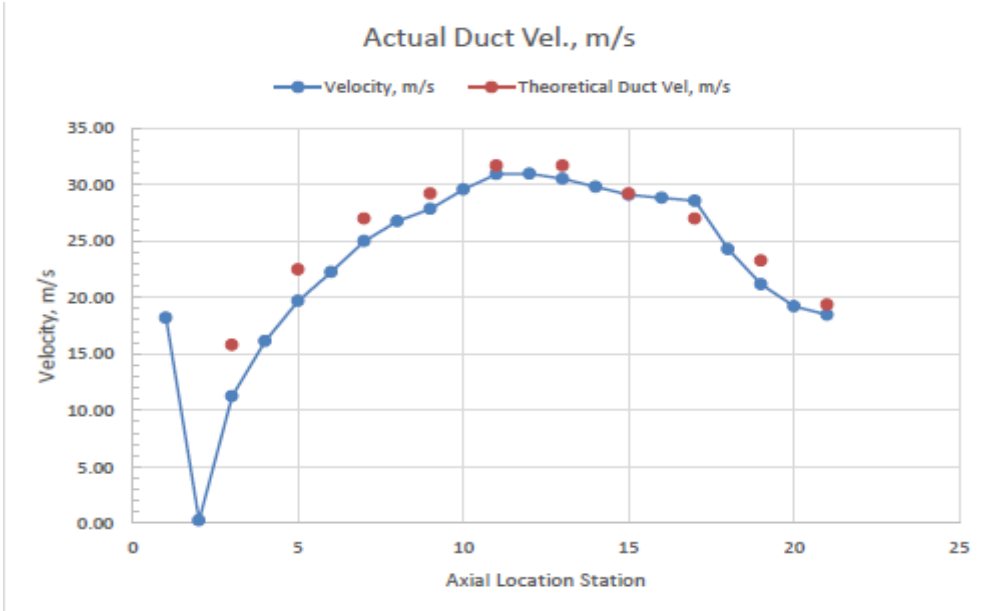
الشكل (14-1): أبعاد النموذج الثالث.

يبين الشكل (15-1) مخطط تغير الضغط ضمن النموذج الثالث. بينما يبين الشكل (16-1)

مخطط كل من السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الثالث.



الشكل (15-1): مخطط تغير الضغط ضمن النموذج الثالث.



الشكل (16-1): مخطط السرعة النظرية والتجريبية ضمن النموذج الثالث.

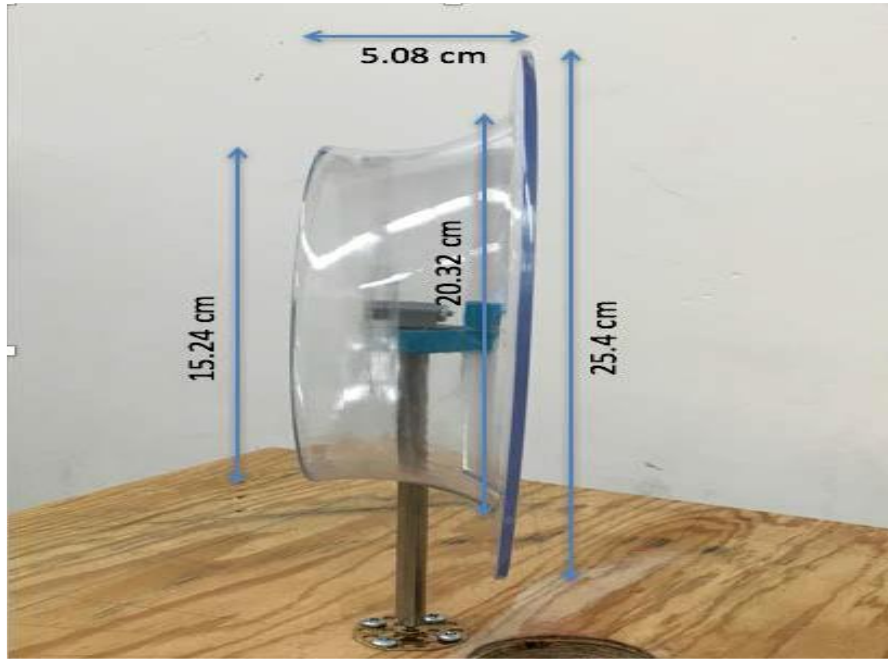
بين الباحث أن هذا النموذج سرّع التدفق تدريجياً ضمن النافذة، ووصلت قيمة السرعة ضمنها

إلى 30m/s ثم تباطأ التدفق تدريجياً حتى مقطع الخروج، لكنّه غير قابل للتطبيق في الحياة العملية،

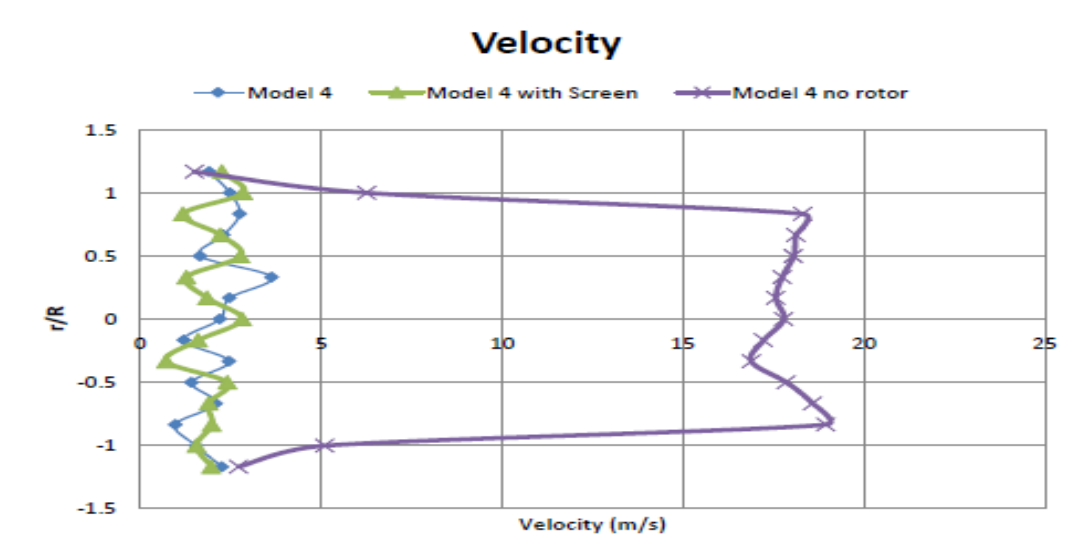
حيث أنّ طول الناشرة يساوي 1.66 مرّة من قطرها الداخلي، فإذا كان طول ريشة التوربين الريحي 35.34m فإننا بحاجة لقناة يبلغ طولها 117.348m.

نلاحظ من الشكل (17-1) أبعاد وشكل النموذج الرابع. تم توضيح بروفيل السرعة للنموذج

الرابع في الشكل (18-1).



الشكل (17-1): أبعاد النموذج الرابع.



الشكل (18-1): بروفيل السرعة للنموذج الرابع.

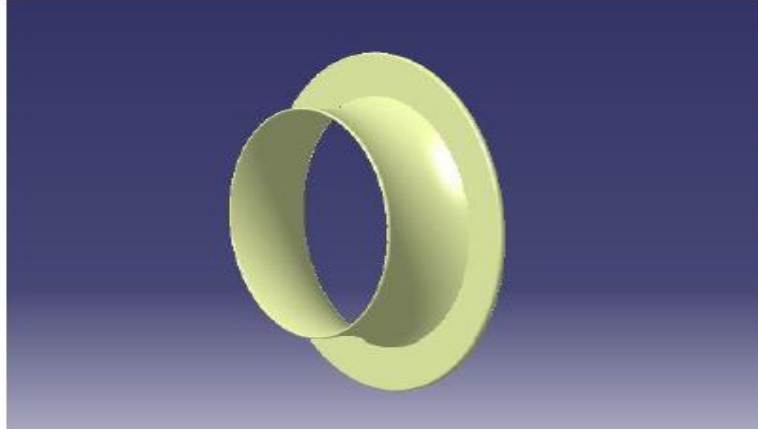
لاحظ الباحث في هذا النموذج الذي يبلغ طوله 5.08cm، أن السرعة تزداد من القيمة 14m/s إلى القيمة 18m/s عند المدخل، وتناقصت السرعة عند المخرج إلى 3m/s، هذه الزيادة يمكن أن تؤدي إلى نتائج جيدة في إنتاج الطاقة من التوربينات الريحية لأن طاقة التوربين تتناسب طرديًا مع مكعب السرعة، لذا أوصت هذه الدراسة باستخدام النموذج الرابع مع التوربينات الريحية وذلك لأن زيادة السرعة الحاصلة في هذا النموذج بالنسبة إلى طول الناشرة المستخدمة فيه أفضل بكثير مقارنةً مع النماذج الثلاثة الأخرى المدروسة في هذا البحث.

1-3- الدراسة المرجعية الثالثة: [34]

(Ambika G, Manohar L, Bharath B, Anurag C, Sampath N, CFD Simulation of Wind-Lens at Different Velocities: International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, Volume 3, Issue 2, India, 2017, pp.792-795.)

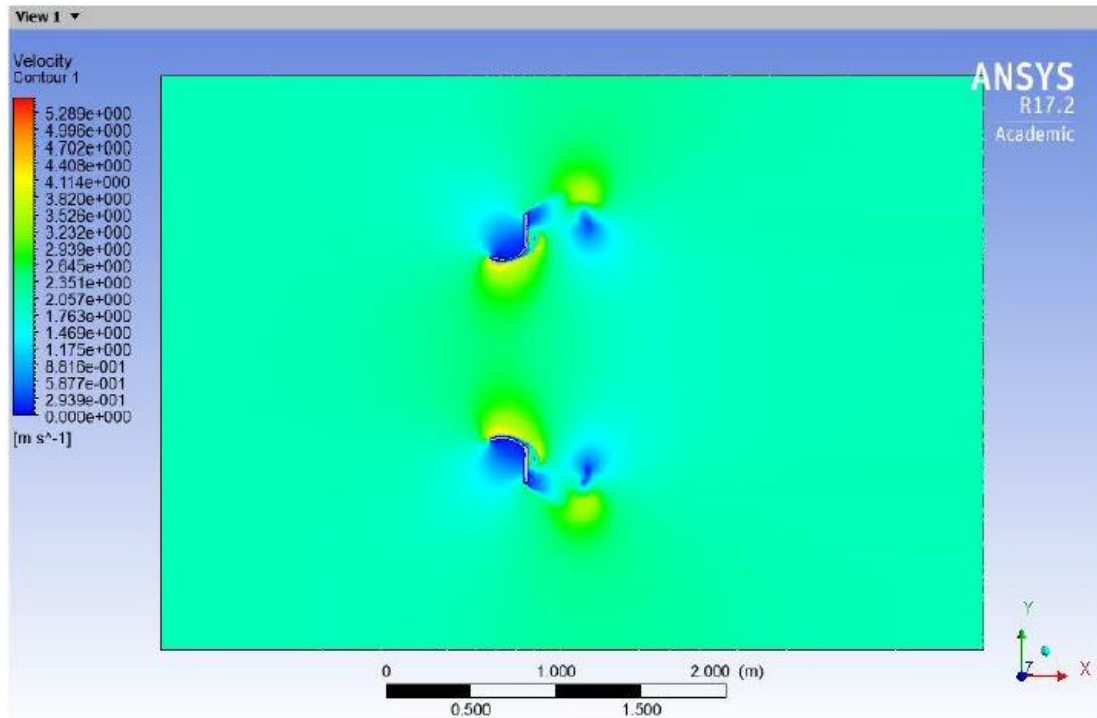
قام الباحثون في هذه الدراسة بإجراء المحاكاة الحاسوبية على نموذج ناشرة قصيرة مدمجة مع حافة.

حيث يوضح الشكل (19-1) شكل الناشرة القصيرة المدمجة مع حافة المدروسة في هذه المحاكاة.

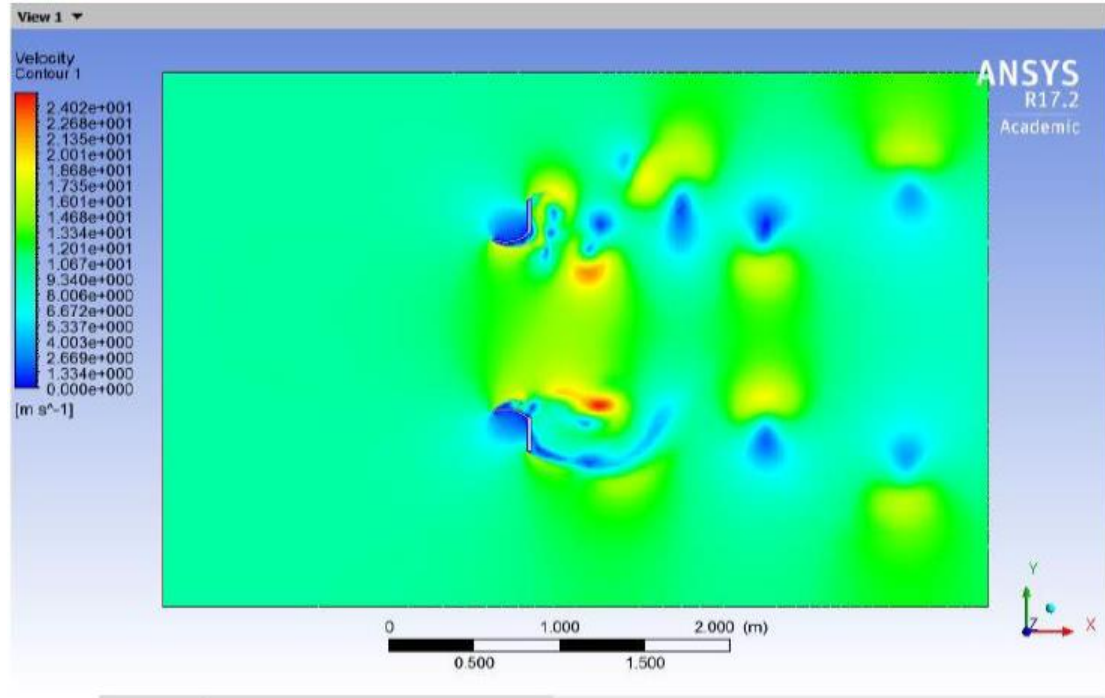


الشكل (19-1): الناشرة القصيرة المدمجة مع حافة المدروسة في هذه المحاكاة.

وتمّت المحاكاة عند قيم سرعات رياح مختلفة، وذلك لمعرفة دور الناشرة وأثر الحافة المضافة لها عند مقطع الخروج على زيادة سرعة الرياح ضمن الناشرة، وكانت نتائج المحاكاة كما هو موضح في الأشكال (20-1) و (21-1) الذين يوضحان سرعة الرياح ضمن الناشرة المدروسة عن سرعتي الرياح الاسميتين 2 m/s و 10 m/s على التوالي.



الشكل (20-1): سرعة الرياح ضمن الناشرة المدروسة عند سرعة رياح اسمية 2m/s.



الشكل (21-1): سرعة الرياح ضمن الناشرة المدروسة عند سرعة رياح اسمية 10m/s.

يبين الجدول (1-1) نتائج المحاكاة والزيادة في سرعة الرياح الحاصلة ضمن الناشرة.

الجدول (1-1): (نتائج المحاكاة والزيادة في سرعة الرياح الحاصلة ضمن الناشرة)

Free stream velocity m/s	Throat velocity m/s	Increase in velocity
2	3.42	1.42
4	6.63	2.63
6	10.67	4.67
8	13.96	5.96
10	18.68	8.68

خلصت هذه الدراسة إلى أنَّ استخدام هذا النوع من الناشرات يؤدي إلى زيادة في سرعة الرياح

ضمن الناشرة بنسبة تتراوح بين 62% إلى 75% من قيمة سرعة الرياح الاسميّة الواردة إلى الناشرة،

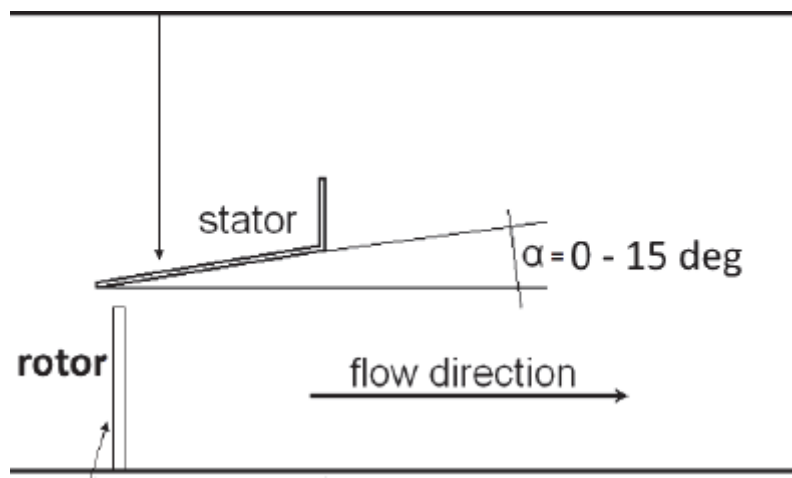
وهذه الزيادة تتناسب طرديًا مع قيمة سرعة الرياح الواردة إلى الناشرة.

1-4- الدراسة المرجعية الرابعة: [35]

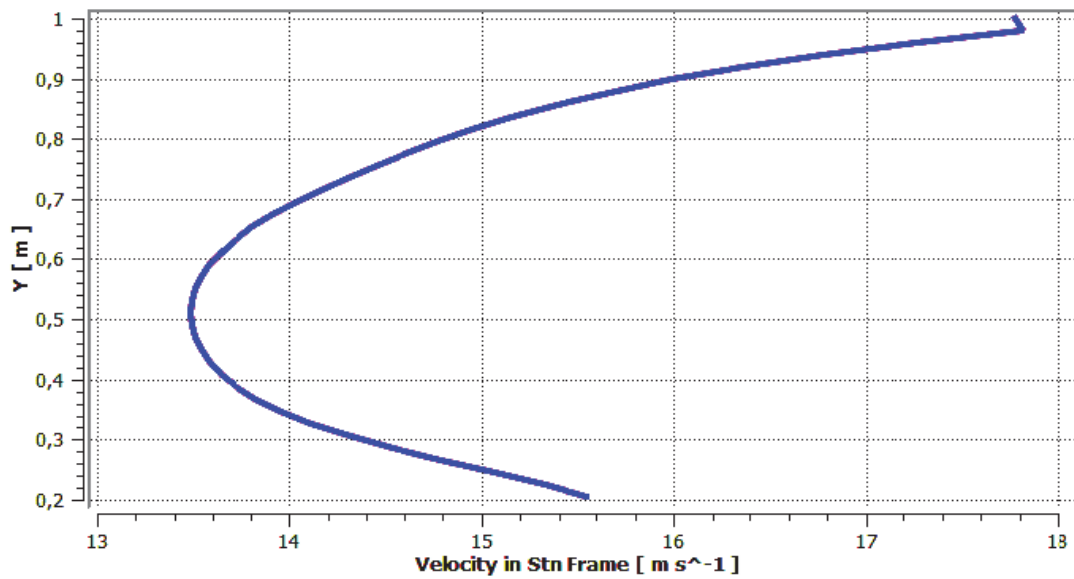
(Jakub B, Krzysztof D, Krzysztof K, Marcin K, Krzysztof S, Analysis approach for a diffuser augmented small wind turbine rotor, Poland, 2015.)

قام الباحثون بإجراء المحاكاة الحاسوبية على الناشرة الموضحة في الشكل (22-1) الذي يمثل

الناشرة المستقيمة مع حافة المدروسة في هذه المحاكاة.



الشكل (22-1): الناشرة المستقيمة مع حافة المدروسة في هذه المحاكاة.



الشكل (23-1): نتائج المحاكاة وقيم السرعة ضمن الناشرة.

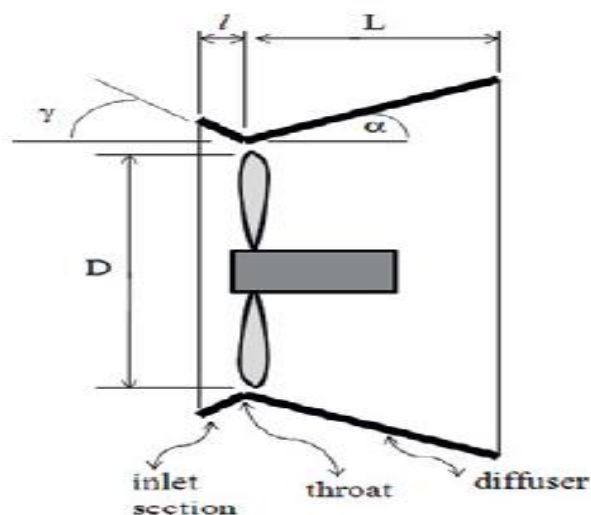
تبين من نتائج المحاكاة؛ لوحظ أنّ سرعة الرياح ضمن الناشرة ازدادت من القيمة 12m/s إلى القيمة 18m/s، لذا خلصت هذه الدراسة إلى أنّ الزيادة في سرعة الرياح الناتجة عن استخدام الناشرة المستقيمة مع حافة تعادل 50% من قيمة سرعة الرياح الواردة إليها، لوحظت هذه الزيادة عند أطراف شفرات التوربين الريحي المركّب ضمنها كما هو موضح في الشكل (1-23) الذي يبين نتائج المحاكاة وقيم السرعة ضمن الناشرة.

1-5- الدراسة المرجعية الخامسة: [36]

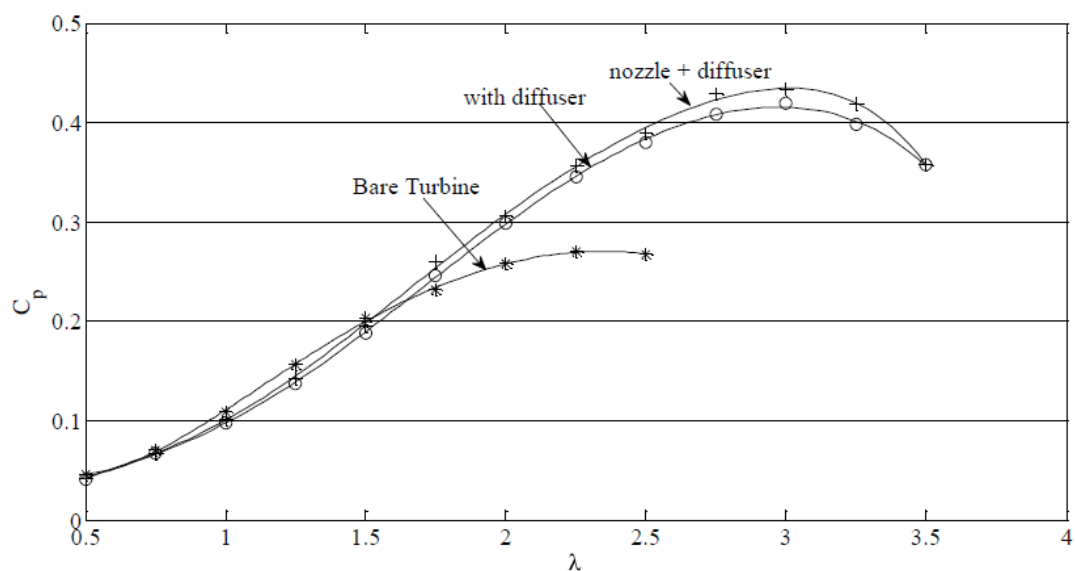
(Buyung K, Andrea T, Experimental study of shrouded micro-wind turbine: ELSEVIER, Volume 49, Issue 5, *Australia*, 2012, pp.92-98.)

قام الباحثون بدراسة تجريبية لناشرة قصيرة مع فوهة وذلك لإظهار أثر شكل الفوهة عند مدخل الناشرة على الزيادة في معامل الطاقة، وتمّ استخدام الناشرة الموضح شكلها وأبعادها في الشكل (1-24) والتي لها الأبعاد التالية:

$$L= 7.44\text{cm}, D= 12\text{cm}, D_{\text{out}}= 19.32\text{cm}, \alpha=12^{\circ}$$



الشكل (24-1): شكل الناشرة المدروسة.



الشكل (25-1): مقارنة بين معاملات الطاقة لكل من: توربين بلا ناشرة، توربين مع ناشرة فقط، توربين مع ناشرة وفوهة عند

مدخلها.

خلصت هذه الدراسة إلى أنَّ الزيادة في معامل الأداء عند استخدام ناشرة فقط تعادل 60%،

وعند استخدام ناشرة ذات فوهة عند المدخل تعادل 63%، مقارنة بتوربين تقليدي بدون ناشرة والزيادة في

معدل معامل سرعة الطرف عند استخدام ناشرة ذات فوهة تعادل 33% وذلك مقارنةً بمعامل سرعة

الطرف لتوربين ريحي تقليدي بدون ناشرة. حيث وضّحت هذه النتائج في الشكل (25-1) الذي يعبر عن

مقارنة بين معاملات الطاقة لكل من: توربين بلا ناشرة، توربين مع ناشرة فقط، توربين مع ناشرة وفوهة عند مدخلها.

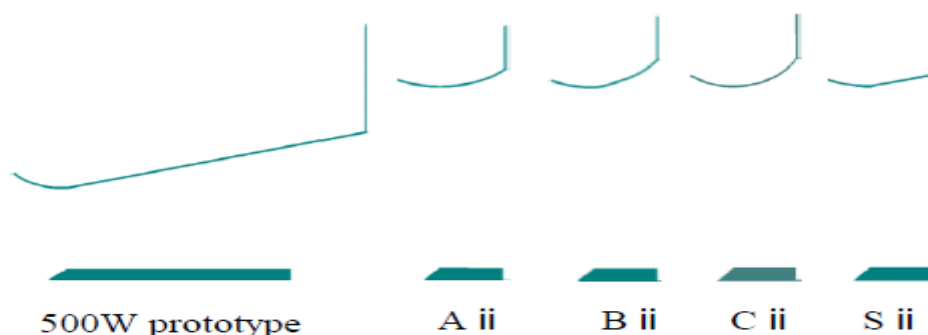
1-6- الدراسة المرجعية السادسة: [37]

(Yuji O, Takashi K, A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology: Energies, Volume 3, Issue 7, Japan, 2010, pp.634-649.)

قام الباحثون بدراسة نماذج مختلفة من الناشرات كما هو موضح أدناه في الشكل (26-1) الذي

يبين أشكال النماذج المدروسة والجدول (2-1) الذي يوضح المحددات الأساسية لكل نموذج اعتماداً على

القطر المتضيق من الناشرة D.

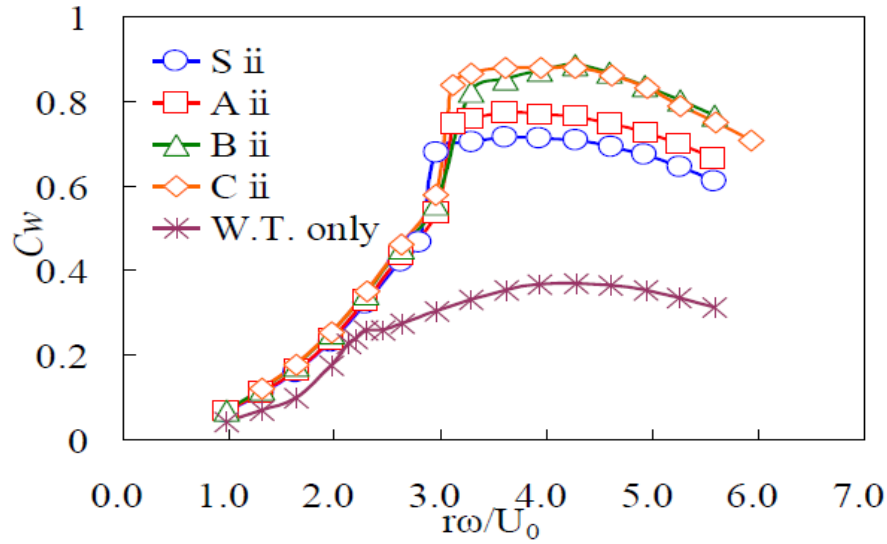


الشكل (26-1): أشكال النماذج المدروسة.

الجدول (2-1): يوضح المحددات الأساسية لكل نموذج اعتماداً على القطر المتضيق من الناشرة D.

Diffuser	Prototype	A ii	B ii	C ii	S ii
Lt/D	1.470	0.225	0.221	0.221	0.225
μ	2.345	1.173	1.288	1.294	1.119

يوضح الشكل (27-1) مقارنة بين معاملات الطاقة للنماذج الأربعة المدروسة وتوربين بدون ناشرة.



الشكل (27-1): مقارنة بين معاملات الطاقة للنماذج الأربعة المدروسة وتوربين بدون ناشرة.

حيث بيّنت النتائج أنّ معامل الطاقة للنموذج A ii أعلى من نظيره في النموذج S ii، وبالتالي

فإن الناشرة ذات الانحناء أفضل من الناشرة المستقيمة، ولوحظ أيضًا أنّ معامل الطاقة للنموذج Cii

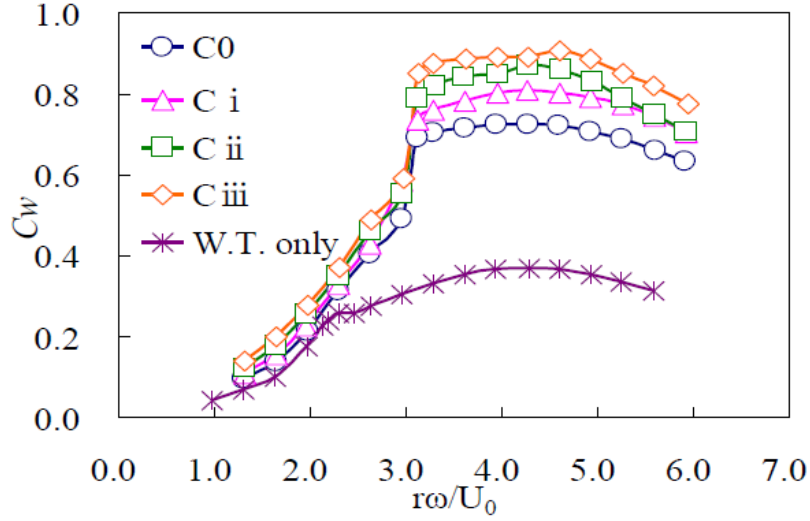
أفضل من باقي النماذج، وهذا يدلّ على تأخّر حدوث ظاهرة انفصال الجريان ضمن هذا النموذج،

ولا يوجد ما يعيق الجريان ضمنه، لذا تمّت دراسة تجريبية أخرى على عدّة أشكال من نموذج الناشرة

المنحنية C الموضحة محدّداتها الأساسية في الجدول (3-1) وذلك اعتماداً على القطر المتضيق منه D.

الجدول (3-1): يوضّح المحدّدات الأساسية لعدّة أشكال من النموذج C وذلك اعتماداً على القطر المتضيق منه D.

Diffuser	C0	C i	C ii	C iii
Lt/D	0.1	0.137	0.221	0.371
μ	1.138	1.193	1.294	1.555



الشكل (28-1): مقارنة بين معاملات الطاقة لأشكال النموذج C وتوربين بدون ناشرة.

أوصت هذه الدراسة باتباع نموذج Ciii وذلك لمردوده الطاقى الجيد مقارنة بباقي النماذج

المدرسة في هذا البحث. كما هو مبين من مقارنة معاملات الطاقة لأشكال النموذج C وتوربين بدون

ناشرة الموضحة في الشكل (28-1).

أهم النتائج المستنبطة من الدراسات المرجعية السابقة:

1- تلعب انحناء الناشرة دوراً مهماً في توزع الضغط ضمن الناشرة، ولم يتم ذكر التابع

الرياضي الناظم لتدرج انحناء الناشرة في الدراسات المرجعية.

2- لشكل مقطع الدخول إلى الناشرة دور مهم في سلاسة جريان الهواء ضمنها.

3- شكل الحافة وارتفاعها له دور مهم في زيادة السرعة ضمن الناشرة.

4- تدرج زوايا انفراج الناشرة ودورها في تأخير ظاهرة انفصال الجريان.

وبالتالي سنقوم في هذا البحث بمايلي:

1- إيجاد تابع رياضي ناظم لانحناءة الناشرة، يحقّق تدرّج في مقطع الناشرة بدءاً من مقطع الدخول انتهاءً بمقطع الخروج، وذلك كي لا يحدث تغيّر مفاجئ في المقطع وبالتالي انخفاض مفاجئ بالضغط، وذلك للحفاظ على استقرار الجريان ضمن الناشرة، ولتأخير ظاهرة انفصال الجريان وإبعادها إلى خلف الناشرة يجب التصميم بحيث نحقق زيادة تدريجية للضغط خلف الناشرة وهذا يؤدي أيضاً إلى التخفيف من التأثير السلبي لمنطقة الأثر الذيلي خلف الناشرة.

2- اختيار ارتفاع الحافة بما يتناسب مع مقطع الخروج من الناشرة والمقطع المتضيق منها، ليكون تأثيره إيجابياً في زيادة السرعة ضمن الناشرة، وفي الجريان ضمنها، وألا يتحوّل إلى مصدر هواء.

الفصل الثاني

الدراسة النظرية

تمهيد: [12]



قدم العالم الألماني براندل (Prandtl) في أوائل القرن الماضي نظريته الشهيرة عن الطبقة الحدية، ونجح في شق الطريق الجدي الذي وصل بعلم ميكانيك السوائل للمرحلة المتقدمة الحالية.

لاحظ العديدون حتى قبل براندل أن سبب التناقض الملاحظ LUDWING PRANDTL

بين النتائج التي يقدمها التحليل النظري في علم الهيدروديناميك والواقع العملي التجريبي لحركة السوائل يعود بصورة رئيسية إلى إهمال ظاهرة الاحتكاك في حركة السوائل، أي إهمال تأثير لزوجة السوائل وعلى الرغم من أن معادلات الحركة العائدة للسوائل اللزجة والمعروفة باسم معادلات نافير - ستوكس (Navier-Stokes) كانت معروفة لفترة طويلة قبل أن يتقدم براندل بنظريته، إلا أن الصعوبات الرياضية الكبيرة التي رافقت حل هذه المعادلات حطمت الكثير من الجهود التي بذلت في سبيل التوصل إلى نظريات عامة وشاملة عن حركة السوائل اللزجة.[5]

على أية حال، إن أكثر السوائل استعمالاً ومصادفة في الحياة العملية هي الماء والهواء وإن لزوجة هذين السائلين تعتبر نسبياً صغيرة وبالتالي فإن قوى اللزوجة للجريان لا تلعب دوراً مهماً بالمقارنة مع القوى الأخرى (كقوى الضغط والثقالة). هذا ينطبق على السرعات الصغيرة، أما في حالة السرعات العالية فإن قوى الاحتكاك تلعب دوراً مهماً في ديناميكية الجريان، ومع تطور العلوم والتقنية والرغبة الملحة نحو الوصول لسرعات عالية، خاصة السرعات التي تفوق سرعة الصوت، لم يعد من المقبول

إهمال تأثير اللزوجة والاحتكاك على الجريان. فقد بين براندل بنظريته، كيف يمكن دراسة حركة السوائل

الحقيقية (اللزجة) دراسة نظرية مستقيماً من المستوى المتقدم الذي توصل إليه علم الهيدروديناميك

النظري بحيث تعتمد نظريته على ما يلي:

يقسم الجريان حول الأجسام الصلبة إلى قسمين: [9]

الأول: عبارة عن منطقة رقيقة بالقرب من السطح الصلب تُعرف باسم الطبقة الحدية

(Boundary Layer).

الثاني: بعيداً عن السطوح الصلبة، يكون فيها الجريان مثالياً.

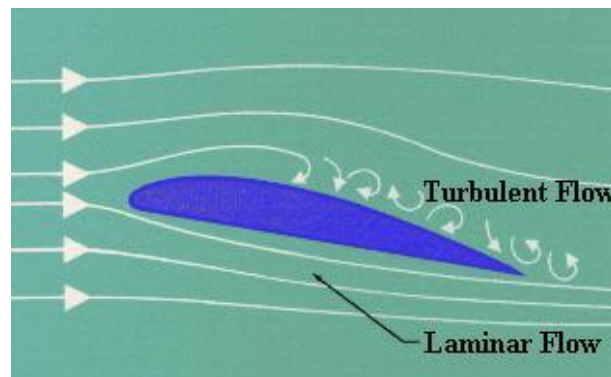
تكون لقوى اللزوجة (قوى الاحتكاك) دوراً مهماً فقط في منطقة الطبقة الحدية أما في الجريان

المثالي البعيد عن السطوح من الممكن تطبيق أسس جريان السائل المثالي لعدم أهمية قوى اللزوجة (قوى

الاحتكاك) عندها. [6]

يبين الشكل (1-2) مخططاً توضيحياً لكل من الجريان الصفائحي والجريان المضطرب حول

الجناح العامل.



الشكل (1-2): الجريان الصفائحي والمضطرب حول الجناح الحامل

ولذلك نبدأ عادة بدراسة الجريان خارج نطاق الطبقة الحدية ونستقي المعلومات الكافية عن الجريان، ومن ثم ننتقل إلى دراسة الجريان في الطبقة الحدية مستفيدين من هذه المعلومات المستقاة من دراسة حركة الجريان المثالي.

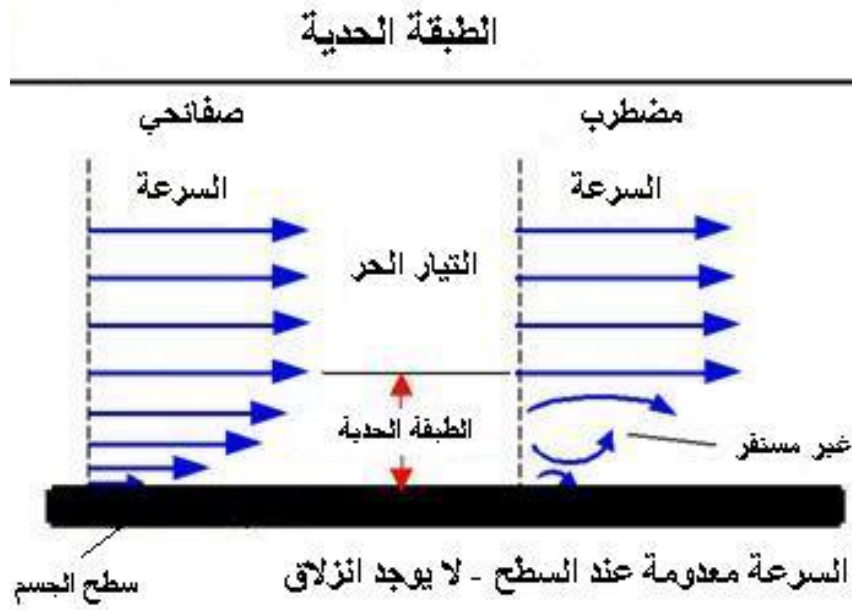
لاقت نظرية براندل نجاحاً ملحوظاً، حين اتفقت النظرية مع النتائج التجريبية العملية التي قام بها براندل نفسه وغيره من الباحثين.[7]

ثم توالى بعد براندل الجهود في الاتجاهين النظري والتجريبي وساعدت الأجهزة العملية الحديثة كالحاسبات الإلكترونية وأجهزة القياس المتطورة في الوصول مؤخراً إلى مستوى مميز لنظرية الطبقة الحدية.

إن السائل المثالي: بالتعريف هو سائل غير لزج، ولذا تستطيع جزيئات السائل الملامسة للسطوح أن تأخذ أية سرعة بغض النظر عن الحالة الحركية لهذه السطوح فيمكن لجزيئات السائل أن تنزلق على بعضها بعض من دون مقاومة بسبب عدم وجود إجهادات قص مماسية.

أما السائل الحقيقي: فإن تكوينه الفيزيائي لا يسمح له بالانزلاق على السطوح الصلبة، لذا نفترض أن السائل الحقيقي يأخذ الحالة الحركية للسطح الصلب الملامس له، تتحدد بهذه الفرضية شروطاً خاصة للجريان تعرف باسم الشروط الحدية.

تبيّن مما تقدم أنه حين مرور تيار منتظم من سائل حقيقي فوق سطح صلب ساكن فإن السائل الملامس للجسم يكون له سرعة متغيرة. وبما أن مبدأ الانقطاع غير مقبول فيزيائياً لذلك فإن السرعة تتدرج من الصفر عند السطح إلى السرعة المنتظمة في الجريان المثالي. والمنطقة التي يحدث فيها هذا التدرج هي التي تدعى بالطبقة الحدية. كما إن معدل التدرج في زيادة السرعة لا يكون منتظماً وبالتالي فإن مخطط توزع السرعة كما هو موضح في الشكل (2-2)، وفق الاتجاه الناظمي على السطح يأخذ شكل غير خطي (ليس دائماً). [8]



الشكل (2-2): توزع السرعة في الطبقة الحدية في حالتي الجريان الصفائحي والمضطرب

تتولد بسبب انزلاق طبقات السائل على بعضها بعض إجهادات قص مماسية ينتج عنها قوى احتكاك معيقة للحركة وتدعى هذه القوى بمقاومة أو إعاقة الاحتكاك. تكون إجهادات القص أعظمية عند الجدار وتتضاءل تدريجياً حتى تنعدم بالقرب من حدود الطبقة الحدية، وإن دراسة ونقهم إعاقة الاحتكاك يتطلب تفهماً جيداً لخواص الجريان ضمن الطبقة الحدية، كما أن الطبقة الحدية تنقسم أحياناً عن

الجدران الصلبة للأجسام وتولد جرياناً معاكساً يتحرك عكس اتجاه الجريان الأصلي تتشكل نتيجة

للجريان المعاكس أعاصير موضعية تتجمع في منطقة خلف الجسم تدعى بالأثر الذيلي (Wake).

وإن طبيعة قوى المقاومة هنا تختلف عن إعاقة الاحتكاك وتدعى بإعاقة الضغط أو الشكل.

تؤدي ضياعات الاحتكاك في الطبقة الحدية إلى رفع درجة الحرارة السطح الملامس للسائل ويحدث

تبادل حراري بين السائل والسطح الصلب الملامس له وتعتمد درجة حرارة السطح ومعدل التبادل الحراري

على خواص الجريان في الطبقة الحدية، لذلك فمن أهداف النظرية الحدية أيضاً هي دراسة الاحتكاك

الجلدي والتبادل الحراري بين السائل والسطوح الملامسة له وهذا ما ندعوه بالطبقة الحدية الحرارية. [10]

إن معرفة التفاصيل المذكورة أعلاه كافة ضرورية في اختيار أفضل تصميم للأشكال الهندسية

للأجسام (كالسفن والطائرات والسيارات وشفرات العنفات وغيرها...) يعطي ضياعات أصغرية وهذا ما

تؤمنه نظرية الطبقة الحدية.

2-1 - معادلات نافير ستوكس:

المعادلات النازمة لجريان أي مائع هي معادلات كمية الحركة على المحاور الإحداثية الثلاثة

(التي تعرف بمعادلات نافير ستوكس) وهي المعادلات: (2-1, 2-2, 3-2) ويضاف إليها في حال جريان

الموائع القابلة للانضغاط معادلة الحالة (2-4)، تعطى هذه المعادلات وفق الشكل:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_{Vx} - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_{Vy} - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = F_{Vz} - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$$P = \rho \cdot R \cdot T \dots\dots\dots (4-2)$$

حيث: u, v, w: مركبات السرعة وفق المحاور X, Y, Z على الترتيب.

p: الضغط

ρ : الكثافة

F_{Vx}, F_{Vy}, F_{Vz} : القوة الحجمية (الخارجية) وفق المحاور X, Y, Z على الترتيب.

من الجدير بالملاحظة أنَّ معادلات نافير ستوكس تأخذ في الحالة العامة لجريان غير مستقر

قابل للانضغاط صيغة معقّدة جدًّا، لأنَّ $div V \neq 0$ وبالتالي يدخل قانون ستوكس بكامل حدوده في

المعادلات الحركية، كذلك فإنَّ معادلة الاستمرار تكون أكثر تعقيدًا لأنَّ الكثافة تابعة للزمن، يضاف إلى

ذلك أنَّ اللزوجة والكثافة تتغيران مع درجة الحرارة، وعليه فإنَّ معرفة حقل الجريان يحتاج إلى تحديد

سبعة مجاهيل: T, μ , P, ρ , U, V, W لذا بالإضافة إلى معادلات نافير ستوكس الحركية الثلاث

ومعادلة الاستمرار، نحتاج إلى الاستعانة بالقانون الأساسي الأول بالترموديناميك المعبر عن قانون

انحفاظ القدرة الذي يسمح بمعرفة توزع درجة الحرارة T ، وبمعادلة الحالة التي تربط بين الضغط والكثافة ودرجة الحرارة، وأخيراً بالقانون التجريبي لعلاقة اللزوجة بدرجة الحرارة، وبذلك يتوفر لدينا بمعلومية القوى الحجمية سبع معادلات لإيجاد المجاهيل السبعة.

2-2- الصفات العامة لمعادلات نافير-ستوكس وإمكانات حلها:

تمثل معادلات نافير - ستوكس في كل لحظة حالة التوازن بين قوى العطالة والقوى الحجمية وقوى الضغط وقوى الاحتكاك المؤثرة على جزيء حجمي من سائل لزج، وبالتالي فهي تشكل الأساس الذي يعتمد عليه تحريك السوائل الحقيقية.

إن الفرضية الاعتبارية لعلاقة الإجهادات مع سرعات التشوه التي اعتمدت في قانون ستوكس العام للاحتكاك ودخلت بالتالي في صلب معادلات نافير - ستوكس تثير بعض الشك فيما إذا كانت هذه المعادلات تعطي وصفاً واقعياً ومؤكداً لسائل الجريان الحقيقي على اختلافها وتنوعها. وبالفعل فقد بقي الاعتقاد سائداً لفترة طويلة بعدم صلاحية هذه المعادلات سوى لمعالجة مسائل الجريان الصفائحي البسيطة. أما اليوم فقد ثبت البرهان القطاه أن معادلات نافير - ستوكس تصلح حتى لدراسة العمليات الأولية أو الجزيئية للحركة المضطربة المعقدة، كما سبقت الإشارة لذلك.

إن الحدود الممثلة لقوى الاحتكاك في معادلات نافير - ستوكس، تحديداً $\nu \Delta v$ ، ترفع مرتبة هذه المعادلات إلى الدرجة الثانية وتزيل عنها الصفة الخطية، مما يجعل إمكانات حلها العام محدودة

جداً ومقرونة بصعوبات رياضية هائلة، يمكن أن نتصور حجمها إذا تذكرنا أن الحلول الممكنة لمعادلات أولير الحركية للجريانات المثالية محدودة ومعقدة رياضياً بشكل عام، إلا حالة في حالة الجريانات الكمونية التي تصبح عندها معادلات أولير خطية.

للحصول على حلول معقولة فيزيائياً لمعادلات نافير - ستوكس يلزم مراعاة الشروط الحدية التي يفرضها في حالة السوائل الحقيقية شرط الالتصاق ويقضي بأن تتعدم المركبة المماسية والناظمية لشعاع السرعة على الجدران الصلبة الثابتة:

$$V_n = V_t = 0 \Rightarrow \text{على الجدار}$$

حتى اليوم لم يعرف أي حل دقيق لمعادلات نافير - ستوكس روعيت فيه حدود هذه المعادلات كافة وبعمومية تشمل التأثير المتبادل كاملاً بين قوى العطالة وقوى الاحتكاك. لكن بشائر الأمل في هذه الاتجاه أصبحت مشجعة جداً خاصة باستخدام الحواسيب الإلكترونية.

لقد أمكن إيجاد عدد من الحلول الدقيقة لمعادلات نافير - ستوكس بالنسبة لبعض حالات الجريان الخاصة ذات الحركة الصفائحية. وما عدا ذلك فيمكن إيجاد حلول تقريبية لهذه المعادلات مبنية على أساس إهمال بعض الحدود بالمقارنة مع الحدود الأخرى.

إن الإمكانات المعروفة من وجهة نظر عملية لحل معادلات نافير - ستوكس، بمعنى مكاملة

هذه المعادلات مع مراعاة الشروط الحدية، تتدرج على سبيل العد لا الحصر تحت الحالات التالية:

1. قوى الاحتكاك معدومة. عندئذ تأخذ معادلات نافير - ستوكس صيغة معادلات أويلر

الحركية، وتمثل الجريانات الكمونية دائماً حلاً لهذه المعادلات. وقد طور ميكانيك السوائل

طرقاً عملية متعددة على أساس هذه الجريانات لحل مسائل الحريان الأساسية.

2. فصيلة الجريانات الانسحابية الصفائحية Translation flows المتكونة تمتاً والمستقرة، مثل

جريان كونييت بين صفيحتين، جريان هاجن - بوازيل في الأنابيب. وقد أمكن الحصول على

حلول دقيقة لمعادلات نافير - ستوكس لهذه الحالات تطابقت نتائجها بشكل جيد مع النتائج

المقاسة.

3. قوى الاحتكاك كبيرة جداً بالمقارنة مع قوى العطالة، بحيث يمكن إهمال الأخيرة:

$DV/Dt = 0$ ، والانتقال للحالة الحدية ذات أعداد رينولدز الصغيرة جداً وتنطبق هذه الحالة

على ما يسمى فصيلة الجريانات الزاحفة Creeping flows ذات الحركة الصفائحية في

الأنابيب والأقنية بشكل عام، جريان المياه الجوفية، الجريان في المحامل الانزلاقية وغيرها.

4. قوى الاحتكاك صغيرة جداً بالمقارنة مع قوى العطالة. وتنطبق هذه الحالة الحدية ذات أعداد

رينولدز الكبيرة جداً بصورة خاصة على جريانات الطبقة الحدية.

5. بعض حالات الجريان الخاصة مثل الجريان الركودي المستوي، حقول الجريان الإعصارية

وغیرها.

إن حالات الجريان التي تمثل حلولاً دقيقة خاصة لمعادلات نافير - ستوكس تتحصر غالباً

بالحالات التي تتعدم فيها الحدود المربعة في هذه المعادلات تلقائياً، والتي يبقى تأثير قوى الاحتكاك

ضمن طبقة رقيقة مجاورة لجدار الجسم ولها بنية الطبقة الحدية. هذه الجريانات تنتمي غالباً لما يسمى

فصيلة الجريانات الانسحابية Parallel flows.

أما حالات الجريان التي تمثل حلولاً تقريبية لمعادلات نافير - ستوكس فتتنتمي لفصيلة

الجريانات الزاحفة، التي تتميز بأن قوى العطالة يمكن إهمالها بالمقارنة مع قوى الاحتكاك.

سندرس جريانات غير قابلة للانضغاط فقط، وسنعتبر أن القوى الحجمية محصورة بقوة الثقالة،

التي نفرض أنها متوازنة مع دافعة أرخميدس المؤثرة على الجزيء السائل، بمعنى أننا سنعتبر السائل ذا

كتلة بدون وزن، ونعتبر p بمفهوم الضغط الديناميكي المساوي للفرق بين الضغط الكلي والضغط

الهيدروستاتيكي.

2-2-1 الجريان الانسحابي كحل دقيق لمعادلات نافير - ستوكس:

اشتقاق المعادلات الحركية:

تتميز فصيلة الجريانات الانسحابية بأن شعاع السرعة يملك مركبة واحدة فقط. فإذا فرضنا أن

المركبة $u \neq 0$ ، بينما $w = v = 0$ ، فنجد من معادلة الاستمرار أن $\partial u / \partial x \equiv 0$ وبالتالي فإن u

لا تتعلق بالإحداثي x ، وإنما تكون:

$$u = u(x, z, t); v = w \equiv 0 \dots\dots\dots (5-2)$$

بالعودة لمعادلات نافير - ستوكس نجد بسهولة أن حدود تسارع الحمل كافة في الطرف الأيسر

للمعادلة الأولى معدومة. كما ينتج من المعادلة الثانية والثالثة أن $\partial p / \partial y = \partial p / \partial z = 0$ ، وبالتالي

فإن الضغط يتغير فقط في اتجاه x ، أي اتجاه الجريان. وعليه تبقى من معادلات نافير - ستوكس

المعادلة التالية فقط:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (6-2)$$

كمعادلة تفاضلية خطية للمجهول الوحيد u . وتتبسط هذه المعادلة عندما يكون الجريان مستقراً:

$u = u(x, z)$ ، وتصبح:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (7-2)$$

بمساعدة (6-2) أو (7-2) يمكن مع مراعاة الشروط الحدية الخاصة بالمسألة المطروحة

حساب توزيع السرعة وتوزيع الضغط.

الجريان الانسحابي بين صفيحتين مستويتين متوازيتين:

لنعتبر الجريان الانسحابي المستوي المستقر في قناة ذات جدارين مستويين ومتوازيين تفصلهما

مسافة h . هذه الحالة تنطبق أيضاً على الجريان بين صفيحتين مستويتين ومتوازيتين وثابتتين ذات

مقاييس كبيرة نسبياً. نختار مجموعة إحداثيات x, y بحيث ينطبق المحور x على محور القناة ويوجه موجباً موجباً باتجاه الجريان.

في هذه الحالة تكون $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ ، وبسبب أن $\frac{\partial u}{\partial y}$ يكون تدرج الضغط باتجاه الجريان

$dp/dx = p' = \text{const}$. بذلك تنبسط العلاقة (7-2) وتصبح:

$$\rho v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{dp}{dx} = p' = \text{const} \dots \dots \dots (8-2)$$

مع وجوب تحقيق الشروط الحدية الناجمة عن شرط الالتصاق:

$$y = \pm h/2 \Rightarrow u = 0 \dots \dots \dots (9-2)$$

نكامل (8-2) مرتين فنجد:

$$u(y) = \frac{p'}{2\rho v} y^2 + c_1 y + c_2 \dots \dots \dots (10-2)$$

ثابتا التكامل $c_{1,2}$ يتحددان كالتالي:

$$c_1 = 0 ; c_2 = -\frac{p'}{2\rho v} \cdot \frac{h^2}{4} \dots \dots \dots (11-2)$$

وعليه يصبح توزيع السرعة في القناة:

$$u(y) = \frac{p'}{2\rho v} \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right) \dots \dots \dots (12-2)$$

وهي معادلة قطع مكافئ ذروته تقع على محور القناة حيث تسود السرعة الأعظمية:

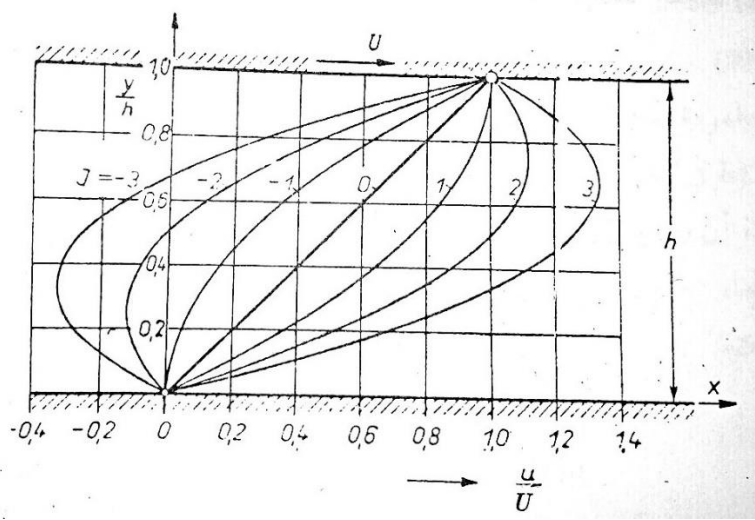
$$U_{\max} = \frac{p' \cdot h^2}{2\rho v} \dots\dots\dots (13-2)$$

$$\bar{U} = \frac{2}{3} U_{\max} \text{ : وتبلغ السرعة الوسطية للتيار الحجمي}$$

نفرض الآن أن الصفيحة العلوية تتحرك في مستويها وباتجاه المحور بسرعة ثابتة بينما تبقى

الصفيحة السفلية ساكنة. يطلق على الجريان بين الصفيحتين في هذه الحالة جريان كوثيت، الشكل (2-2).

(3).



الشكل (3-2): توزيع السرعة لجريان كوثيت بين صفيحتين مستويتين ومتوازيتين في حالة تناقص وتزايد الضغط باتجاه الجريان:

$J > 0$ ، الضغط يتناقص باتجاه سرعة الجر U ، $J > 0$ ، الضغط يتزايد باتجاه ويسبب جرياناً عكسياً، $J = 0$ ، تدرج الضغط معدوم.

إن المعادلة التفاضلية لهذا الجريان تبقى هي نفسها (2-8) ولكن شروطها الحدية تتغير،

وتصبح عندما نختار المحور منطبقاً على الصفيحة الساكنة:

$$y = 0 \Rightarrow u = 0; \quad y = h \Rightarrow u = U \dots\dots\dots (14-2)$$

بذلك يصبح ثابتا التكامل في (2-10) :

$$c_1 = \frac{U}{h} - \frac{h}{2\rho v} \cdot p' ; c_2 = 0 \dots\dots\dots (15-2)$$

ويكون بالتالي توزيع السرعة معطى بالعلاقة:

$$u(y) = \frac{U}{h} y - \frac{h}{2\rho v} \cdot p' \cdot \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \dots\dots\dots (16-2)$$

السرعة تتعلق بقيمة تدرج الضغط $p' = dp/dx$ ، ويتحدد شكل بروفيل السرعة بدلالة تدرج

الضغط اللابيدي:

$$J = \frac{h^2}{2\rho v} (-dp/dx) \dots\dots\dots (17-2)$$

كما يتجلى ذلك بوضوح في الشكل (3-2) الذي رسمت فيه عدة منحنيات لبروفيل السرعة

اللابيدية $\frac{u}{U} = f\left(\frac{y}{h}\right)$ ، كل منها من أجل قيمة معينة لـ J . ونلاحظ أنه عندما يندمج تدرج الضغط،

$p' = 0; J = 0$ ، يصبح توزيع السرعة خطياً:

$$\frac{u}{U} = \frac{y}{h} \dots\dots\dots (18-2)$$

ونسمي الجريان في هذه الحالة جريان كوثيت البسيط أما جريان كوثيت العام مع وجود تدرج ضغط

$J \geq 0$ فيمثل نظاماً لجريان كوثيت البسيط مع الجريان في قناة ثابتة الجدران. ويعني $J > 0$ أن

الضغط يتناقص باتجاه سرعة جر الصفیحة العلوية U ، وتكون عندئذ السرعة u موجبة على كامل

عرض القناة. أما $J < 0$ فيعني أن الضغط يتزايد باتجاه U . وعندئذ يمكن أن تصبح u سالبة في جزء

من مقطع القناة ويتكون ما يسمى جريان عكسي على مقربة من الصفیحة الساكنة، كما هو مبين في

الشكل (3-2) عندما تصبح $-1 < J$. وتفسير ذلك أن جزيئات السائل القريبة من الصفيحة الساكنة لا تمتلك القدرة الحركية الكافية للتغلب على تزايد الضغط باتجاه جر الصفيحة العلوية فتعكس اتجاه حركتها وتكوّن جرياناً عكسياً.

3-2- دراسة الجريان في الطبقة الحدية: Description Of Flow in

:Boundary Layer

لعل أبسط الطبقات الحدية هي تلك التي تتشكل على سطح صفيحة مستوية عندما يمر عليها تيار متوازي لمستويها. لنفرض أن للجريان سرعة منتظمة (U) غير مشوشة قبل اقترابه من الصفيحة. كنتيجة لفعل قوى اللزوجة تبدأ الطبقة الحدية بالتشكل ابتداءً من حرفها الأمامي الذي يدعى بالطرف القائد (Leading Edge) وتتعدى السرعة عند النقطة (0)، التي تدعى بنقطة الركود. نعتمد المحور (x) باتجاه الصفيحة ومنطبقاً على مستويها والمحور (y) عمودي على مستوي الصفيحة.

تبدأ الطبقة الحدية بالتشكل ابتداءً من نقطة الركود (0) وتزداد سماكة الطبقة الحدية (δ) مع زيادة المسافة (X) كنتيجة لاستدراج كمية إضافية من الجريان المثالي ذي السرعة العالية (كمية حركية كبيرة) للتعويض عن ضياعات الاحتكاك في الطبقة الحدية.

إن المسافة التي يحدث فيها تدرج السرعة من الصفر عند السطح الساكن إلى قيمة محددة في

الجريان المثالي تدعى بسماكة الطبقة الحدية ويرمز لها عادة (δ) وتقترب السرعة في الطبقة الحدية من

سرعة الجريان المثالي ترافقياً.

وتعتمد سماكة الطبقة الحدية على المعدل الذي تزداد به السرعة ويؤدي وجود الضياعات في

الطبقة الحدية إلى استهلاك مستمر للطاقة تؤخذ من الجريان المثالي ما يؤدي إلى ازدياد مستمر لسماكة

الطبقة الحدية كلما تحركنا باتجاه التيار.

إن السرعة تزداد كلما ابتعدنا عمودياً عن السطح وبمعدلات متفاوتة. يوضح الشكل (2-4)

مناطق الجريان المختلفة في الطبقة الحدية. وتكون معدلات تزايد السرعة عادةً عالية بالقرب من السطح

وتتناقص تدريجياً حتى تنعدم عند حدود الطبقة الحدية، وتقترب سرعة الجريان في الطبقة الحدية ترافقياً

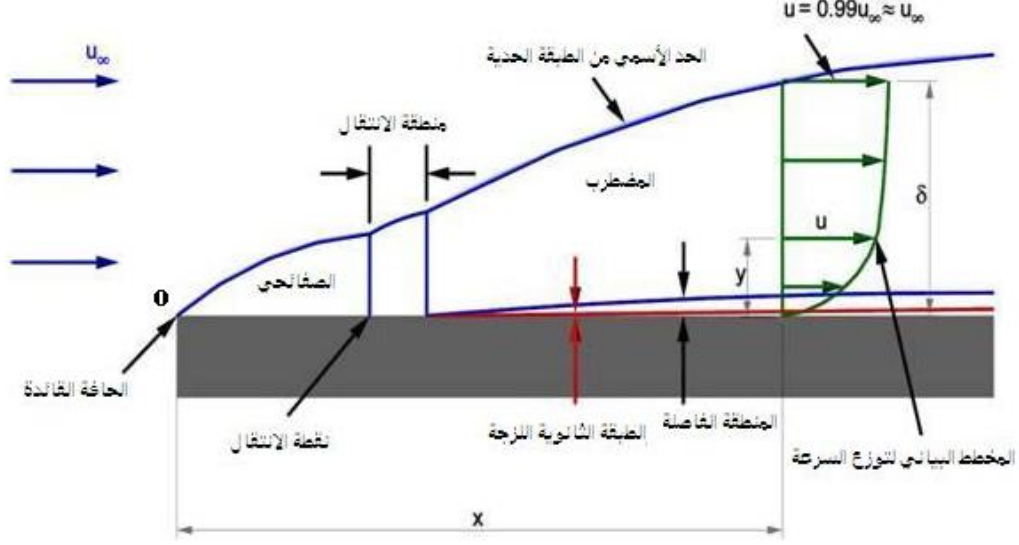
من سرعة الجريان المثالي بحيث يصعب تحديد النقطة (نظرياً) التي تنتهي عندها حدود الطبقة الحدية.

لذلك اتفق أن نعدّ سماكة الطبقة الحدية (δ) مساوية للمسافة العمودية على السطح (مقاسة من السطح)

إلى النقطة التي تصبح عندها سرعة الجريان (u) مساوية لـ (0.99) من سرعة الجريان المثالي أي:

$$[2] u = 0.99 U_{\infty} \dots \dots \dots (19-2)$$

حيث u : السرعة في الطبقة الحدية.



الشكل (4-2): الجريان في الطبقة الحدية

ومع ازدياد سماكة الطبقة الحدية مع زيادة المسافة (X) يبدأ الاضطراب وتبدأ الأعاصير بالتولد

والانتشار مما يؤدي إلى تحول الجريان من صفائحي إلى مضطرب.

ويلاحظ أن سماكة الطبقة الحدية تزداد بمعدلات أكبر في الطبقة الحدية المضطربة عنها في

الطبقة الحدية الصفائحية.

يحدث التحول من الطبقة الحدية الصفائحية إلى الطبقة الحدية المضطربة في مجال محدد

يعرف باسم المنطقة الانتقالية كما في الشكل المبين سابقاً. عملياً تكون السماكة (δ) صغيرة جداً إذا ما

قورنت بالمسافة (x) المقاسة وفق اتجاه طول الصفيحة.

يمتاز الجريان المضطرب بوجود حركة اعتباطية غير منتظمة لجسيمات السائل. وتتلاشى هذه

الحركة عند اقتراب الجسيمات من السطح الصلب كما يكون للسرعة بالجوار المباشر للسطح سرعة

صغيرة لذا فإن رقم رينولدز في الجوار المباشر للسطح يكون صغيراً وبالتالي يكون الجريان صفائحيًا.

لذلك يتشكل تحت الطبقة الحدية المضطربة طبقة دقيقة رقيقة جداً تعرف باسم الفلم الصفائحي. يلعب

الفلم الصفائحي دوراً مهماً في بحث الاحتكاك السطحي والتبادل الحراري بين الجريان والسطوح

الصلبة. [13]

يسبب وجود الأعاصير والحركة المضطربة تسريع المزج بين جسيمات السائل مما يؤدي إلى

الإسراع في انتظام سرعة التيار. لذلك نلاحظ أن تدرج السرعة (معدل ازدياد السرعة u مع المسافة y)

في الجريان المضطرب، والمقصود هنا الطبقة الحدية المضطربة، يكون كبيراً بالقرب من الجدار إذا ما

قورن بالتدرج الموافق في طبقة حدية صفائحية.

كما نعلم أن رقم رينولدز الذي يُعطى بالعلاقة: [3]

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \dots\dots\dots (20-2)$$

حيث: Re : عدد رينولدز. ρ : الكثافة، V : السرعة، L : طول مميز. μ : اللزوجة التحريكية

(ديناميكية) وتقدر بـ(بوين).

يتضمن سرعة مميزة وطولاً مميزاً فقد اتفق أن تعتمد سرعة الجريان المثالي (u) كسرعة مميزة

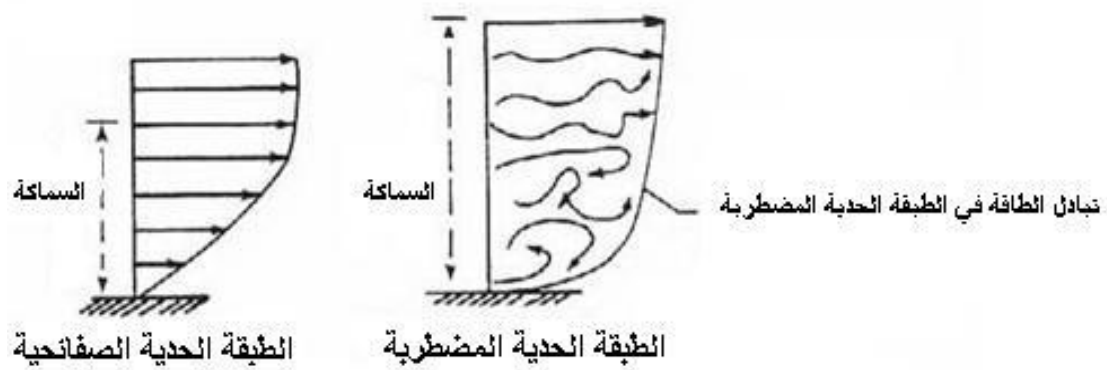
وطول المسافة (x) كطول مميز.

دلّت التجارب المخبرية على أنه إذا كان ($Re \leq 10^5$) فإن الطبقة الحدية ستكون صفائحية،

وإذا كان ($Re > 2 \times 10^6$) فإن الطبقة الحدية مضطربة حتماً. تعتمد هذه القيم كما ذكرنا على درجة

خشونة السطح وشدة اضطراب الجريان المثالي. [14]

يوضح الشكل (5-2) مقارنة بين الجريان الصفائحي والجريان المضطرب.



الشكل (5-2): مقارنة بين الجريان الصفائحي والمضطرب

2-4-العلاقات النظرية لدراسة الطبقة الحدية:

2-4-1- الطبقة الحدية في الجريان الصفائحي:

بالنسبة لحساب الطبقة الحدية الصفائحية في الحالة العامة اختار بولهاوزن لتوزيع السرعة

التعبير التالي:

$$\frac{u}{U} = f(\eta) = a_1\eta + a_2\eta^2 + a_3\eta^3 + a_4\eta^4 \dots (21-2)$$

حيث a_n و $\eta = y/\delta$ ثوابت عددية حرة تتحدد من الشروط الحدية التالية:

$$\left. \begin{aligned} y = 0 &\Rightarrow u = 0; v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = -U \frac{dU}{dx} \\ y = \delta &\Rightarrow u = U; \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22-2)$$

لأن التابع $f(\eta)$ يحقق شرط الالتصاق من نفسه. وواضح أن الشرط الحدي الثاني له أهمية

خاصة من حيث أن يحدد انحناء بروفيل السرعة في الجوار المباشر للجدار، ويضمن عدم وجود نقطة

انعطاف لهذا البروفايل في حالة تناقص الضغط، ووجود نقطة انعطاف في حالة تزايد الضغط.

كمعامل شكل لبروفيلات السرعة اختار بولهاوزن التعبير اللابعدي التالي:

$$\Lambda = \frac{\delta^2}{v} \frac{dU}{dx} = - \frac{dp}{dx} \frac{\delta}{\rho v U / \delta} \dots\dots\dots (23-2)$$

الذي يمثل فيزيائياً نسبة قوى الضغط إلى قوى الاحتكاك. ولكن من الأفضل اختيار قيمة مميزة

محددة فيزيائية في علاقة Λ ، مثل سماكة خسارة تيار الدفع δ_2 بدلاً من السماكة δ التي يصعب

تحديدها بدقة. وهذا ما قام به فعلاً هولشتاين وبولن Holstein & Bohlen، اللذان طورا في وقت لاحق

طريقة بولهاوزن.

بعد تحديد الثوابت a_n من الشروط الحدية نحصل على حزمة من بروفيلات السرعة تخضع

للتابع:

$$\frac{u}{U} = f(\eta, \Lambda) \dots\dots\dots (24-2)$$

التي يتحدد شكلها حسب قيمة معامل الشكل Λ كوسيط متحول تتغير قيمته في

المجال $-12 \leq \Lambda \leq 12$. ويحدث انفصام الطبقة الحدية من أجل:

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \Rightarrow \Lambda = -12 \dots \dots \dots (25-2)$$

وبينما يصبح من أجل $\Lambda > 12$ شرط وجود الطبقة الحدية غير محقق. ونحصل على بروفيل

السرعة في نقطة الركود من أجل $\Lambda = 7.052$.

بالنسبة لمثال الصفيحة المستوية يمكن الاستقادة من "تشابه" بروفيلات السرعة، وتصبح

(24-2) على هذا الأساس بعد وضع $U = U_\infty$ بالصيغة.

$$\frac{u}{U_\infty} = f(\eta) = f(y/\delta) \dots \dots \dots (26-2)$$

حيث $f(\eta)$ بموجب (21-2)، ولكن الشروط الحدية (22-2) تصبح الآن بسبب $\frac{dp}{dx} = 0$ ،

من الشكل:

$$\left. \begin{array}{l} y = 0 \Rightarrow u = 0 ; \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \\ y = \delta \Rightarrow u = U_\infty ; \frac{\partial u}{\partial y} = 0 ; \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (27-2)$$

وتتحدد على أساسها الثوابت a_n كالتالي:

$$a_1 = 2; \quad a_2 = 0; \quad a_3 = -2; \quad a_4 = 1;$$

وعليه يصبح التابع $f(\eta)$ حسب (21-2) من الصيغة:

$$\frac{u}{U_{\infty}} = f(\eta) = \eta - 2\eta^3 + \eta^4 \dots\dots\dots (28-2)$$

وبذلك نستطيع الآن حساب سماكة الطبقة الحدية وقيمها المميزة.

نحسب التكامل فنجد:

$$\begin{aligned} U_{\infty} \delta_2(x) &= \int_{y=0}^{\infty} u(U_{\infty} - u)dy = U_{\infty}^2 \delta(x) \int_{\eta=0}^1 f(1-f)d\eta \\ &= U_{\infty}^2 \delta(x) \alpha_1 \dots\dots\dots (29-2) \end{aligned}$$

حيث α_1 ثابت عددي يمثل معامل التناسب بين سماكة الطبقة الحدية δ وسماكة خسارة تيار

الدفع δ_2 :

$$\delta_2 = \alpha_1 \cdot \delta \dots\dots\dots (30-2)$$

من جهة أخرى فإن إجهاد القص الصفائحي على الجدار يبلغ:

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{\nu U_{\infty}}{\delta} \left(\frac{df}{d\eta} \right)_{\eta=0} = \beta_1 \cdot \frac{\nu U_{\infty}}{\delta} \dots\dots\dots (31-2)$$

حيث $\beta_1 = \left(\frac{df}{d\eta} \right)_{\eta=0}$ ثابت عددي أيضاً. ندخل (31-2) في قانون الدفع للطبقة الحدية مع

مراعاة (30-2) فنجد بعد إصلاح بسيط:

$$\delta \frac{d\delta}{dx} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \frac{\nu}{U_{\infty}} \dots\dots\dots (32-2)$$

بمكاملة هذه العلاقة مع مراعاة أن $\delta = 0$ عند $x = 0$ فنحصل على توزيع سماكة الطبقة

الحدية:

$$\delta(x) = \sqrt{\frac{2\beta_1}{\alpha_1}} \sqrt{\frac{v x}{U_\infty}} \dots\dots\dots (33-2)$$

2-4-2- الطبقة الحدية في الجريان المضطرب:

أثبتت التجارب أن توزيع السرعة في الطبقة الحدية المضطربة لصفحة مستوية يخضع لقانون

لوغارتمي يمكن كتابته بالصيغة:

$$\frac{u}{v_\tau} = C_1 \lg \frac{y v_\tau}{v} + C_2 \dots\dots\dots (34-2)$$

حيث $v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ سرعة إجهاد القص الجداري. بالنسبة للجريان في الأنابيب تبلغ قيمتا

الثابتين $C_{1,2}$:

$$C_2 = 5.75, C_1 = 5.5$$

بالمقابل أكدت التجارب الشاملة التي أجراها شولتس جرونو وجود اختلاف بسيط بين توزيع

السرعة في الأنابيب وحول الصفحة، مما استدعى تغييراً بسيطاً لقيمة الثابتين $C_{1,2}$ بحيث يصبح قانون

توزيع السرعة اللوغارتمي للصفحة من الشكل:

$$\frac{u}{v_\tau} = 5.85 \lg \frac{y v_\tau}{v} + 5.56 \dots\dots\dots (35-2)$$

لحساب القيم المميزة للطبقة الحدية نستعين بقانون الدفع لصفحة طولها x وعرضها b ومبلة

من طرف واحد. يكون:

$$F_W(x) = b \int_0^x \tau_w(x) dx = \rho b \int_{y=0}^{\infty} u(U_{\infty} - u) dy$$

$$= \rho b U_{\infty}^2 \delta_2(x) \dots \dots \dots (36-2)$$

حيث $F_W(x)$ المقاومة الجزئية، $\tau_w(x)$ إجهاد القص الجداري الموضعي و $\delta_2(x)$ سماكة

خسارة تيار الدفع عند الموقع. وواضح أنه يتوجب إجراء التكامل الثاني في الموقع. باشتقاق هذه العلاقة

بالنسبة ل x نجد:

$$\frac{1}{b} \frac{dF_W}{dx} = \tau_w(x) = \rho U_{\infty}^2 \frac{d\delta_2}{dx} \dots \dots \dots (37-2)$$

وذلك بالتطابق مع قانون الدفع للطبقة الحدية . ولكن يتوجب هنا استخدام قانون مناسب

لإجهاد القص الجداري τ_w ، الذي لا يخضع قطعاً لقانون نيوتن، كما كان الأمر في الحالة الصفائية.

لهذه الغاية نستعين بقانون بلازيوس المعروف من دراسة جريان الأنابيب والذي يأخذ بالنسبة للصفحة

المستوية الصيغة:

$$\frac{U_{\infty}}{v_{\tau_w}} = 8.74 \left(\frac{v_{\tau_w} \cdot \delta}{v} \right)^{1/7} \dots \dots \dots (38-2)$$

من هذه العلاقة تنتج سرعة إجهاد القص الجداري:

$$v_{\tau_w} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = 0.15 U_{\infty}^{\frac{7}{8}} \left(\frac{v}{\delta}\right)^{\frac{1}{8}} \dots\dots\dots (39-2)$$

ويكون بالتالي إجهاد القص الجداري:

$$\tau_w = 0.0225 \rho U_{\infty}^{\frac{7}{4}} \cdot \left(\frac{v}{\delta}\right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (40-2)$$

أو بصيغة لا بعدية:

$$\frac{\tau_w}{\rho U_{\infty}^2} = 0.0225 \rho \cdot \left(\frac{v}{U_{\infty} \cdot \delta}\right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (41-2)$$

بمساعدة قانون توزيع السرعة تنتج سماكة الانزياح δ_1 وسماكة خسارة تيار الدفع δ_2 حسب

كالتالي:

$$\delta_1(x) = \frac{\delta(x)}{8} ; \quad \delta_2(x) = \frac{7}{72} \delta(x) \dots\dots\dots (42-2)$$

وعليه يتوجب تحديد $\delta(x)$. لهذا ندخل $\delta_2(x)$ حسب (42-2) في (37-2) فنجد:

$$\frac{\tau_w}{\rho U_{\infty}^2} = \frac{7}{72} \frac{d\delta}{dx} \dots\dots\dots (43-2)$$

نساوي بين هذه العلاقة والعلاقة (41-2) فنجد:

$$\frac{7}{72} \frac{d\delta}{dx} = 0.0225 \rho \cdot \left(\frac{v}{U_{\infty} \cdot \delta} \right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (44-2)$$

فإذا كاملنا هذه المعادلة التفاضلية مع مراعاة القيمة الابتدائية: $\delta = 0$ عند $x = 0$ ، تنتج

سماكة الطبقة الحدية الموضعية:

$$\delta (x) = 0.37 \cdot x \cdot \left(\frac{U_{\infty} \cdot x}{v} \right)^{-1/5} = 0.37 \left(\frac{v}{U_{\infty}} \right)^{-1/5} x^{4/5} \dots\dots\dots (45-2)$$

وتصبح حسب (42-2) سماكة الانزياح:

$$\delta_1 (x) = 0.046 \cdot x \cdot \left(\frac{U_{\infty} \cdot x}{v} \right)^{-1/5} \dots\dots\dots (46-2)$$

وسماكة خسارة تيار الدفع:

$$\delta_2 (x) = 0.036 \cdot x \cdot \left(\frac{U_{\infty} \cdot x}{v} \right)^{-1/5} \dots\dots\dots (47-2)$$

يتضح مما تقدم أن سماكة الطبقة الحدية المضطربة $\delta_t \sim x^{4/5}$ ، بينما في الحالة

الصفائحية $\delta_t \sim x^{1/2}$.

2-5- وصف انفصال الطبقة الحدية (Boundary Layer Separation):

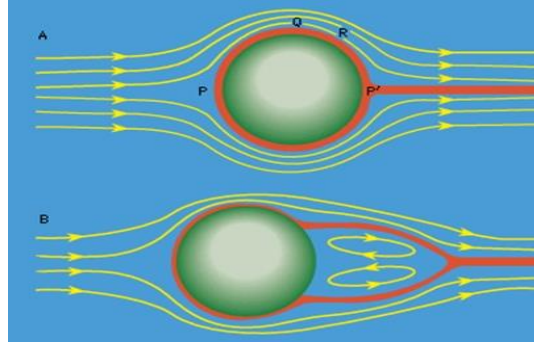
انفصال الطبقة الحدية عن الجناح - الانهيار - التحكم بالطبقة الحدية:

إن الطبقة الحدية تنفصم أحياناً عن الجدران الصلبة للأجسام مما يسبب توزعاً غير منتظماً

للضغط أمام الجسم وخلفه، وتولد جرياناً معاكساً يتحرك بعكس اتجاه الجريان الأصلي. [19]

يبين الشكل (6-2) تولد الجريان المعاكس وتشكل الأثر الذيلي خلف الأسطوانة؛ الشكل (A)

الجريان أمام الأسطوانة، الشكل (B) الجريان خلف الأسطوانة.



الشكل (6-2): تولد الجريان المعاكس وتشكل الأثر الذيلي خلف الأسطوانة

الشكل (A) الجريان أمام أسطوانة عندما $\left(\frac{dp}{dx} \leq 0\right)$ - الشكل (B) الجريان خلف أسطوانة عندما $\left(\frac{dp}{dx} \geq 0\right)$

حيث تتشكل نتيجةً للجريان المعاكس أعاصير موضعية تتجمع في منطقة خلف الجسم ووفقاً

للشكل الهندسي للجريان يمكن تمييز الحالات التالية:

(1) يهبط ضغط التيار مع اتجاه الحركة، ويكون أصغر من الصفر $\left(\frac{dp}{dx} \leq 0\right)$.

ويستطيع الضغط أن يعوّض عن القدرة المفقودة بالاحتكاك، وبذلك يبقى للمائع قدرة حركية

تساعده على الاستمرار في الجريان وتُشاهد مثل هذه الحالة في الجريان أمام أسطوانة دائرية محورها

عمودي على اتجاه التيار.

ففي المجال الموافق للنصف الأمامي للأسطوانة المبينة بالشكل السابق (A) نرى أن مقطع

الجريان يتناقص بسبب وجود الأسطوانة وتزداد السرعة ويهبط الضغط.

(2) يبقى الضغط ثابتاً $\left(\frac{dp}{dx} = 0\right)$ وتُشاهد هذه الحالة في الجريان على سطح صفيحة مستوية.

(3) يزداد الضغط مع اتجاه التيار، ويكون $\left(\frac{dp}{dx} \geq 0\right)$ أي تدرج الضغط موجباً، وبالتالي يعمل

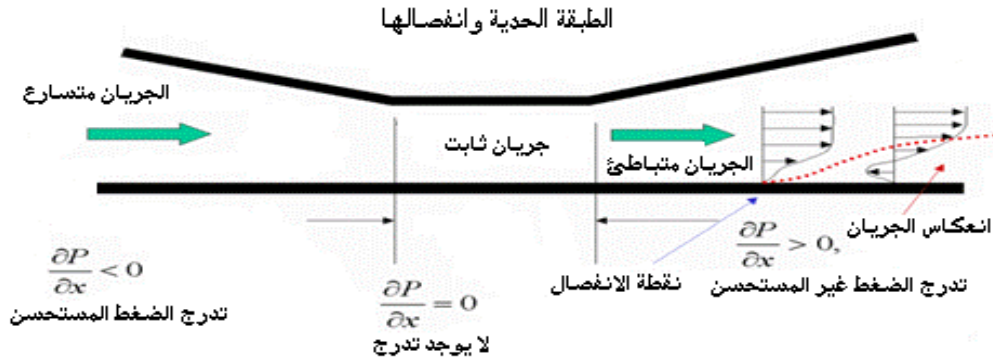
الضغط جنباً إلى جنب مع قوى الاحتكاك على استهلاك القدرة الحركية للمائع وتزداد سماكة الطبقة

الحدية وتستمر الطاقة الحركية للجريان بالتناقص حتى تنعدم السرعة وتُشاهد هذه الحالة في الجريان

خلف الأسطوانة والمبينة في الشكل السابق (B).

وقد يحدث أن تعكس جسيمات الهواء اتجاه حركتها لتزيد من كمية الحركة المفقودة وتنقسم

الطبقة الحدية كما في الشكل (7-2)



الشكل (7-2): انفصال الطبقة الحدية وحالات تدرج الضغط

تُعلَّل النتائج السابقة فيزيائياً كما يلي:

يستهلك الاحتكاك بين طبقات السائل اللزج المنزلقة على بعضها بعض قدرة تؤخذ من القدرة

الحركية للجريان. ويساهم الاحتكاك عند السطوح الصلبة باستهلاك قدرة إضافية، تتحول هذه القدرة إلى

حرارة وتُعدُّ $\frac{dp}{dx}$ كما نعلم قدرة مفقودة لا تُعوَّض.

فإذا كان تدرج الضغط سالِباً في الطبقة الحدية فيستطيع الضغط حينئذ أن يعوض عن

القدرة المفقودة بالاحتكاك، وبذلك يبقى للسائل قدرة حركية تساعد على الاستمرار في الحركة.

أما حين يكون تدرج الضغط موجباً فإن الضغط سيزداد على حساب القدرة الحركية،

ويعمل الضغط حينئذ جنباً إلى جنب مع قوى الاحتكاك على استهلاك القدرة الحركية للسائل مما

يسبب تباطؤ الجريان واستدراج سائل جديد من الجريان المثالي له قدرة حركية عالية.

وتزداد لذلك سماكة الطبقة الحدية بمعدلات أكبر وتستمر الطاقة الحركية للجريان

بالتناقص حتى تنعدم السرعة وعندها يعكس الجريان اتجاهه بالقرب من السطح وتنقسم الطبقة

الحدية ويندفع الجريان المعاكس بين السطح والطبقة الحدية.

وتدعى النقطة التي يحدث عندها انفصال الطبقة الحدية عن السطح بنقطة الانفصال

ويدعى السطح الفاصل بين الطبقة الحدية والجريان المعاكس حيث تنعدم السرعة بـسطح

الانزلاق. وهذا ما يبينه الشكل (2-8) الذي يوضح حدوث الانفصال وعلاقته بالتغيرات الفجائية في ميل

السطوح الصلبة.

ثم لا يلبث السائل الموجود بجوار السطح أن يكتسب حركة إعصارية موضعية مشكلاً منطقة

اضطراب خلف الجسم تدعى بالأثر الذيلي للجريان (Wake).

تحتاج الأعاصير في الأثر الذيلي لقدرة إضافية لاستمرار تولدها وحركتها وتتبدد هذه القدرة،

التي تؤخذ من الجريان المثالي، أخيراً على شكل حرارة. [20]

فتشكل الأعاصير الموضحة بالشكل (2-9)، إذاً في منطقة الأثر الذيلي يعني ضياعات إضافية

وهو أمر غير مرغوب.

ومن أهداف التصميم الجيد أن يكون الأثر الذيلي ضعيفاً والقدرة المفقودة بواسطته أصغرية.

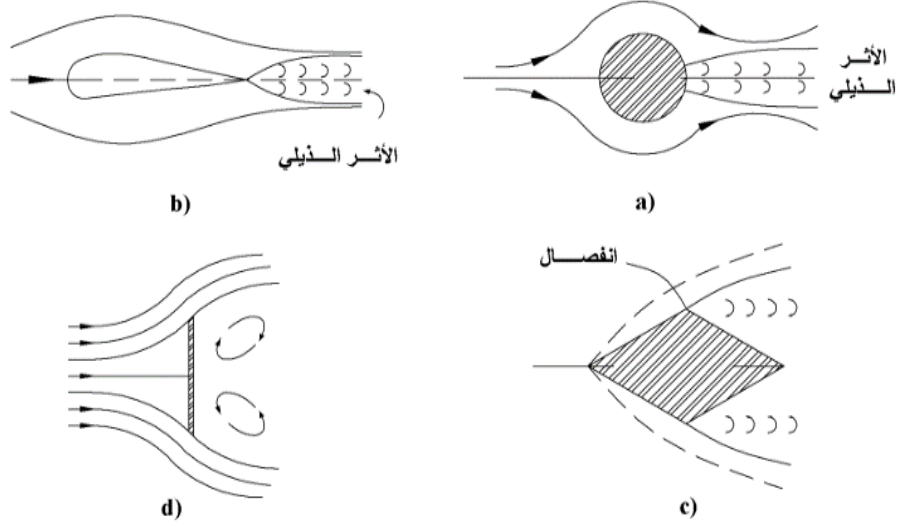
كما أن الانفصال يحدث عند التغيرات الفجائية في ميل السطوح الصلبة بصورة أكثر احتمالاً

من حدوثه على السطوح الانسيابية.

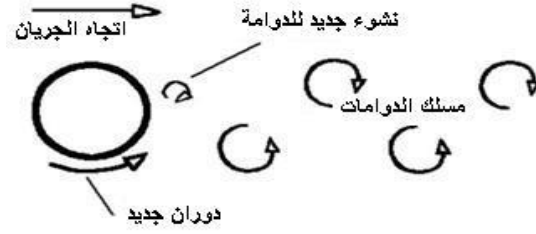
إذاً ظاهرة الانفصال لا تحدث إلا إذا كان تدرج الضغط موجباً، فالطبقة الحدية على سطح

صفيحة مستوية لا يمكن أن تنفصم، أما في السائل المثالي فإن ظاهرة الانفصام غير ممكنة إطلاقاً،

نظراً لعدم وجود طبقة حدية في جريان السائل المثالي.



الشكل (8-2): حدوث الانفصال وعلاقته بالتغيرات الفجائية في ميل السطوح الصلبة



الشكل (9-2): الأعاصير المتشكلة واتجاه حركتها بالنسبة للجريان.

إنَّ ظاهرة الانفصال ملاحظة في الطبقة الحدية الصفائحية والمضطربة، وتحدث للأسباب نفسها

في كليهما. على أن الطبقات الحدية الصفائحية تتعرض للانفصال بسهولة أكبر من الطبقات الحدية المضطربة.

وسبب ذلك أن معدل ازدياد السرعة مع الابتعاد عن السطح يكون أصغر في الطبقات الحدية

الصفائحية، ويستطيع تدرج الضغط الموجب أن يوقف الجريان بصورة أسرع في هذه الحالة.

أما الطبقة الحدية المضطربة فإن سرعة المزج فيها تساعد على الاستمرار (تأخر الانفصال).

إن لدراسة الجريان في الأثر الذيلي خلف الأجسام أهمية بالغة خاصة في التطبيقات العملية فالضغط خلف الجسم لا يتوزع بشكل متناظر، ويسبب هذا الأمر تولد مقاومات إضافية إلى جانب مقاومة قوى الاحتكاك. [23]

حين تنفصل الطبقة الحدية عن سطح معرّض لقوة رفع تزداد قوة الجر على الجسم بمعدلات كبيرة، كما أنّ قوة الرفع تتأثر بشدة وتتعرض لهبوط فجائي في قيمتها.

2-6- معادلة الاستمرار: [21]

التي تأخذ شكلها التفاضلي العام بالمعادلة (2-48) ومنها يمكن صياغة المعادلة (2-49) وهي حالة خاصة من المعادلة (2-48) تعبر عن مصونية كتلة الجريان في مقاطع الجريان كافة.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2-48)$$

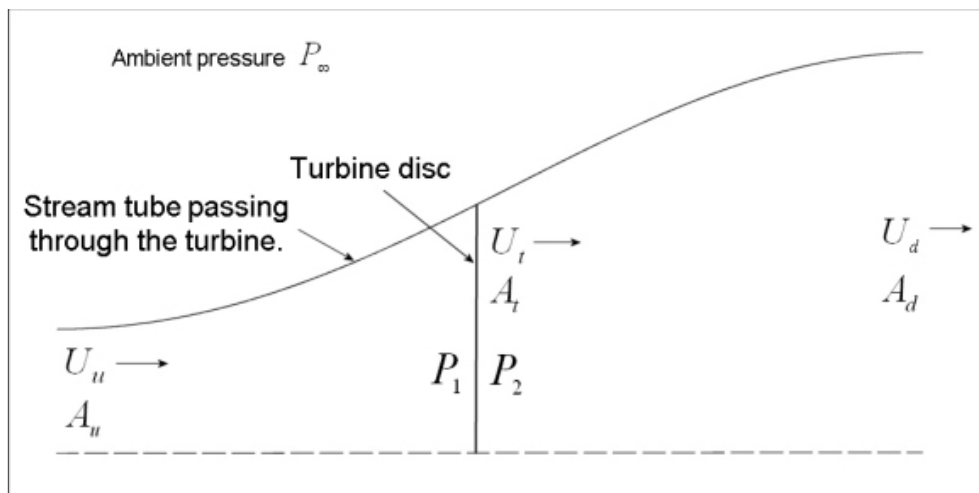
$$\rho \cdot U_A \cdot A_A = \rho \cdot U_t \cdot A_t \dots\dots\dots (2-48)$$

يوضح الشكل (2-10) مبدأ مصونية الكتلة في معادلة الاستمرار.

من خلال هذه المعادلة نجد أنّ هناك بارامترات غير قابلة للتغير مثل سرعة الرياح الواردة إلى

الدوار U_u ومساحة الدوار الريحي A_t ولكن بالإمكان إجراء تعديل على شكل الأنبوبة التي يمر فيها

الرياح إلى الدوار الريحي A_u وبالتالي يمكن زيادة التدفق الكتلي حول الدوار في القناة. [17]



الشكل (10-2): توضيح لمصونية الكتلة في معادلة الاستمرار.

الفصل الثالث

الدراسة العددية

والحاسوبية

- تمهيد :

تعدّ الدراسة العددية من أهم الطرق وأسرعها للحصول على بارامترات الجريان والمعاملات الأيروديناميكية، وخاصة في ظل صعوبة إجراء الدراسات التجريبية والتحليلية في الجريانات دون الصوتية. تمّت دراسة الجريان لعدد من الناشرات بتصاميم مختلفة، وفي هذا البحث سيتم عرض مخططات السرعة والضغط لأسوأ تصميم وأفضل تصميم مع وبدون حافة، حيث تمّت الدراسة العددية باستخدام برنامج ANSYS(R19) وذلك لإيجاد مخططات الضغط والسرعة لكلّ من الناشرتين، بهدف تحليل السلوك الأيروديناميكي للهواء الذي يدخل ضمنهما. تم استخدام شبكة ذات عناصر سداسية. لدى دراسة أي ظاهرة فيزيائية فإنه توجد ثلاث طرق: الطريقة التجريبية، التحليلية، والعددية، وكذلك الحال بالنسبة لدراسة الجريانات ففي الطريقة التجريبية تتم الاستعانة بالأنفاق الهوائية حيث يتم صنع نموذج مصغر للجسم المدروس ووضعه داخل النفق الهوائي ثم أخذ القياسات من حساسات على المتن أو محور التثبيت؛ أما الطريقة التحليلية فتعتمد على حل المعادلات التفاضلية النازمة للجريان، الطريقة الثالثة تتم بالاستعانة ببرامج التحليل العددي للجريانات مثل برنامج ANSYSY وتمتاز برامج التحليل العددي بمرونة العمل ورخص كلفة الحل، وقد وصلت بعض الشركات البحثية والتجارية إلى الاستغناء عن التجريب والأنفاق الهوائية والاكتفاء بالدراسات العددية نظراً لدقة ووثوقية الحلول التي تعطيها البرامج

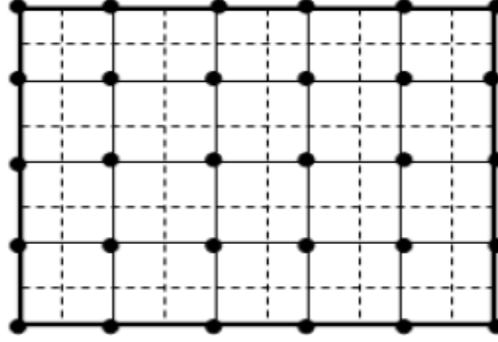
3-1- الطرق العددية لحل معادلات نافير-ستوكس (طريقة العناصر المنتهية):

هي من أكثر الطرق شيوعاً في حل الجريانات عددياً، تقوم هذه الطريقة على تقسيم منطقة

الجريان، حجم المراقبة، إلى مجموعة من الحجوم الجزئية الصغيرة، كما في الشكل (1-3) حيث يتم

تخزين وحساب البارامترات في منتصف كل حجم منتهٍ عبر تقطيع معادلة الانتقال Transport

Equation ومكاملتها على كل حجم منتهٍ Ω مبين في الشكل (2-3).



الشكل (1-3): شبكة الحجوم الجزئية



الشكل (2-3): الحجم الجزئي Ω

ستتم الدراسة العددية بواسطة برنامج ANSYS CFX، يعتمد هذا البرنامج على تعريف شبكة

مناسبة للنموذج المدروس، ومن ثم تقطيع المعادلات النازمة باستخدام حجم المراقبة، إلى مجموعة من

الحجوم الجزئية الصغيرة وتخزين البارامترات وحسابها في مركز كل حجم منتهٍ، وبالتالي تحويل

المعادلات التفاضلية النازمة للجريان إلى مجموعة معادلات جبرية. وأخيراً يتم حل جملة المعادلات الجبرية الناتجة بأحد الطرق التكرارية.:

الجسم المدروس هو عبارة عن ناشرة، تمّ رسم الناشرتين عن طريق برنامج solidwork وتصديرهما إلى Ansys CFX بلاحقة IGS. حيث يتم تقسيم الجسم المدروس إلى شبكة (Mesh) تؤثر نعومة الشبكة في دقة الحل، وينخفض الخطأ بزيادتها، ولكن بالوقت نفسه فإنّ تنعيم الشبكة يعتمد إلى حد كبير على مواصفات الجهاز المستخدم (الحاسوب).

بعد إرسال الشكل الهندسي "المُقطّع إلى حجّوم منتهية" إلى بيئة CFX، تم تحديد المعادلات التي سيتم حلها وهي (معادلات نافير ستوكس، الاستمرار)، وتم اختيار مادة الجريان وخواصها وهي الهواء في الشروط النظامية، وطبقت الشروط الحديّة على مداخل حجم المراقبة المدروس ومخارجه. وتم أيضاً تحديد القيم المرجعية مثل الضغط المرجعي، درجة الحرارة... الخ، وأخيراً تم إعطاء قيمة ابتدائية للحل ولعدد التكرارات وفي هذا البحث تمّ اعتماد 100 دورة للحل. نلخص قيم أهم ما ذكر أعلاه، والمستخدم في الحالات المدروسة بالجدولين (1-3)، (2-3).

الجدول (1-3): أهم البارامترات والقيم المرجعية وطرق الحل والتقطيع

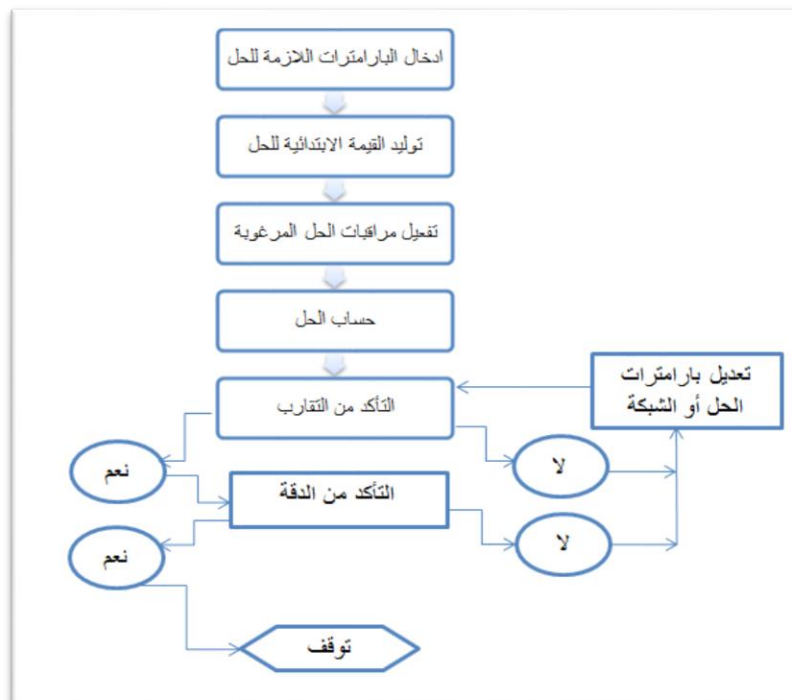
البارامتر	القيمة [الواحدة]
مادة الجريان	هواء في الشروط النظامية
الحل مستقر أم عابر	مستقر
دقة الشبكة	88%
عدد النقاط (العقد)	3089000

عدد العناصر الحجمية	2270000
نموذج الاضطراب	SST
عدد دورات الحل	100

الجدول (2-3): الشروط الحدية

الشروط الحدية	
نوع الجريان	تحت صوتي
الضغط المرجعي	1bar
درجة الحرارة	25 ⁰ C

يوضح الشكل (3-3) خوارزمية الحل التي يتبعها البرنامج في حل المعادلات.



الشكل (3-3): خوارزمية الحل في البرنامج

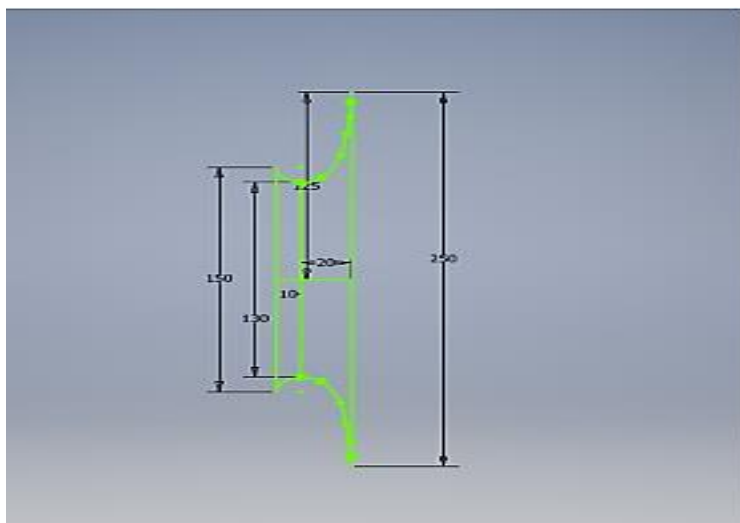
تمّت دراسة تصميمين مختلفين لناشريتين مع وبدون حافة كما تبين الأشكال (5-3) و(6-3)

على التوالي، وإجراء المحاكاة عليهما عند الشروط الحديّة نفسها المذكورة سابقاً، وذلك عند سرعات رياح

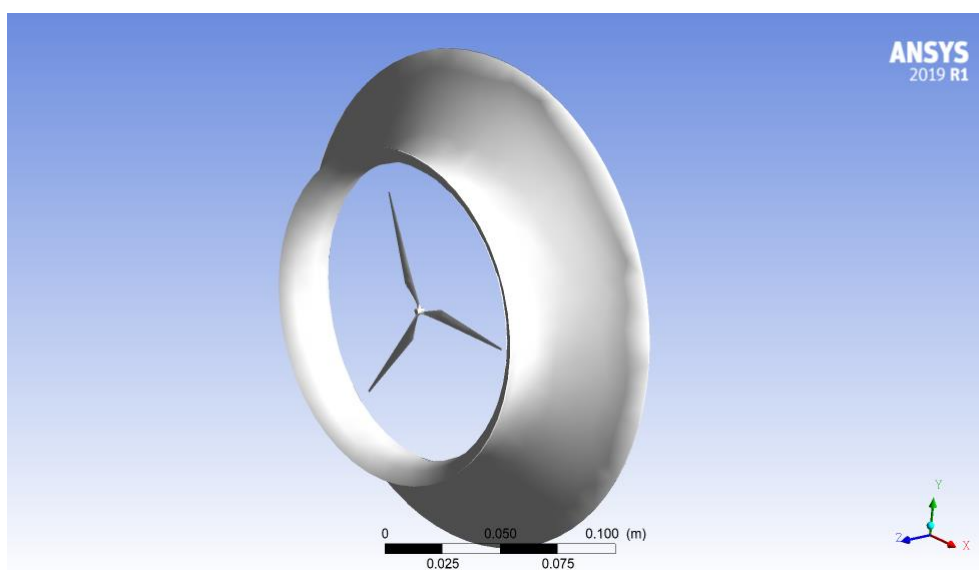
مختلفة m/s (3,6,8).

3-2- النموذج الأول:

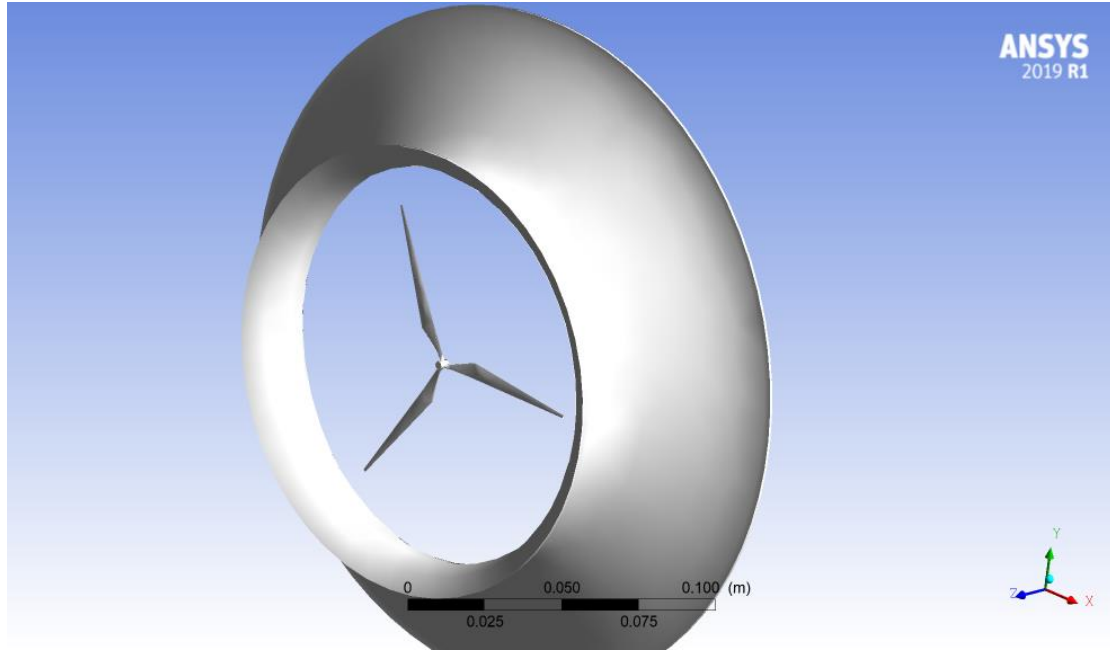
يوضح الشكل (4-3) شكل وأبعاد النموذج الأول المدروس.



الشكل (4-3): أبعاد النموذج الأول



الشكل (5-3): شكل النموذج الأول بدون حافة



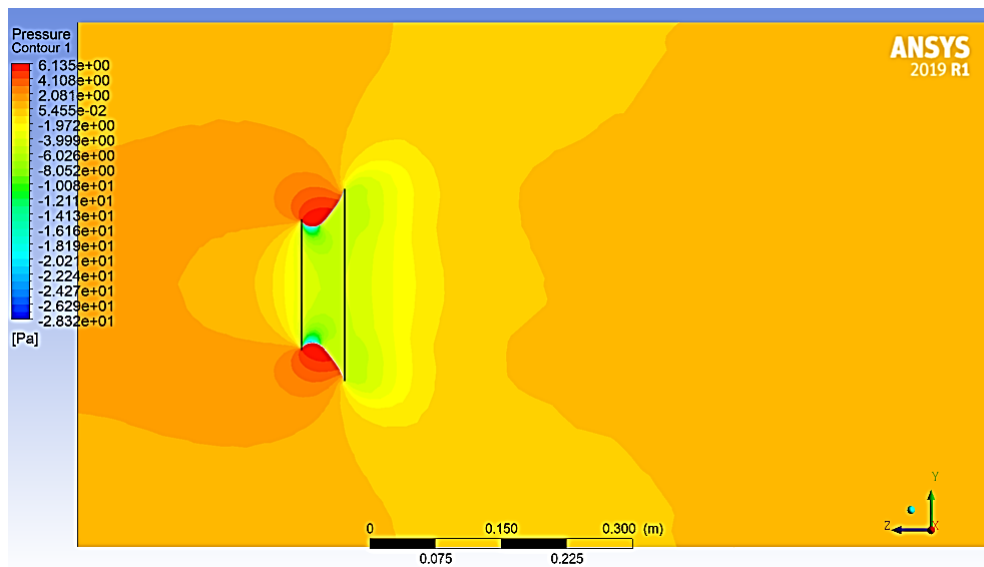
الشكل (6-3): شكل النموذج الأول مع حافة

حيث أن الحافة في هذا النموذج تساوي 2% من قطر مقطع الخروج.

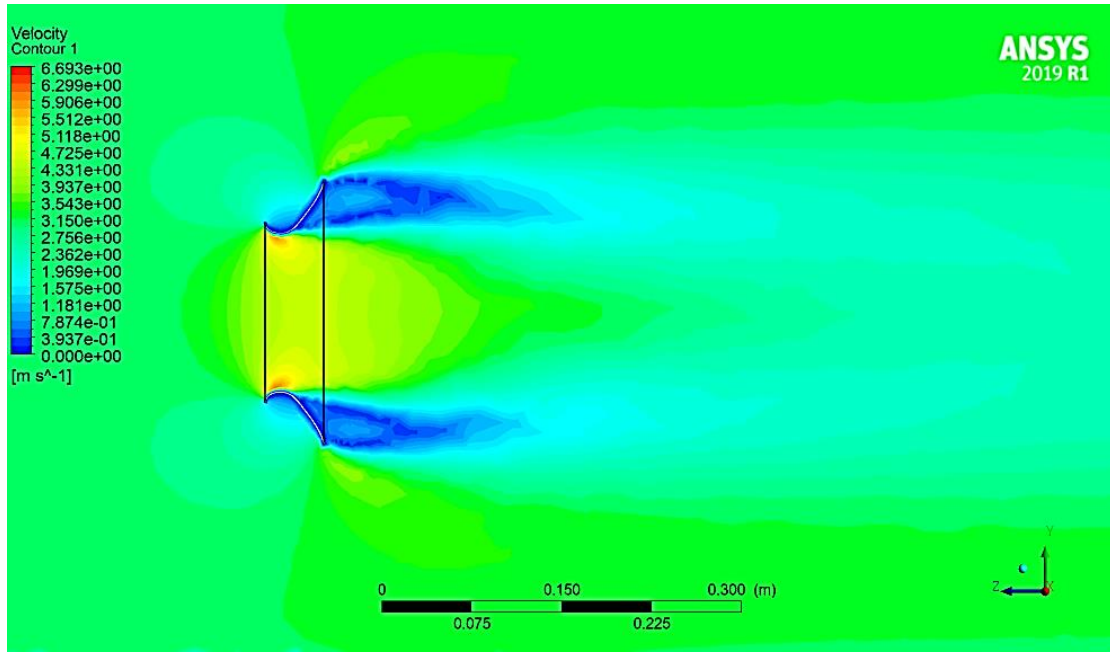
3-2-1- نتائج المحاكاة للنموذج الأول بدون حافة عند سرعة رياح اسمية 3m/s:

نلاحظ تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 3m/s في الشكل (7-3). أما

الشكل (8-3) فهو يوضح تدرج السرعة للنموذج الأول بدون حافة عند السرعة 3m/s.



الشكل (7-3): تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 3m/s.

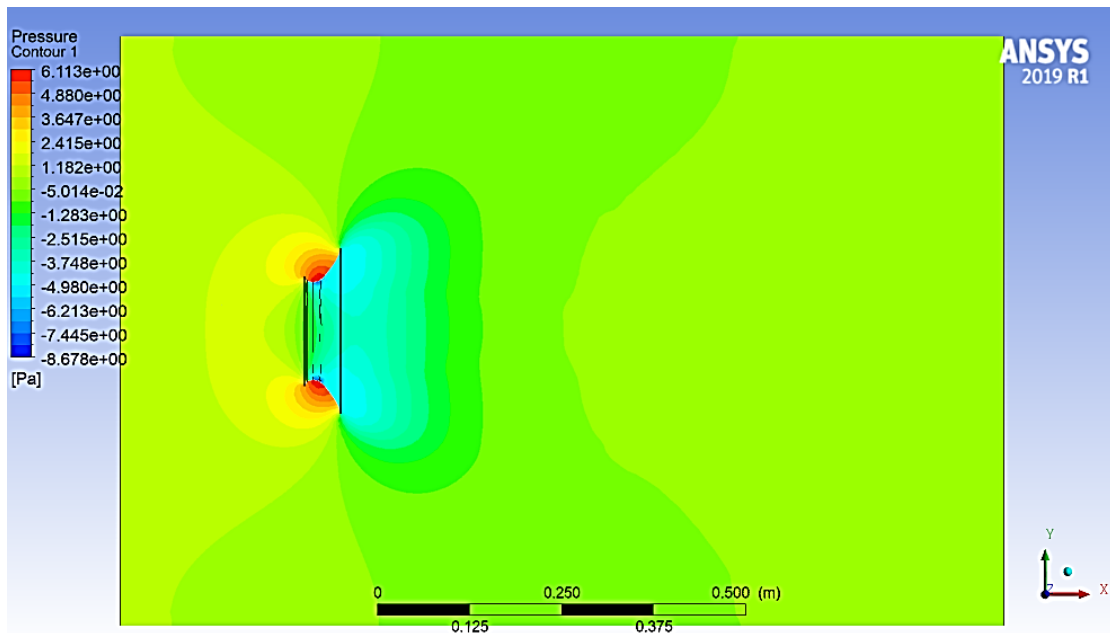


الشكل (8-3): تدرج السرعة للنموذج الأول بدون حافة عند السرعة 3m/s.

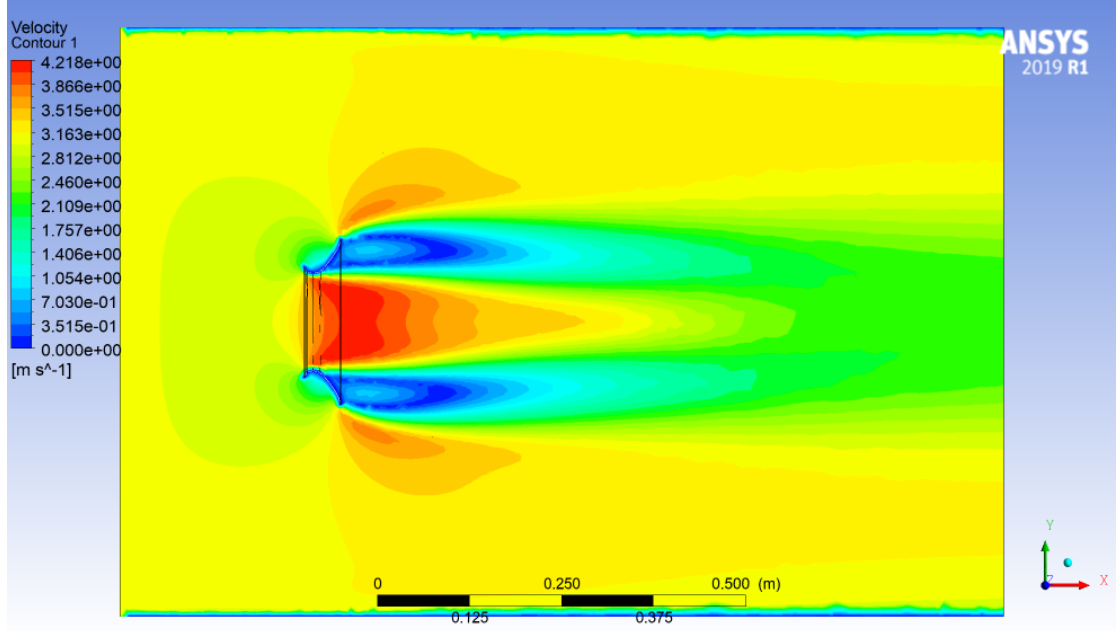
3-2-2- نتائج المحاكاة للنموذج الأول مع حافة عند سرعة رياح اسمية 3m/s:

يوضح الشكل (9-3) تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 3m/s. والشكل

(10-3) يوضح تدرج السرعة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 3m/s.



الشكل (9-3): تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 3m/s.



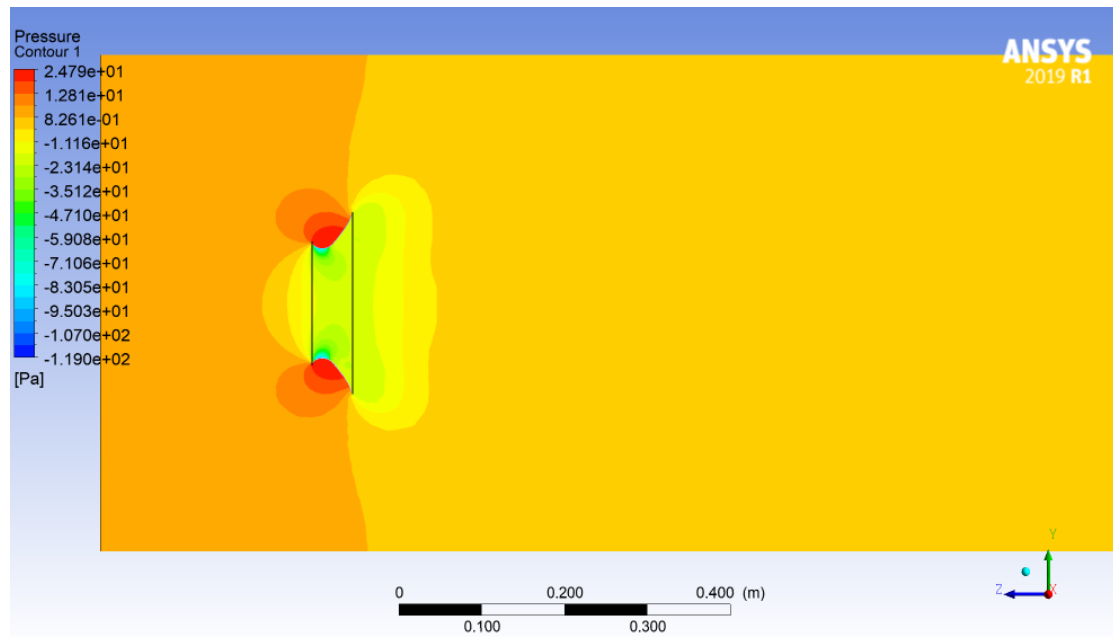
الشكل (10-3): تدرج السرعة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 3m/s.

مما سبق نلاحظ إن التعديل الذي تم على هذا النموذج بإضافة حافة قائدة لم يعطِ التأثير الإيجابي المرجو منه على زيادة السرعة ضمن الناشرة عند السرعة الاسميّة 3m/s. ومن مخططات السرعة عند القيمة 3m/s في النموذج الأول بدون حافة نلاحظ تشكّل منطقة اضطراب عشوائي وتشتت للرياح خلف الناشرة، هذه العشوائية والتصادم بين جزيئات الهواء قد تؤدي إلى أعاصير مرتبطة إذا كان التصادم كبيراً، أما مع وجود حافة كان الاضطراب أكثر انتظاماً وانسيابية وهذا يمنع التداخل بين جزيئات الهواء حيث أن وجود الحافة قد قوّم المسار وخفّف من تأثير الأثر الذيلي.

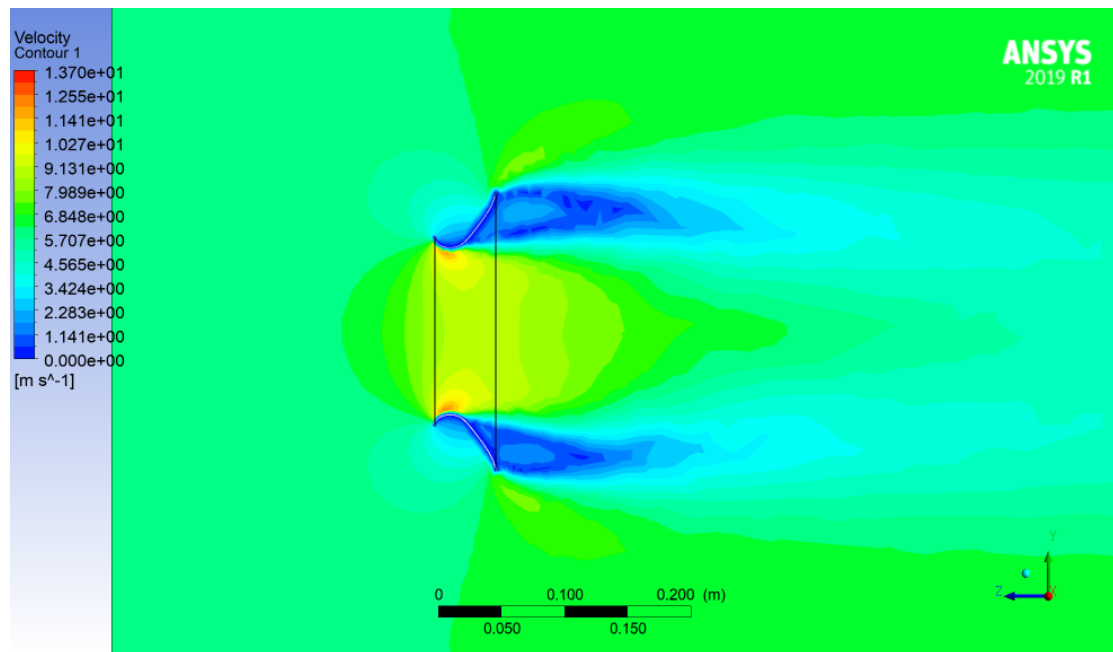
3-2-3- نتائج المحاكاة للنموذج الأول بدون حافة عند سرعة رياح اسميّة 6m/s:

يوضح الشكل (11-3) تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 6m/s. والشكل

(12-3) يوضح تدرج السرعة للنموذج الأول بدون حافة عند السرعة 6m/s.



الشكل (11-3): تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 6m/s.

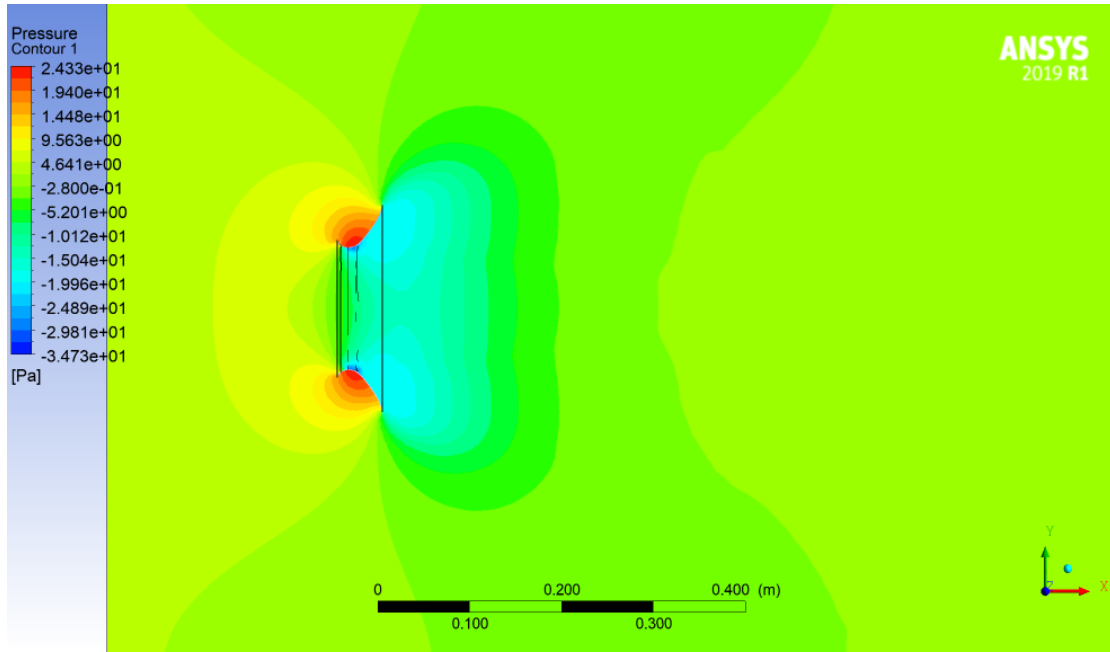


الشكل (12-3): تدرج السرعة في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 6m/s.

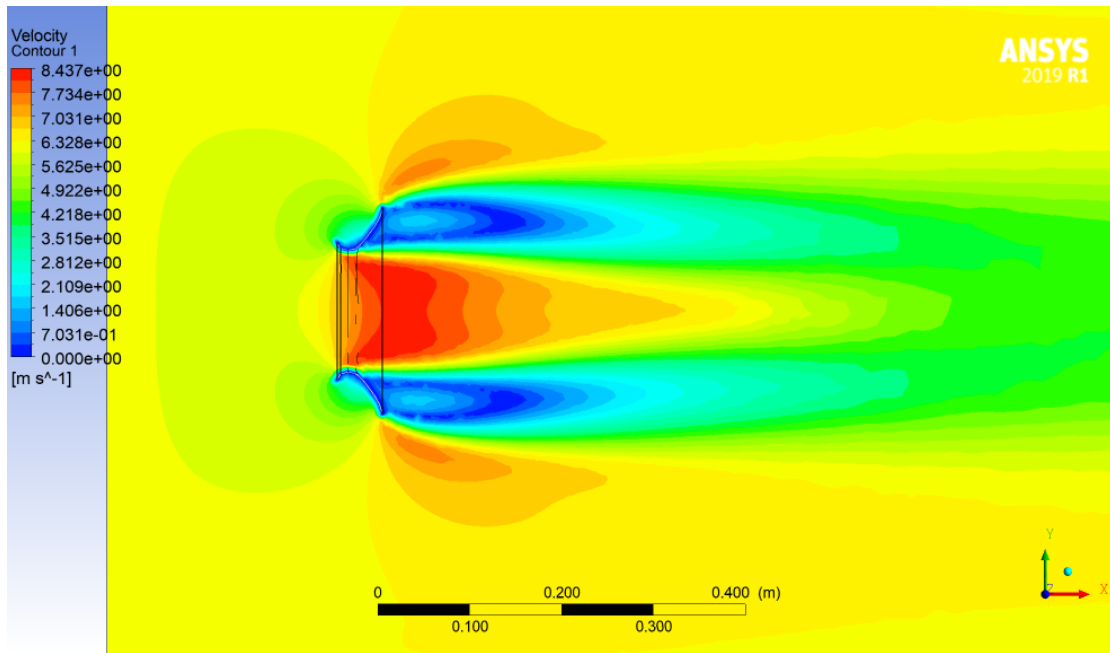
3-2-4- نتائج المحاكاة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s:

نلاحظ تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s في الشكل (13-3). أما

الشكل (14-3) فهو يوضح تدرج السرعة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s.



الشكل (3-13): تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s.



الشكل (3-14): تدرج السرعة في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 6m/s.

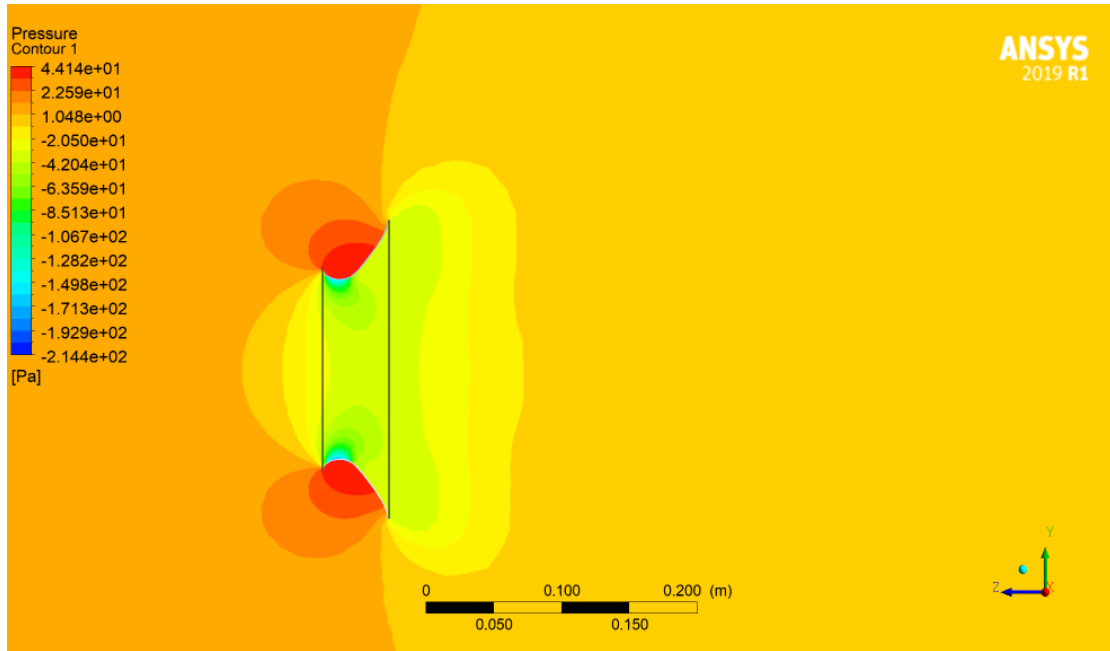
من النتائج السابقة لهذا النموذج مع وبدون حافة عند سرعة رياح 6m/s نلاحظ انخفاض كبير ومفاجئ في الضغط خلف النموذج، وبالتالي ازدادت السرعة خلف النموذج بدلاً من داخلها ، الانخفاض المفاجئ بالضغط يؤدي أيضا إلى عدم الاستقرار في الجريان، وقد يؤدي إلى فجوة هوائية يتم فيها جذب جزيئات الهواء ذات الطاقة التي يمكن الاستفادة منها باتجاه ما قد يكون ذا تأثير عكسي سلبي

لعدم وجود انسيابية في الجريان حيث يعزى هذا الانخفاض المفاجئ لعدم انسجام فروق الأقطار وشكل الناشرة وارتفاع الحافة حيث نلاحظ أيضًا تشكّل أعاصير غير منتظمة مع اضطراب خشن في هذا النموذج مع حافة وبدونها.

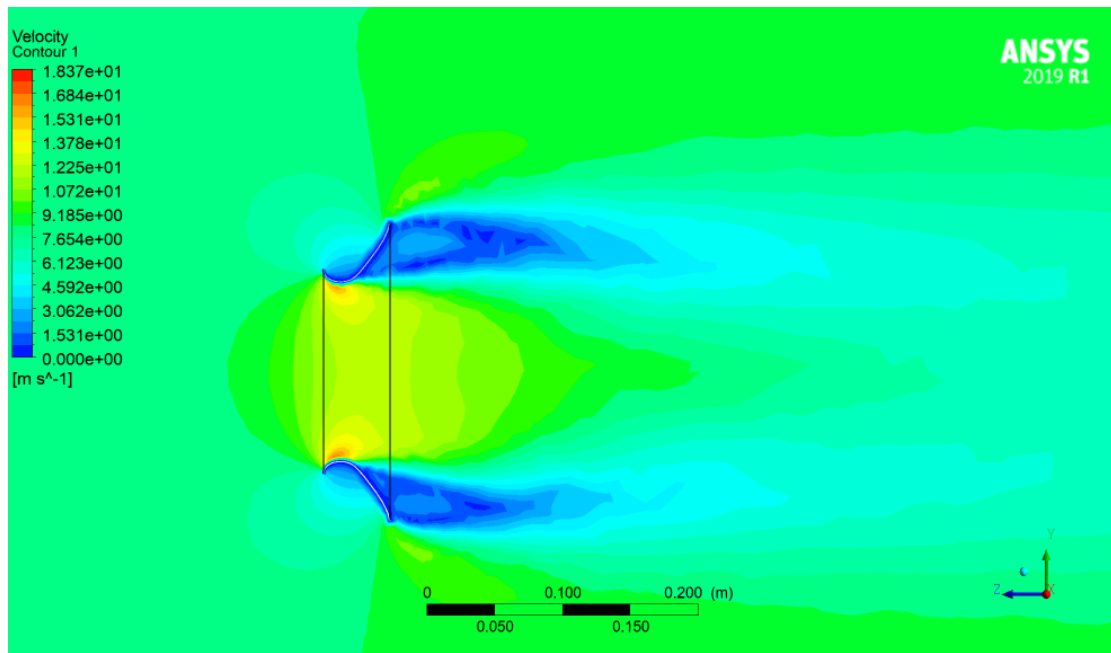
3-2-5- نتائج المحاكاة للنموذج الأول بدون حافة عند سرعة رياح اسميّة 8m/s:

يوضح الشكل (3-15) تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 8m/s. والشكل

(3-16) يوضح تدرج السرعة للنموذج الأول بدون حافة عند السرعة 8m/s.



الشكل (3-15): تدرج الضغط في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 8m/s.

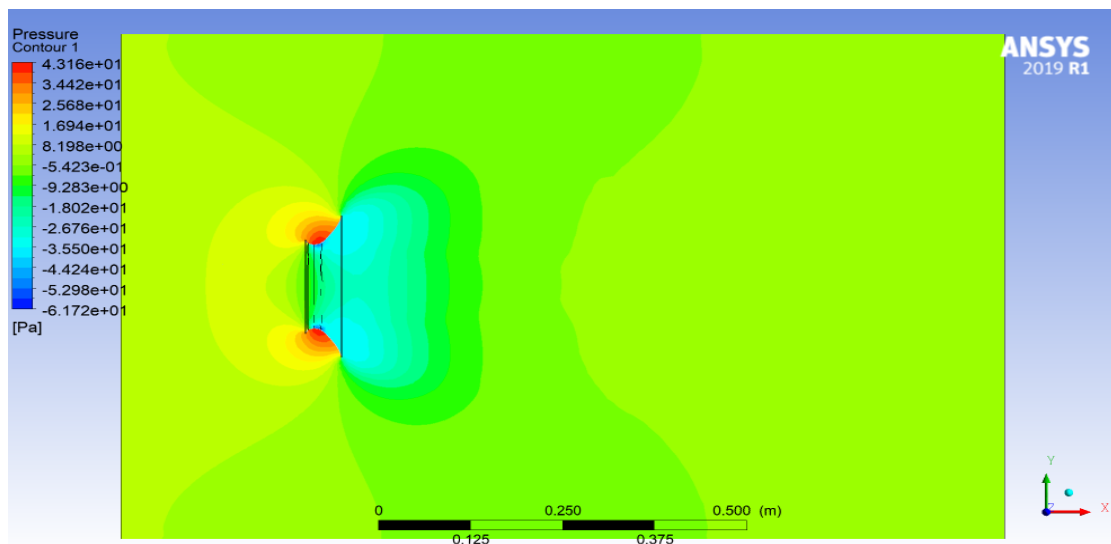


الشكل (16-3): تدرج السرعة في النموذج الأول بدون حافة عند السرعة 8m/s.

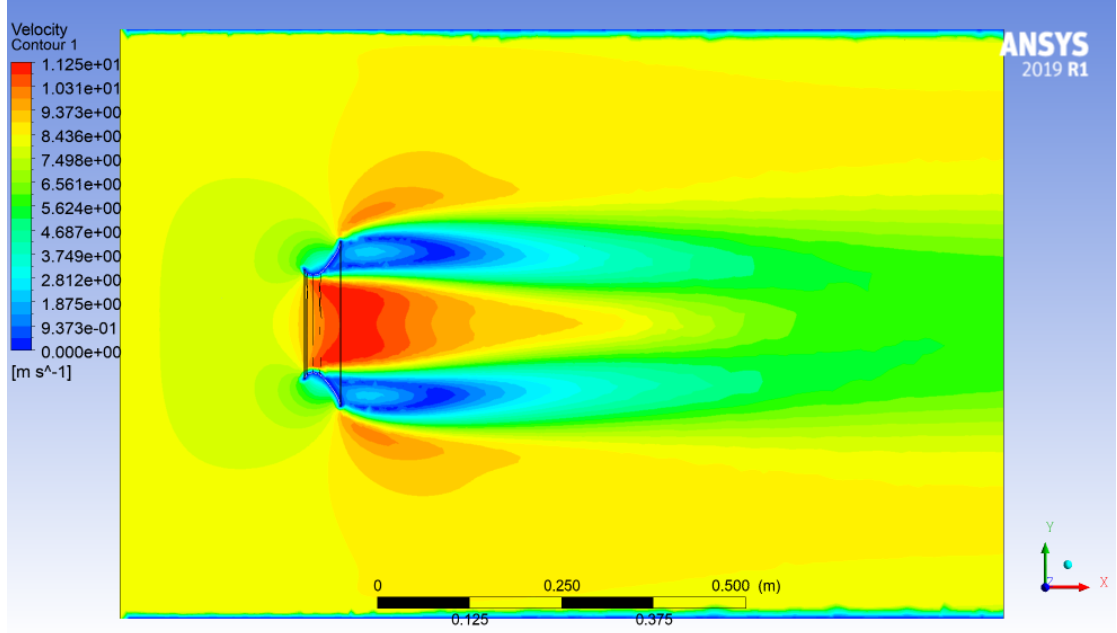
3-2-6- نتائج المحاكاة للنموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s:

في الشكل (17-3) نلاحظ تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s. يبين

أيضاً الشكل (18-3) تدرج السرعة في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s.



الشكل (17-3): تدرج الضغط في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s.



الشكل (18-3): تدرّج السرعة في النموذج الأول مع حافة عند السرعة 8m/s.

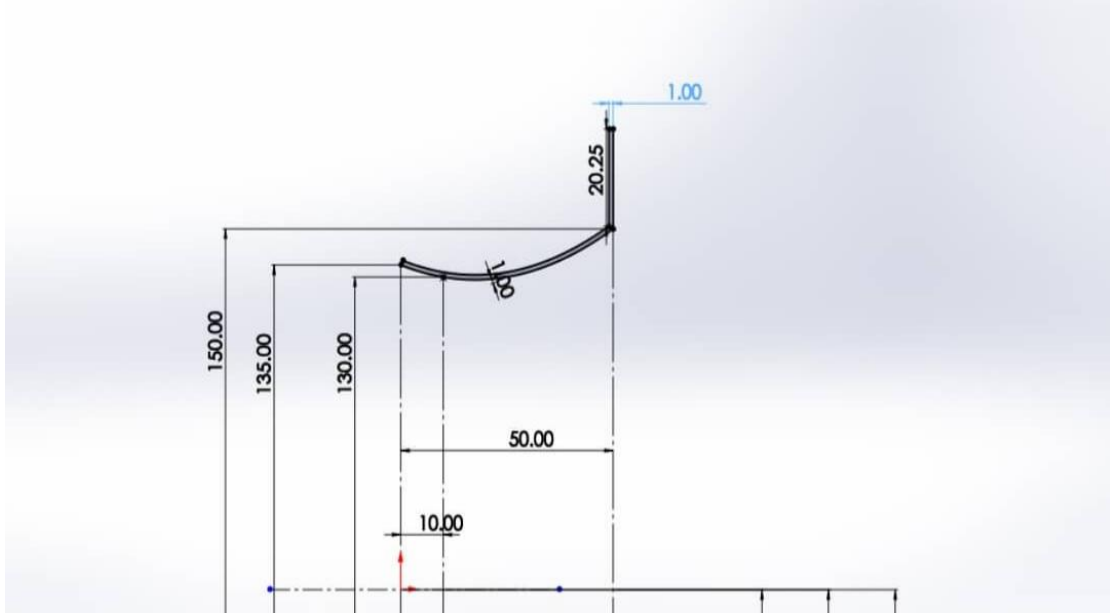
من مخططات تدرّج السرعة والضغط في النموذج الأول مع وبدون حافة عند السرعة 8m/s، نلاحظ عند ازدياد سرعة دخول الهواء في هذا النموذج مع حافة حصلنا على نتيجة مغايرة فيزيائياً ومعاكسة حيث حصلنا على زيادة أكبر في السرعة ضمن الناشرة في النموذج بدون حافة مقارنة بالنموذج نفسه مع حافة. لذا فإن سلبية هذا النموذج في المنطقة خلف النموذج وشكل المنحني لأن تدرّج الانحناء فيه أقرب إلى قوس الدائرة، واختلاف الأقطار الكبير بين مقطع الدخول والتضيّق والخروج بالإضافة إلى صغر ارتفاع الحافة مقارنة بقطر الخروج حيث أن ارتفاع الحافة تعادل 2% فقط من قطر الخروج، لذا حصلنا على نتيجة سلبية كلما ازدادت سرعة الدخول في نموذج مع حافة.

يجب التصميم بحيث يتم تقليل زيادة الضغط الموجب ضمن الناشرة مقارنة بقيم الضغوط خلفها، وذلك لتأخير ظاهرة الانفصال وإبعادها إلى الخلف، وزيادة مساحة منطقة الأثر الذيلي خلف النموذج لكي لانسجم بتشكّل الجذيلة الإعصارية بالقرب من النموذج أو ضمنه.

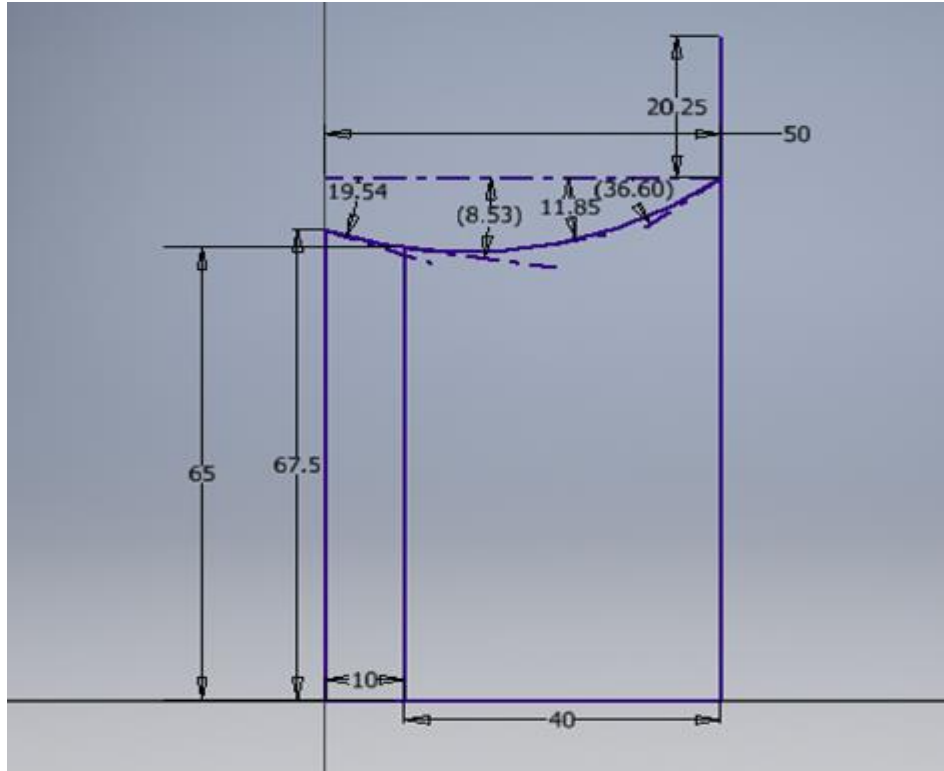
3-3- النموذج الثاني:

يوضح الشكل (19-3) والشكل (20-3) أبعاد النموذج الثاني للناشرة والزوايا التصميمية لها

(زوايا الميل).



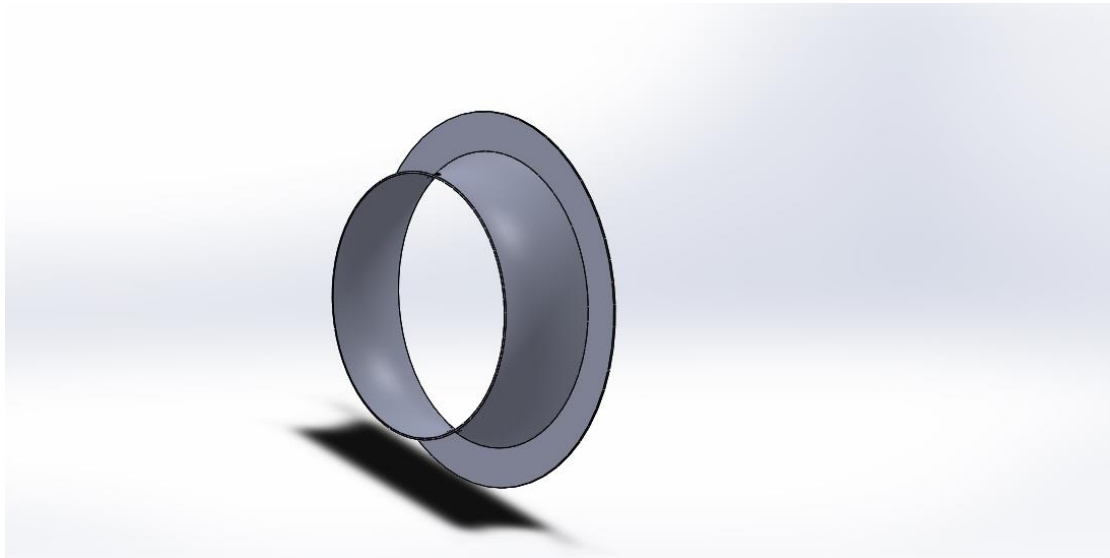
الشكل (19-3): أبعاد النموذج الثاني.



الشكل (20-3): الزوايا التصميمية للناشرة المدروسة (زوايا ميل)

يوضح كل من الشكلان (21-3) و(22-3) على التوالي، شكل النموذج المدروس مع وبدون

حافة.



الشكل (21-3): شكل النموذج الثاني مع حافة.

حيث أن طول الحافة في هذا النموذج يعادل 15% من القطر المتضيق D.



الشكل (22-3): شكل النموذج الثاني بدون حافة

التابع الرياضي الناظم لانحناء النموذج الثاني:

الشكل العام للتابع الرياضي هو من الدرجة الثانية كما هو موضح بالعلاقة (1-3).

$$y = ax^2 + bx + c \dots\dots\dots (1-3)$$

ومن أجل تحديد ثوابت هذا التابع، تم تشكيل ثلاث معادلات بثلاثة مجاهيل كالتالي:

$$x = 0$$

$$\therefore y = c$$

وبحل هذه المعادلات تم إيجاد قيم الثوابت كما يلي:

$$a = 0.01$$

$$b = -0.35$$

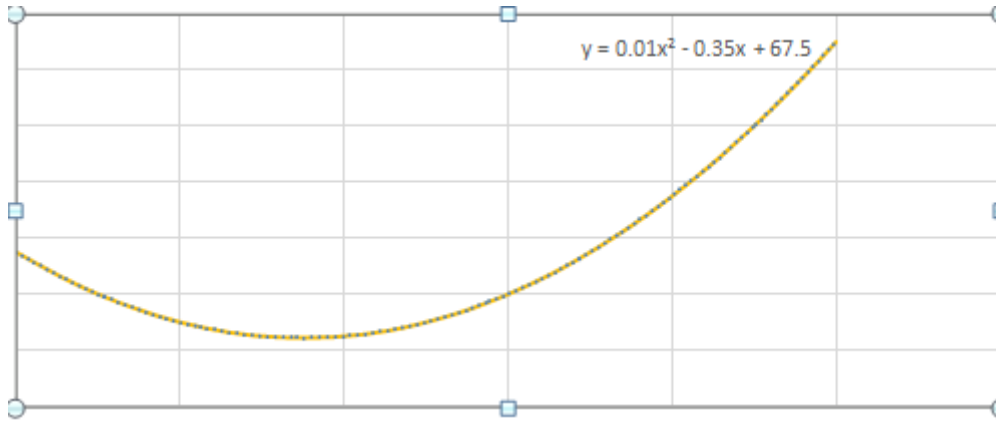
$$c = 67.5$$

وبتعويض قيم الثوابت في الشكل العام ينتج لدينا التابع الرياضي الناظم لانحناء النموذج الثاني في

المعادلة (2-3)، حيث تم التأكد من الحل بالاستعانة ببرنامج SolidWorks. يبين الشكل (23-3) شكل

منحني التابع الرابع الرياضي الناظم لانحناء النموذج الثاني.

$$y = 0.01x^2 - 0.35x + 67.5 \dots\dots\dots (2-3)$$



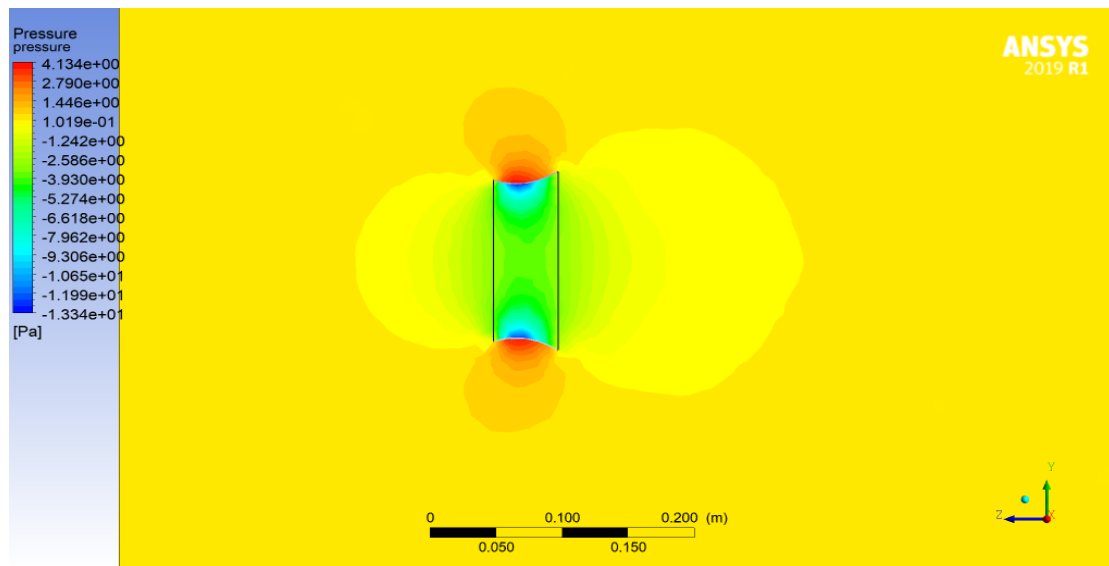
الشكل (23-3): التابع الرياضي الناظم لتدرج انحناء النموذج الثاني.

3-3-1- نتائج محاكاة النموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 3m/s:

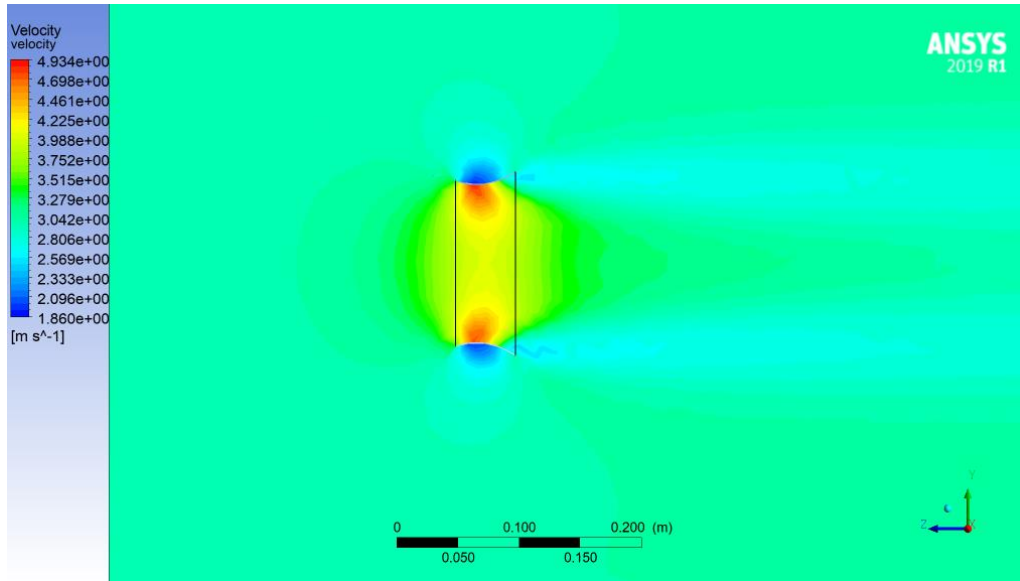
يبين الشكل (24-3) النتائج الحاسوبية لتدرج الضغط في النموذج الثاني بدون حافة عند السرعة

3m/s. أما الشكل (25-3) فيبين النتائج الحاسوبية لتدرج السرعة للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة

3m/s



الشكل (24-3): تدرج الضغط للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 3m/s.



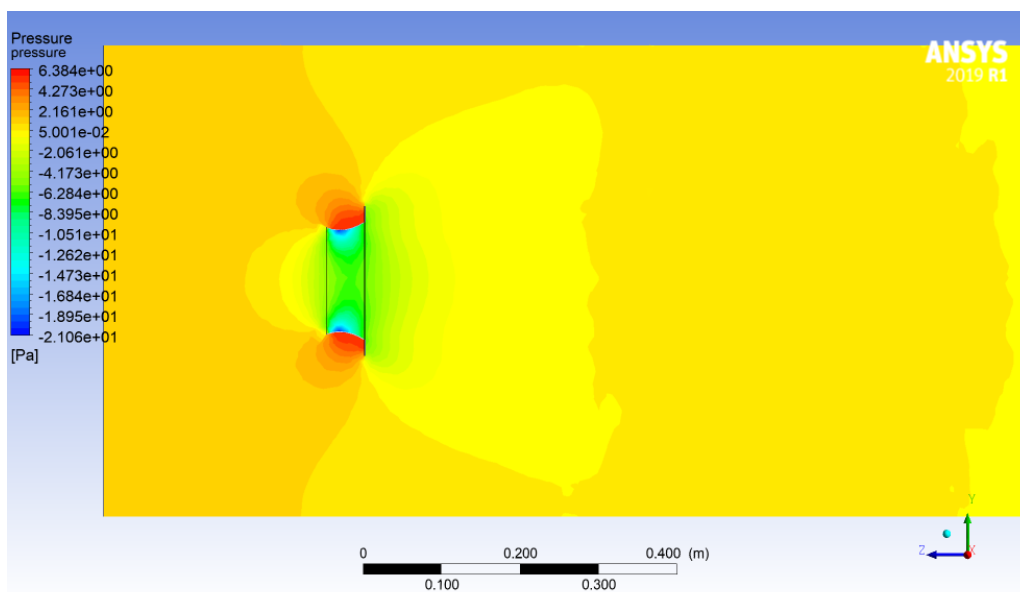
الشكل (25-3): تدرج السرعة للنموذج الثاني بدن حافة عند السرعة 3m/s.

3-3-2- نتائج محاكاة النموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s:

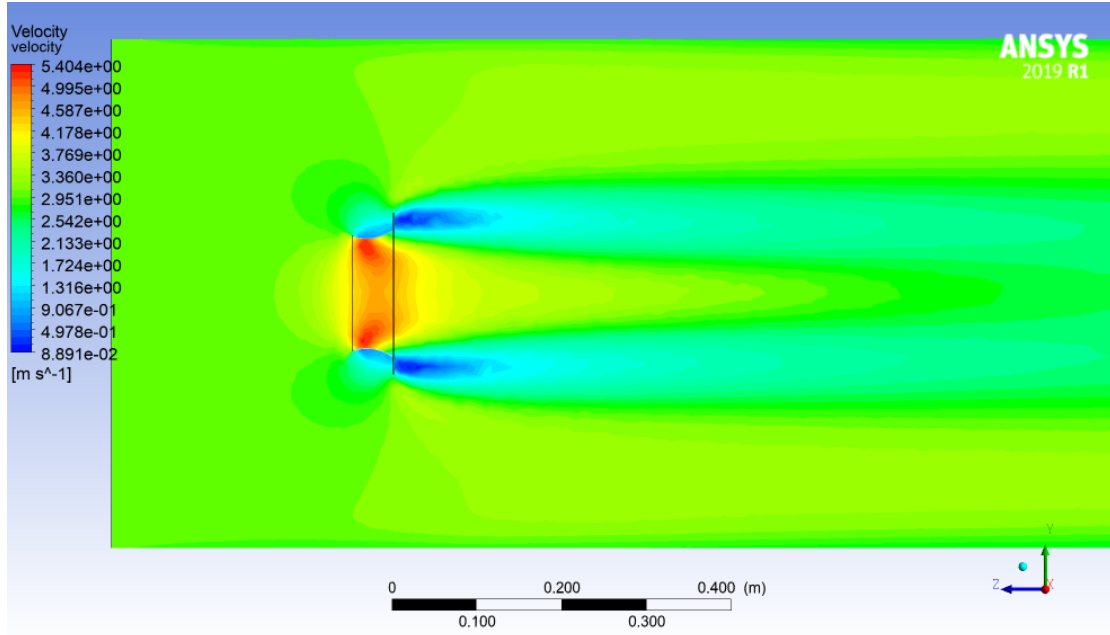
يوضح الشكل (25-3) النتائج الحاسوبية لتدرج الضغط في النموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 3m/s. ويوضح الشكل (26-3) النتائج الحاسوبية لتدرج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 3m/s.

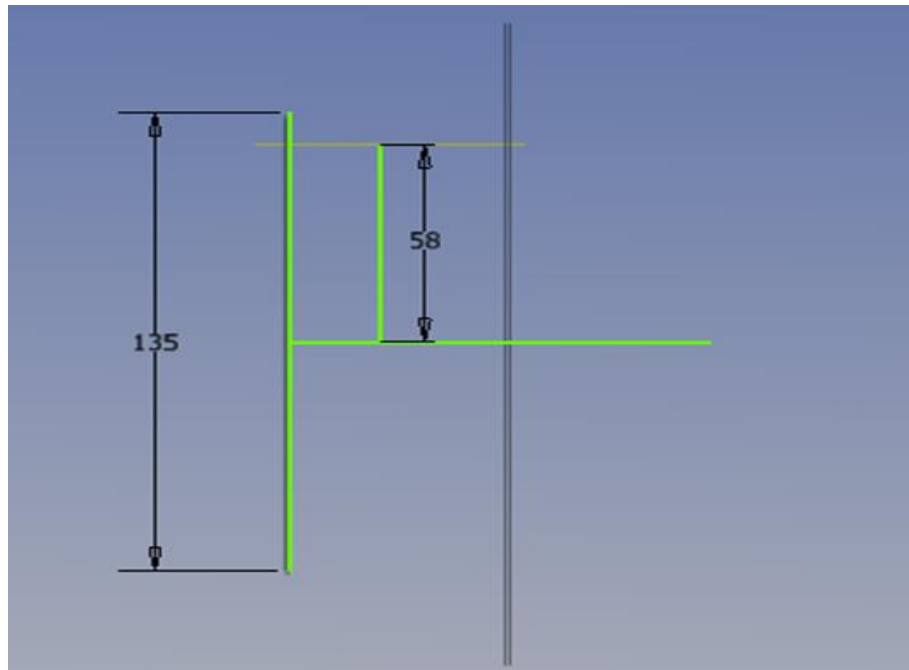


الشكل (26-3): تدرج الضغط للنموذج الثاني مع حافة عن السرعة 3m/s.



الشكل (27-3): تدرج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s.

تم أخذ قيم خمس نقاط على امتداد الناشرة من مدخلها إلى مخرجها، بين كل نقطتين 1cm على طول محور يوازي محور منتصف الناشرة ويبعد عنه مسافة 5.8cm وذلك في الحالتين مع وبدون حافة، كما هو مبين في الشكل (28-3).



الشكل (28-3): موقع المحور الذي تم أخذ القراءات الخمس عليه.

وكانت النتائج كما يلي:

حيث يوضح الجدول (3-3) قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني

مع حافة، عند سرعة رياح اسميّة 3m/s. ويبين الجدول (4-3) قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط

على طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسميّة 3m/s. نلاحظ تغيرات السرعة على طول

المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 3m/s في المخطط الموضح في الشكل

(29-3). أما مقدار انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند

السرعة 3m/s، فهي موضحة في المخطط في الشكل (30-3).

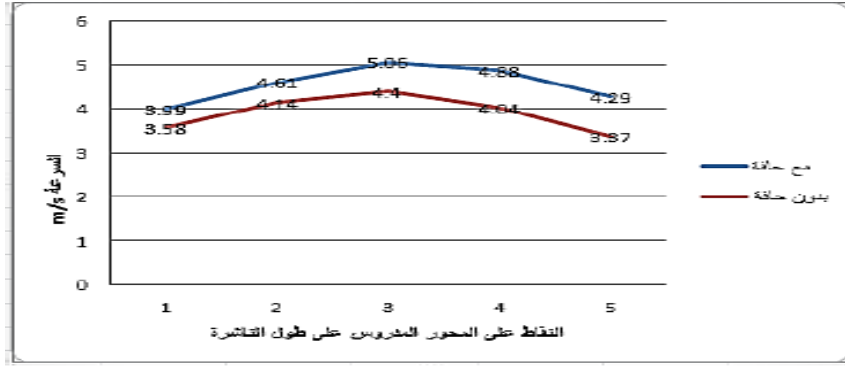
الجدول (3-3): يبين قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع حافة، عند سرعة رياح اسميّة 3m/s.

النقطة	السرعة m/s	مقدار انخفاض الضغط pa
1	3.99	3.5
2	4.61	6.23
3	5.06	8.68
4	4.88	7.87
5	4.29	4.59

الجدول (4-3): يبين قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسميّة

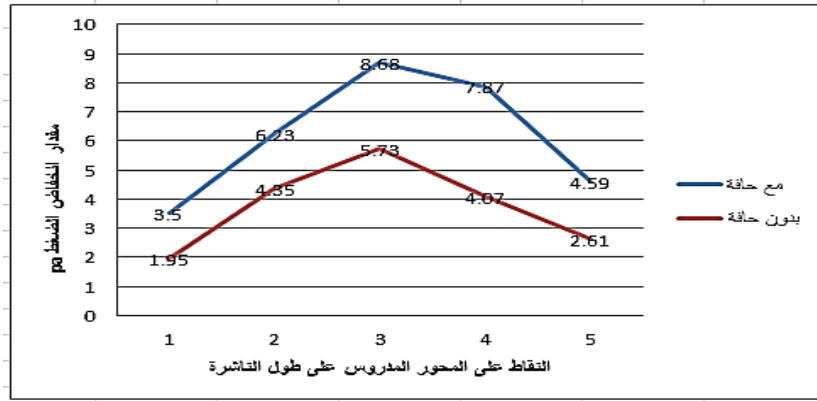
3m/s.

النقطة	السرعة m/s	مقدار انخفاض الضغط pa
1	3.58	1.95
2	4.14	4.35
3	4.40	5.73
4	4.04	4.07
5	3.37	2.61



الشكل (29-3): مخطط بياني يوضح تغير السرعة على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة

.3m/s



الشكل (30-3): مخطط بياني يوضح مقدار انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند

السرعة 3m/s

من النتائج السابقة نجد أنّ في حال وجود حافة قائمة يتشكّل لدينا انتشار مريح وواسع

للاضطراب في منطقة الهواء الراكدة، وهذا يدل على عدم السماح للأعاصير الناشئة في هذه المنطقة أن

ترتبط ببعضها بعض، وبالتالي الحفاظ على اضطراب ناعم وأعاصير حرة. في هذا النموذج بدون حافة

نلاحظ تشكّل منطقة صغيرة ذات ضغوط عالية خلف النموذج، ومنطقة تشكّل الاضطراب أصبحت أقل

امتدادا وبالتالي من الممكن أن تجتمع الأعاصير وترتبط مع بعضها فيتحول الاضطراب من ناعم إلى

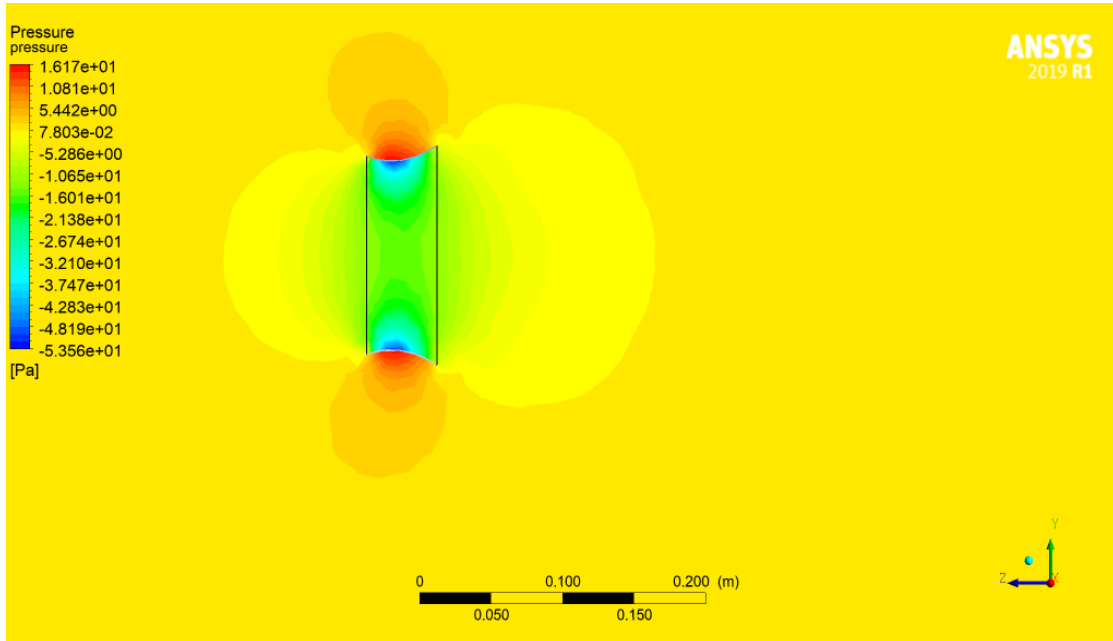
خشن فتتحول الأعاصير الحرة إلى مربوطة، مما قد يؤدي بعد فترة من الزمن وباختلاف سرعة الرياح إلى تشكل الجذيلة الإعصارية التي تعد أخطر ما يمكن ان يؤثر في الأداء الأيروديناميكي للنموذج.

3-3-3- نتائج محاكاة النموذج الثاني بدون حافة عند سرعة 6m/s:

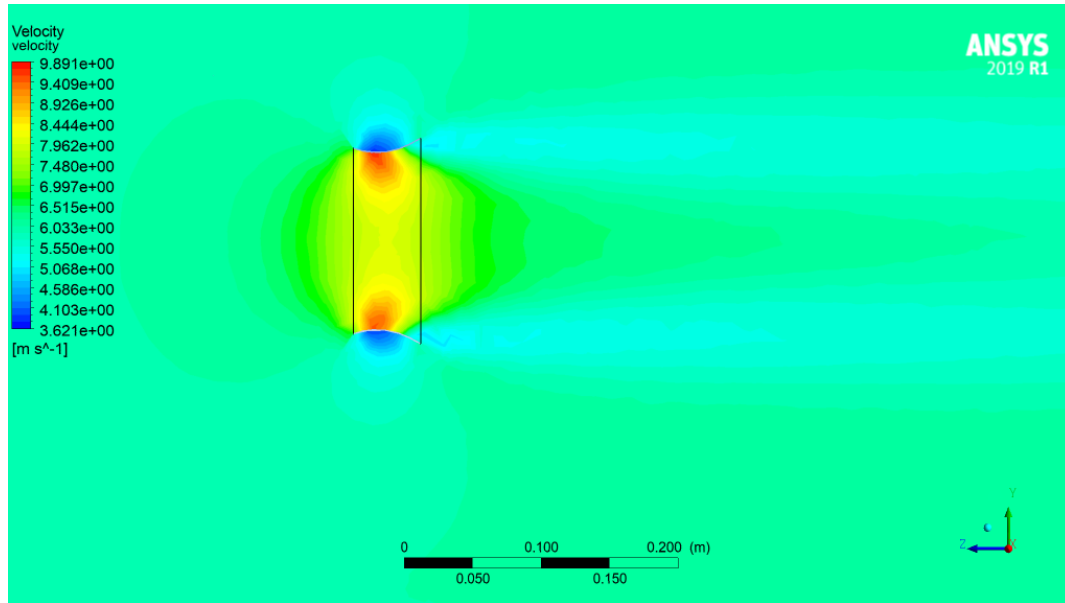
يوضح الشكل (31-3) النتائج الحاسوبية لتدرج الضغط في النموذج الثاني بدون حافة عند

السرعة 6m/s. ويوضح الشكل (32-3) النتائج الحاسوبية لتدرج السرعة للنموذج الثاني بدون حافة عند

السرعة 6m/s.



الشكل (31-3): تدرج الضغط للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 6m/s.



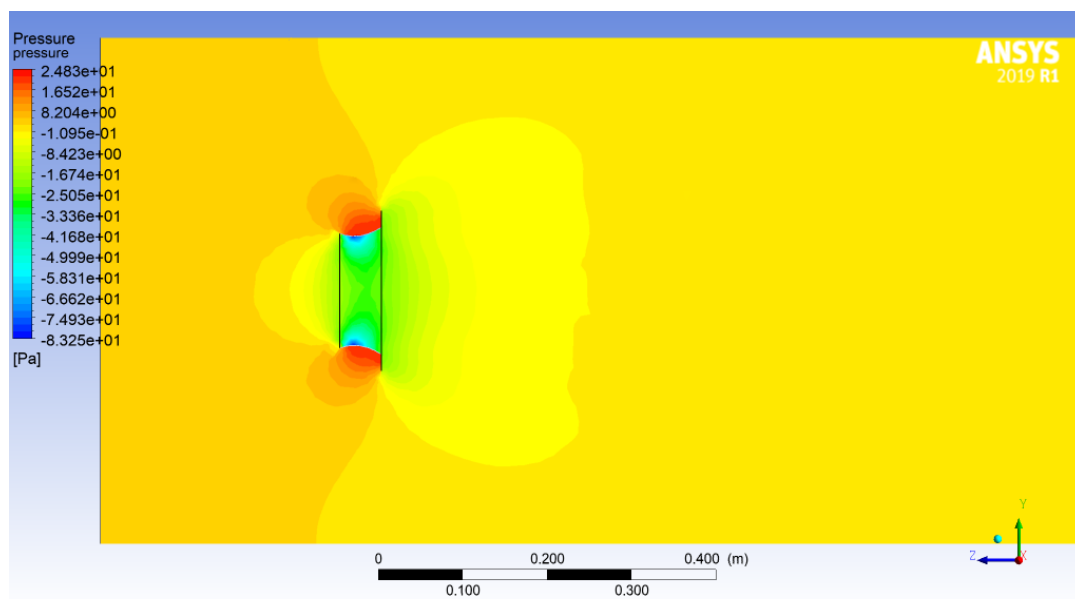
الشكل (32-3): تدرج السرعة للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 6m/s.

3-3-4- نتائج محاكاة النموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s:

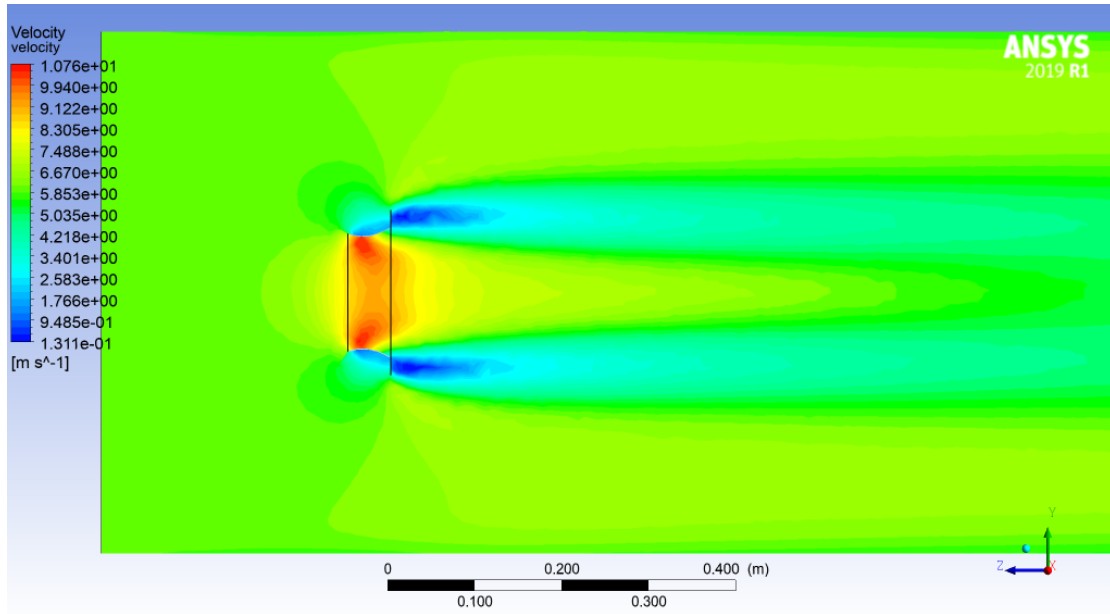
يوضح الشكل (33-3) النتائج الحاسوبية لتدرج الضغط في النموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 6m/s. ويوضح الشكل (34-3) النتائج الحاسوبية لتدرج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 6m/s.



الشكل (33-3): تدرج الضغط للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s.



الشكل (34-3): تدرج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s.

يوضح الجدول (5-3) قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع

حافة، عند سرعة رياح اسميّة 6m/s. ويبين الجدول (6-3) قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على

طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسميّة 6m/s. نلاحظ تغيرات السرعة على طول

المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 6m/s في المخطط البياني الموضح في

الشكل (35-3). أما مقدار انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون

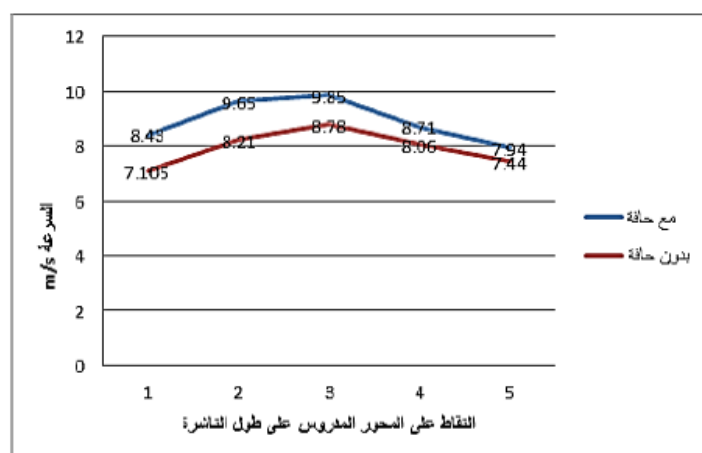
حافة عند السرعة 6m/s، فهي موضحة في المخطط البياني في الشكل (36-3).

الجدول (3-5): يبين قيم السرعة وتغير الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع حافة، عند سرعة رياح اسمية 6m/s.

النقطة	السرعة m/s	مقدار انخفاض الضغط pa
1	8.43	18.8
2	9.65	31
3	9.85	32.4
4	8.71	20.4
5	7.94	12.9

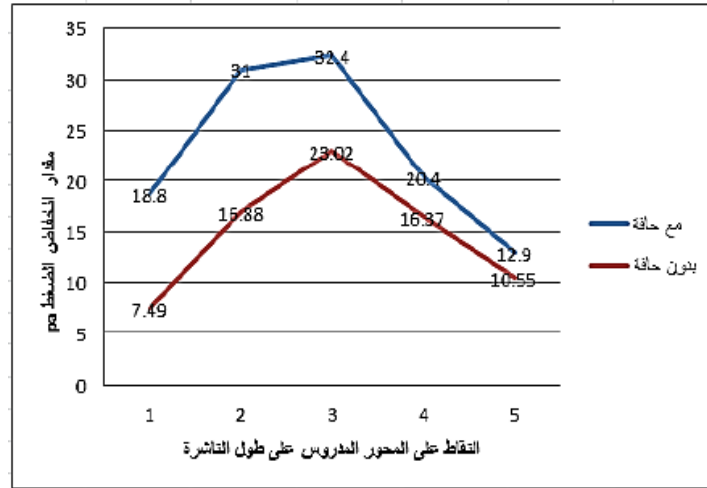
الجدول (3-6): يبين قيم السرعة وتغير الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسمية 6m/s.

النقطة	السرعة m/s	مقدار انخفاض الضغط pa
1	7.105	7.49
2	8.21	16.88
3	8.78	23.02
4	8.06	16.37
5	7.44	10.55



الشكل (3-35): مخطط بياني يوضح تغير السرعة على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة

6m/s



الشكل (3-36): مخطط بياني يوضح انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة

.6m/s

كما حدث في النموذج عند السرعة 3m/s ولكن بقيم ضغوط أقل، فعند وجود حافة قائمة نلاحظ

انخفاض الضغط بمقدار 25pa بالقرب من مقدمة الناشرة، وأقل قيمة لانخفاض الضغط سجلت حوالي

65pa ضمن الناشرة وعند جدارها، وذلك مقارنة بقيم الضغوط عند عدم وجود حافة قائمة، فانخفض

الضغط بالقرب من مقدمة الناشرة بمقدار 11pa وأقل قيمة لانخفاض الضغط عند جدار الناشرة سجلت

45pa وهذا بالتأكيد سينعكس على مخططات السرعة، فسوف تزداد السرعة بانخفاض الضغط بشكل

طردي. لوحظ عند السرعة 3,6m/s في هذا النموذج أن المنطقة التي حدث فيها التغير الأكبر

(انخفاض الضغط وزيادة السرعة) تقارب (55-60%) من مقدمة الناشرة، أما من مخططات السرعة

نلاحظ عند المقارنة أن السرعة العظمى قد حصلنا عليها عند وجود حافة تقريبا بعد حوالي 60% من

مقدمة الناشرة وتعادل 9.85 m/s وفي حال عدم وجود حافة قائمة فالقيمة العظمى التي حصلنا عليها في

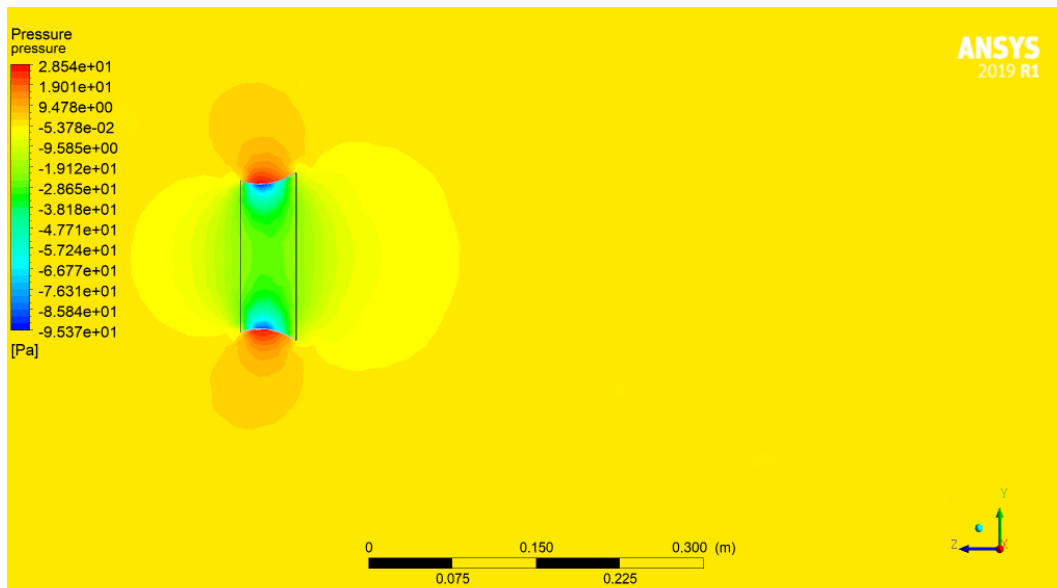
نفس المنطقة بعد حوالي 60% من مقدمة الناشرة ولم تتجاوز 8.78m/s.

3-3-5- نتائج محاكاة النموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 8m/s:

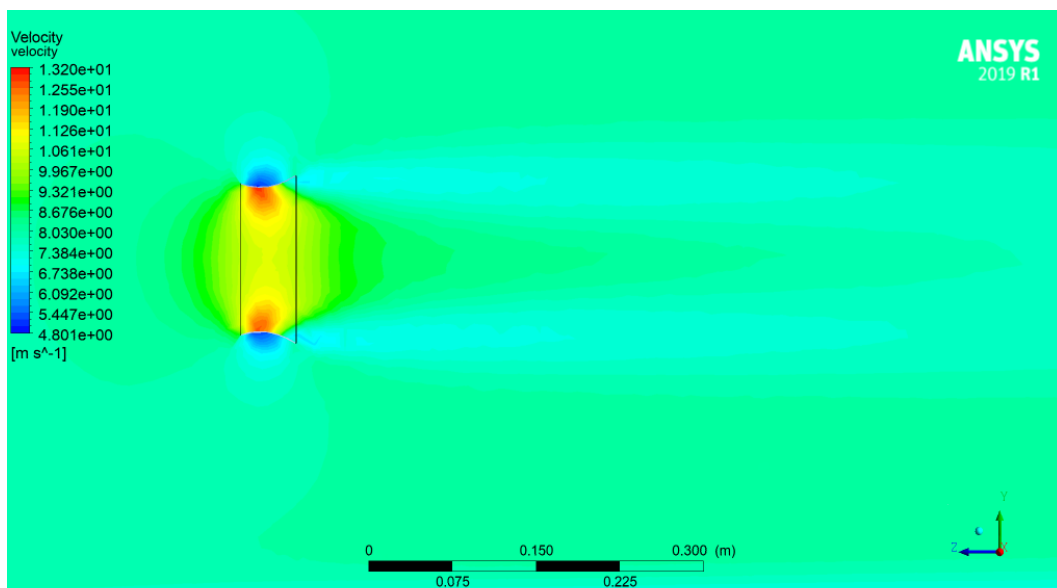
يوضح الشكل (37-3) النتائج الحاسوبية لتدرج الضغط في النموذج الثاني بدون حافة عند

السرعة 8m/s. ويوضح الشكل (38-3) النتائج الحاسوبية لتدرج السرعة للنموذج الثاني بدون حافة عند

السرعة 8m/s.



الشكل (37-3): تدرج الضغط للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 8m/s.



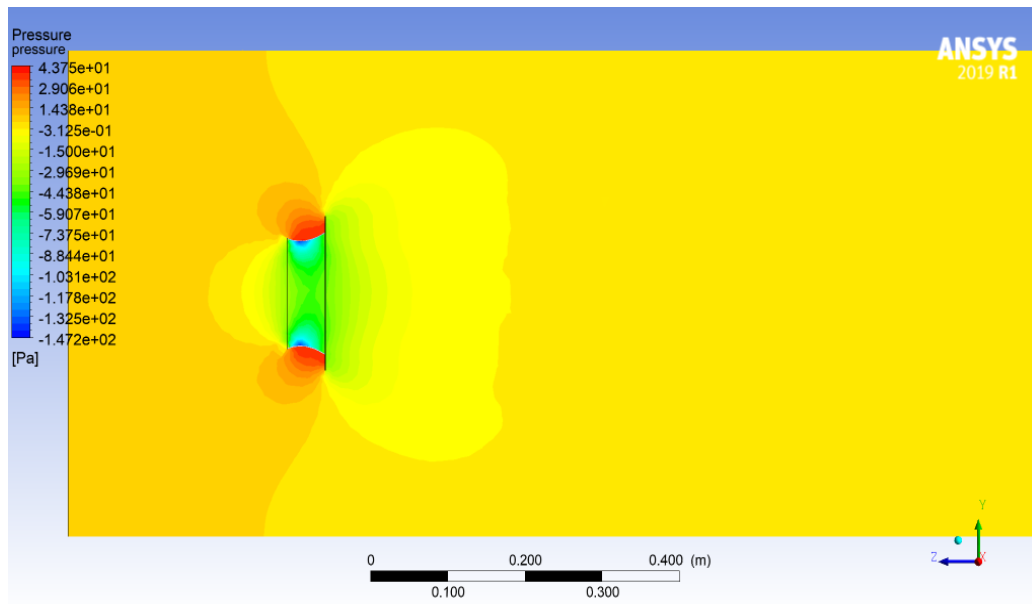
الشكل (38-3): تدرج السرعة للنموذج الثاني بدون حافة عند السرعة 08m/s

3-3-6- نتائج محاكاة النموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s:

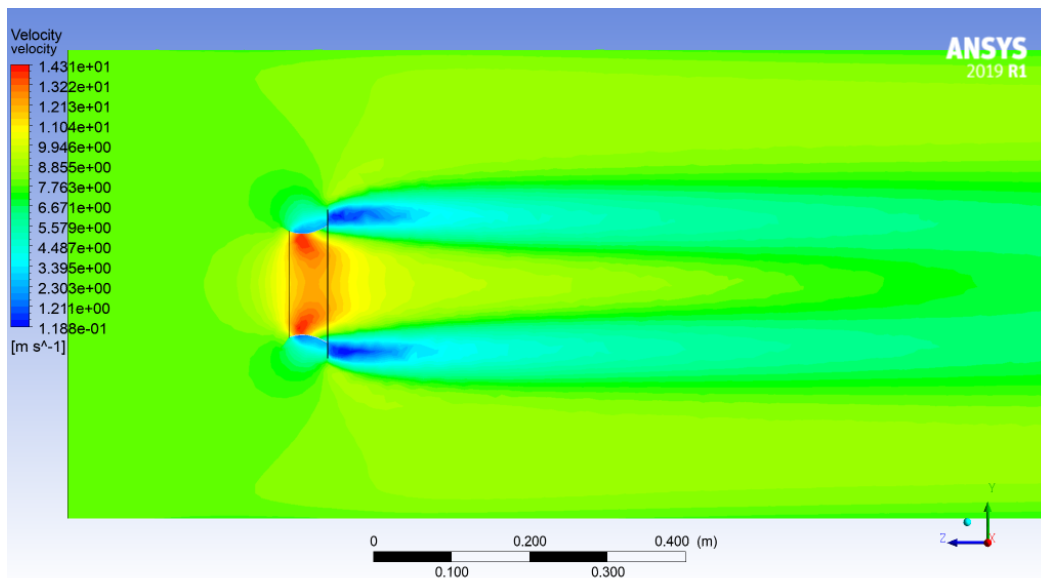
يوضح الشكل (39-3) النتائج الحاسوبية لتدرج الضغط في النموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 8m/s. ويوضح الشكل (40-3) النتائج الحاسوبية لتدرج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 8m/s.



الشكل (39-3): تدرج الضغط للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s.



الشكل (40-3): تدرج السرعة للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s.

يوضح الجدول (7-3) قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع

حافة، عند سرعة رياح اسميّة 8m/s. ويبين الجدول (8-3) قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على

طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسميّة 8m/s. نلاحظ تغيرات السرعة على طول

المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 8m/s في المخطط البياني الموضح في

الشكل (3-41). أما مقدار انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون

حافة عند السرعة 8m/s، فهي موضحة في المخطط البياني في الشكل (3-42).

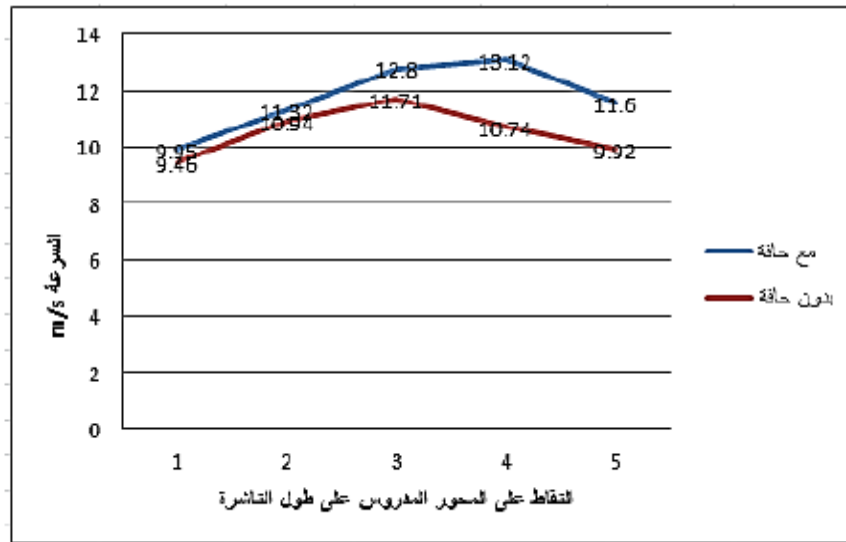
الجدول (7-3): يبين قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني مع حافة، عند سرعة رياح اسميّة 8m/s.

النقطة	السرعة m/s	مقدار انخفاض الضغط pa
1	9.95	16.6
2	11.32	35
3	12.8	54.4
4	13.12	57.6
5	11.6	36.5

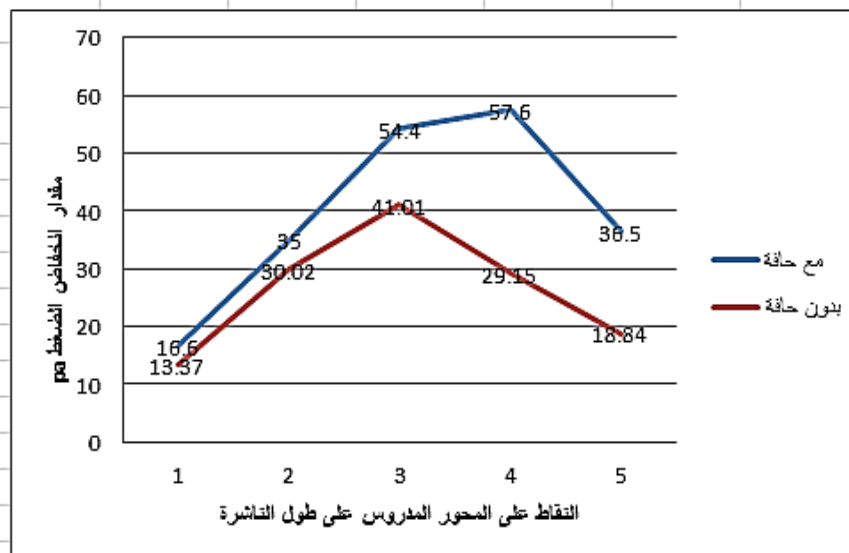
الجدول (8-3): يبين قيم السرعة وتغيّر الضغط لخمس نقاط على طول النموذج الثاني بدون حافة، عند سرعة رياح اسميّة

8m/s.

النقطة	السرعة m/s	مقدار انخفاض الضغط pa
1	9.46	13.37
2	10.94	30.02
3	11.71	41.01
4	10.74	29.15
5	9.92	18.84



الشكل (3-41): مخطط بياني يوضح تغير السرعة على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 8m/s.



الشكل (3-42): مخطط بياني يوضح مقدار انخفاض الضغط على طول المحور المدروس في الناشرة مع حافة وبدون حافة عند السرعة 8m/s.

حصلنا على انخفاض بالضغط بالقرب من مدخل الناشرة بقيمة تعادل 23pa مع حافة و17pa بدون حافة حيث أقل قيمة لانخفاض الضغط عند وجود حافة وبالقرب من جدار الناشرة كانت تعادل 75pa. وعند عدم وجود حافة وفي نفس المنطقة حوالي 65pa. إنَّ لاختلاف قيم الضغط عند المدخل في الحالتين أثرًا بتغيّر قيم السرعة، هذا الاختلاف في السرعات يؤدي إلى نشوء أعاصير موضعية تؤثر في دخول الهواء (جريان عكسي غير ضار) حيث تكسب جزيئات الهواء طاقة كامنة، تحافظ هذه

الطاقة على جزيئة الهواء كي لا تتحول سرعتها إلى صفر بالتالي تتحول الجزيئة المتحركة إلى إعصار موضعي. من مخططات السرعة نلاحظ عند وجود حافة قائمة أن السرعة العظمى التي تقع في المنطقة من 80% من مقدمة الناشرة قد قاربت 13.12m/s عند سرعة اسمية للرياح تعادل 8m/s، في حين لم تتجاوز السرعة القصوى للنموذج نفسه بدون حافة وبعد 60% من مقدمة الناشرة وعند السرعة 8m/s حوالي 11.71m/s وذلك لارتباط قيم الضغط الدنيا مع السرعات القصوى.

من خلال المحاكاة ونتائجها نستنتج التالي:

التعديل الذي تم على النموذج الثاني ووجود الحافة قد أعطى دلالات إيجابية عند السرعات المنخفضة، وعند ازدياد سرعة الهواء الداخل إلى النموذج انخفض الضغط في الناشرة وانعكس ذلك إيجابيا على زيادة سرعة الهواء ضمن الناشرة، ولكن عند زيادة السرعة تشكلت لدينا منطقة الأثر الذيلي متوسطة التأثير التي قد تؤدي في بعض الحالات إلى تشكّل اضطرابات قد تؤثر سلبيًا على كفاءة الناشرة المتموضعة خلف هذا النموذج بشكل مباشر. أما الجريان على السطح الخارجي للنموذج ونتيجة لاصطدام الهواء بالحافة فقد كسب سرعة انزلاق وذلك نتيجة لنعومة الحافة وانسيابية شكل المنحني فلم تتحول الحافة إلى مصد هواء بل كان عملها مفيدًا. ولمدخل الناشرة أيضًا دورٌ مهمٌ في تقويم مسار الجريان بشكل أفقي وتوجيهه، وذلك للاستفادة من طاقته كي لا تتبعثر بشكل عمودي عند اصطدام الهواء مباشرة بقطر متضيق. لذا تمّ اعتماد النموذج الثاني مع حافة حيث سيتمّ تصنيعه وإجراء التجارب العملية عليه.

الفصل الرابع

الدراسة التجريبية

4-1- تصنيع الناشرة (النموذج الثاني مع حافة):

تمّ رسم الناشرة وفق أبعاد النموذج الثاني الذي تمّ اعتماده في هذا البحث مع حافة، حيث تمّ تشغيل القالب من معدن الألمنيوم على الآلات المبرمجة CNC، كما في الشكل (4-1)، ثم قمنا بصب مادة الفايبر غلاس (GRP)، كما في الشكل (4-2)، ضمن القالب وذلك للحصول على النموذج الذي سيتم استخدامه في التجربة العملية.



الشكل (4-1): قالب الألمنيوم



الشكل (2-4): نموذج الفايبر غلاس.

- خصائص مادة الفايبر غلاس GRP: [22]

تم توضيح أهم خصائص مادة الفايبر غلاس (GRP) في الجدول (1-4) حيث تتميز أنها:

- 1- مرنة جدًا ويسهل تشكيلها في قوالب.
- 2- لا تحترق بسهولة حيث تتحمل درجة حرارة حتى 819 درجة سيليزيوس.

3- سهولة الصيانة والإصلاح.

الجدول (1-4): خصائص مادة الفايبر غلاس (GRP)

1800kg/m ³	الكثافة
6786g/m	الوزن بالنسبة لوحد الطول
75Mpa	إجهاد الشد
120Gpa	معامل المرونة

4-2- الأنفاق الهوائية (Wind Tunnels):

الأيروديناميك هو علم يدرس قوانين حركة وتحريك الهواء (الغاز) والتأثير المتبادل أو الجريان

الهوائي (الغازي) مع الأجسام الموجودة ضمنه، إن الأنفاق الهوائية عبارة عن وسائل توفر لنا تياراً من

غاز معين (الهواء أو الهليوم) له صفات محددة وذلك وفقاً لأسس تصميم هذه التجهيزات.

إن دراسة الجريان حول الأجسام المغمورة سواءً كان الجريان متعلقاً بموجات صدمة أو طبقة

حدية أو ضياعات ضغط أو قوى احتكاك، لا تختلف سواءً كان الجسم متحركاً في مائع ساكن أو مائع

يتحرك حول جسم ساكن، حيث يتم تثبيت النموذج في حيز مغلق ونقوم بتعريضه لتيار هوائي أو غازي

سرعته تطابق سرعة الجسم الأصلي في الواقع العملي.

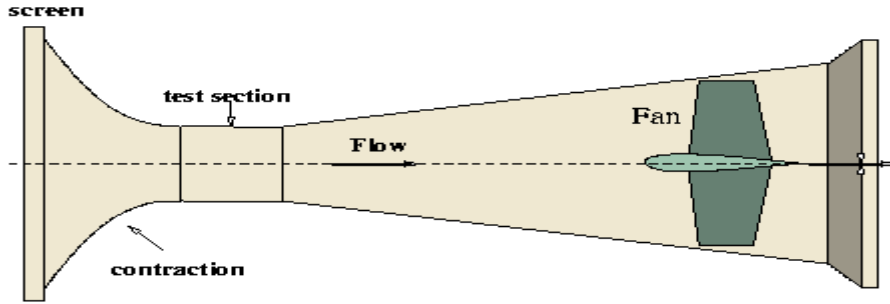
4-2-1- النفق الهوائي:

يوضح الشكل (3-4) مقطعاً في النفق الهوائي حيث يعرف على أنه جهاز يؤمن تياراً منتظماً

في جزء منه يدعى مقطع التجارب أو مقطع الاختبار (Test Section) حيث يكون لهذا التيار خواص

محددة في السرعة والضغط ودرجة الحرارة، وبالتالي قيم معينة لرقم رينولدز ورقم ماخ. يحدد رقم رينولدز

(Re) نوع الجريان؛ أكان صفائحيّاً أم مضطرباً ورقم ماخ (M) يحدد نوع الجريان أكان دون صوتي أو عبر صوتي أو فوق صوتي، ويمكن في نفق هوائي معين أن نحصل على تيار متغير في قيمة رقم ماخ، وذلك إذا كانت الفوهة في النفق قابلة للتعديل، ويحدد رقم (Re) في مقطع الاختبار عادة بشروط هذا المقطع، ولتغيير رقم (Re) نقوم بالتحكم بشروط مقطع الاختبار.



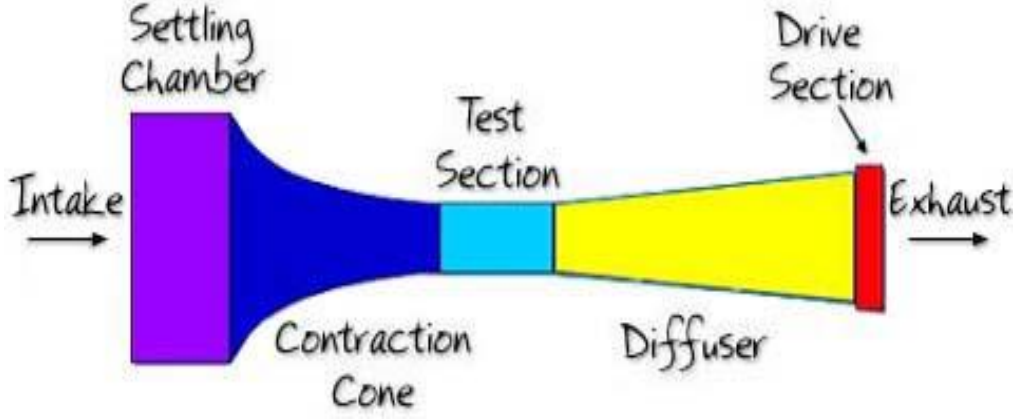
الشكل (3-4): مقطع في النفق الهوائي

4-2-2-2-القياسات المنجزة في مقطع تجارب الأنفاق الهوائية:

من القياسات التي يمكن إنجازها في مقطع التجارب للأنفاق الهوائية قياس الضغط ودرجة الحرارة والقوى التي يتعرض لها جسم معترض، ومنها يمكن استنتاج أمثال الجر وأمثال الحمل والسرعة وعامل الاحتكاك وإجهاد القص وعامل انتقال الحرارة.

يمكن بواسطة القياسات استنتاج نموذج الجريان بطريقة تحليلية نظرية ويمكن أيضاً رؤية نموذج الجريان بالعين المجردة وذلك عن طريق حقن غاز ملون أو دخان.

يوضح الشكل (4-4) أقسام النفق الهوائي.



الشكل (4-4): أقسام النفق الهوائي.

4-3- تجربة النفق الهوائي EA 102 الموجود في مركز الاختبارات والأبحاث

الصناعية التابع لوزارة الصناعة.

4-3-1- الغاية من التجربة:

إجراء الاختبار على النموذج المصنّع (الناشرة) وإيجاد قيم السرعة وانخفاض الضغط في خمس

نقاط على طولها وعلى محور يوازي منتصفها، ويبعد عنه مسافة 5.8cm وذلك لمقارنة نتائج الإجراء

التجريبي مع نتائج المحاكاة الحاسوبية.

4-3-2- جهاز التجربة:

النفق الهوائي موديل EA 102:

هو عبارة عن نفق هوائي يُنتج تدفق الهواء على طول حجرة الاختبار الذي يمر عبر الناشرة،

كما هو موضح بالشكل (4-5)، بحيث يمكن إيجاد قيم السرعة وانخفاض الضغط ضمنها. ويحتوي هذا

النفق على مروحة طرد مركزي تعطى سرعة هواء تصل حتى $v_{max}=25\text{m/s}$ باستطاعة 230w متواجدة داخل غرفة حيث تبعد هذه المروحة مسافة 0.25m من باب كابين المروحة ومن مميزات الكابين أنه يحتوي على شاشة برونزية لخفض مستوى الاضطراب الناتج عن دوران المروحة، والذي من الممكن أن يؤثر في دقة القياسات المأخوذة. يوضح الشكل (4-6) أجزاء النفق الهوائي EA102 والأجهزة المستخدمة فيه.

نجد أبعاد فوهة النفث وحجرة الاختبار الموجودة في النفق الهوائي:

- عرض مخرج الفوهة 30 cm.

- طول مخرج الفوهة 1 cm.

- عرض حجرة الاختبار 30cm.

- ارتفاع حجرة الاختبار 50cm.

كما وتحتوي حجرة الاختبار على قاعدة ذات ساعدين لتثبيت البروفيلات المراد إجراء

الاختبارات عليها، وعند الزاوية المطلوبة. بالإضافة لوجود مسطرة على المحور X بطول 1m وتعطي

تناقص تدريجي مقداره 1mm ومسطرة على المحور Y تعطي تناقص تدريجي مقداره 0.001mm.

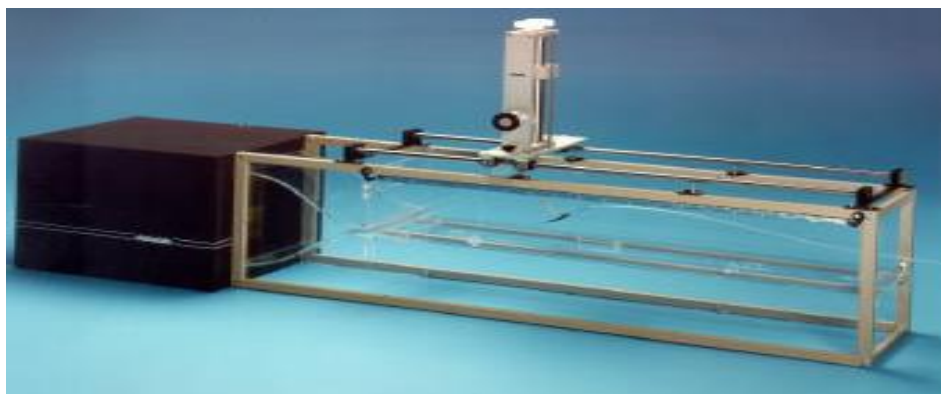
-أجهزة القياس:

- أنبوبة بيتوت لقياس الضغط.

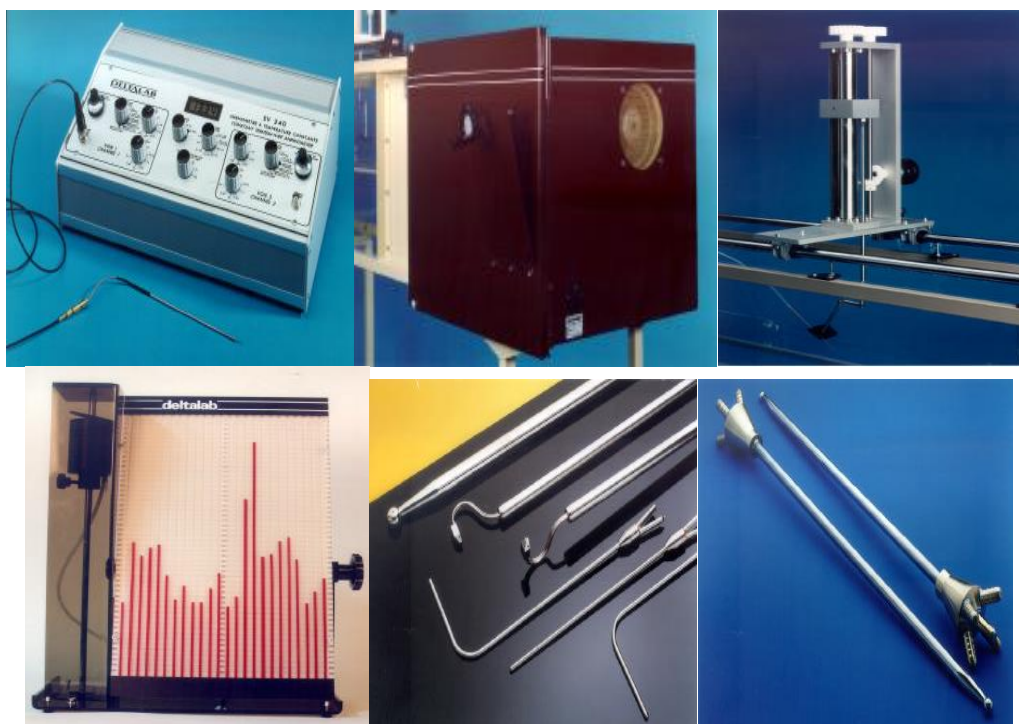
- مسابر قياس الضغط مع شاشة عرض الكترونية تُظهر الضغط الكلي والديناميكي

والستاتيكي.

- مانومترا.



الشكل (4-4): النفق الهوائي EA102.



الشكل (5-4): أجزاء النفق الهوائي EA102 والأجهزة المستخدمة فيه

4-4- النتائج التجريبية للنموذج المدروس عند سرعات رياح مختلفة

:(3,6,8)m/s

قمنا بإجراء التجارب على النموذج الثاني مع حافة (الناشرة مع حافة) في هذا النفق وعند

سرعات رياح 3,6,8m/s وعلى طول محور يوازي منتصف الناشرة، ويبعد عنه مسافة 5.8cm وكانت

النتائج كما هي موضحة بالجدول (2-4).

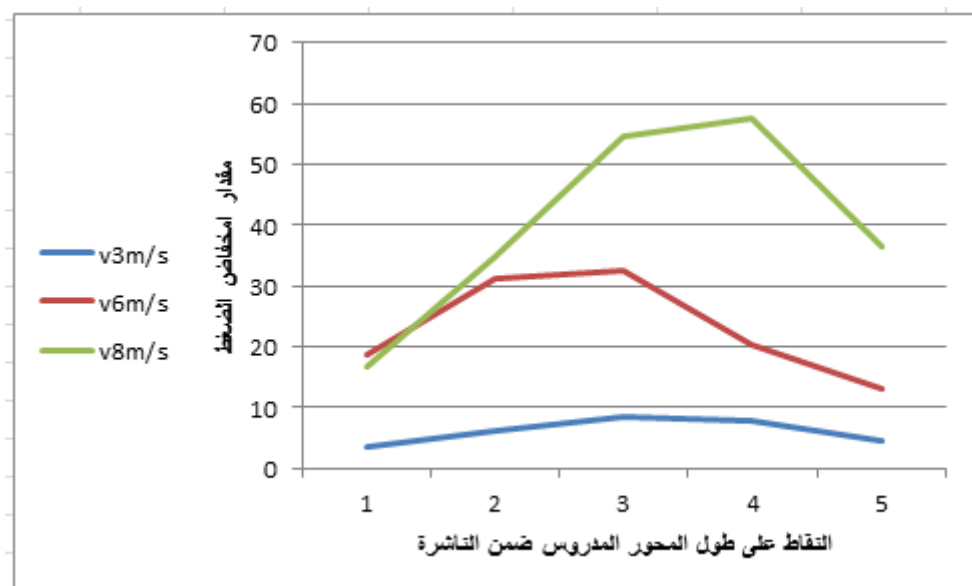
الجدول (2-4): يوضح قيم انخفاض الضغط (pa) وقيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) تجريبياً.

النقطة	السرعات عند (m/s)	انخفاض الضغط (pa) عند سرعة 3m/s	السرعات عند (m/s)	انخفاض الضغط (pa) عند سرعة 6m/s	السرعات عند (m/s)	انخفاض الضغط (pa) عند سرعة 8m/s
1	4.04	3.59	8.36	18.73	10.04	16.65
2	4.53	6.14	9.72	31.07	11.26	34.91
3	4.99	8.63	9.9	32.48	12.87	54.49
4	4.79	7.8	8.62	20.34	13.21	57.65
5	4.35	4.68	8.01	12.98	11.67	36.55

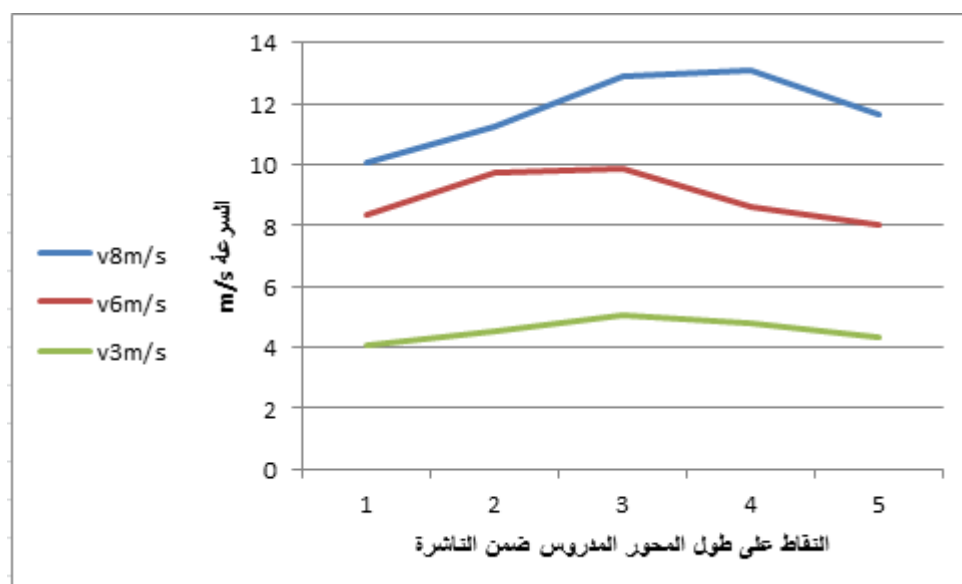
يبين الشكل (7-4) مخططاً يوضح قيم انخفاض (pa) على طول الناشرة عند سرعات رياح

(3,6,8m/s) تجريبياً. أما الشكل (8-4) فيبين قيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند سرعات رياح

(3,6,8m/s) تجريبياً.



الشكل (4-6): مخطط يوضح قيم انخفاض الضغط (pa) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) تجريبياً.



الشكل (4-7): مخطط يوضح قيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) تجريبياً.

4-5- النتائج الحاسوبية للنموذج المدروس عند سرعات رياح مختلفة (3,6,8)m/s:

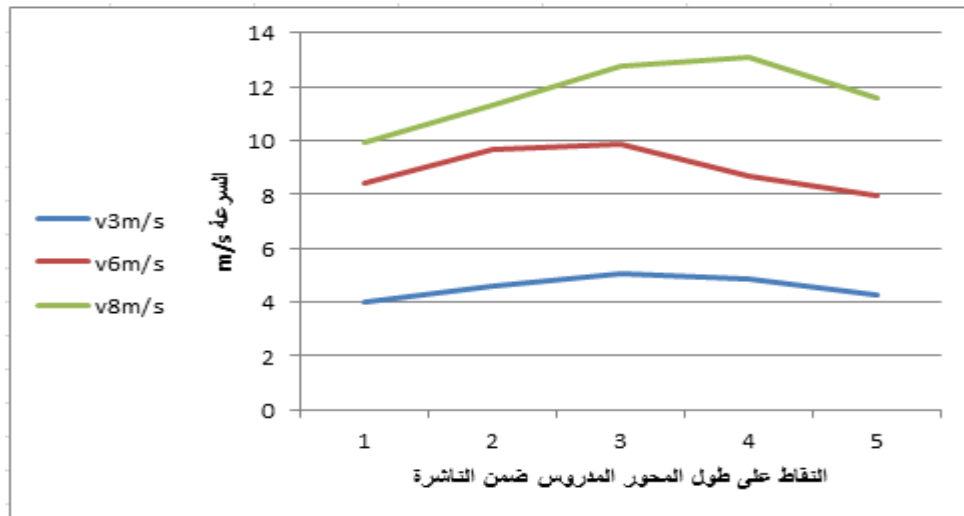
الجدول (3-4): يوضح قيم السرعات (m/s) وانخفاض الضغط (pa) عند السرعات (3,6,8 m/s) حاسوبياً على طول الناشرة.

النقطة	السرعات عند 3m/s	انخفاض الضغط عند السرعة 3m/s	السرعة عند 6m/s	انخفاض الضغط عند السرعة 6m/s	السرعة عند 8m/s	انخفاض الضغط عند السرعة 8m/s
1	3.99	3.5	8.43	18.8	9.95	16.6
2	4.61	6.23	9.65	31	11.32	35
3	5.06	8.68	9.85	32.4	12.8	54.4
4	4.88	7.87	8.71	20.4	13.12	57.6
5	4.29	4.59	7.94	12.9	11.6	36.5

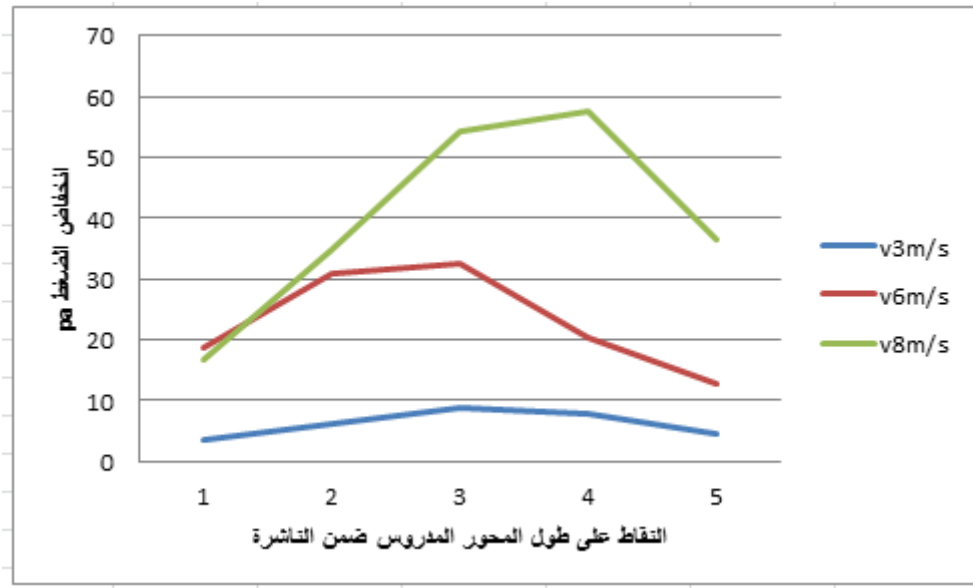
يوضح الشكل (4-9) مخططاً لقيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند سرعات رياح

(3,6,8m/s) حاسوبياً. ويوضح الشكل (4-10) مخططاً لقيم انخفاض الضغط (pa) على طول الناشرة

عند سرعات رياح (3,6,8m/s) حاسوبياً.



الشكل (4-8): مخطط يوضح قيم السرعات (m/s) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) حاسوبياً



الشكل (4-9): مخطط يوضح قيم انخفاض الضغط (pa) على طول الناشرة عند سرعات رياح (3,6,8m/s) حاسوبياً.

من النتائج السابقة الحاسوبية والتجريبية نلاحظ أنَّ عند انخفاض قيم الضغط تزداد قيمة السرعة، وهذا كان واضحاً عند السرعات الثلاث، حيث نلاحظ أنَّ أعلى قيمة للسرعة عند سرعة اسمية 3m/s كانت تعادل 5.06m/s حاسوبياً، و 4.99m/s تجريبياً وذلك عند انخفاض للضغط بقيمة 8.68pa حاسوبياً و 8.63pa تجريبياً، وكلما ازدادت قيمة السرعة الاسمية للرياح يزداد انخفاض الضغط وبالتالي تزداد قيمة السرعة، ولكن لاحظنا عند مدخل الناشرة فقط أنَّ قيمة انخفاض الضغط عند سرعة اسمية للرياح 8m/s أقل من قيمة انخفاض الضغط في الموقع نفسه عند سرعة اسمية للرياح 6m/s.

4-6- مقارنة النتائج بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة رياح اسمية 3m/s:

يبين الجدول (4-4) مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة

اسمية للرياح تعادل 3m/s.

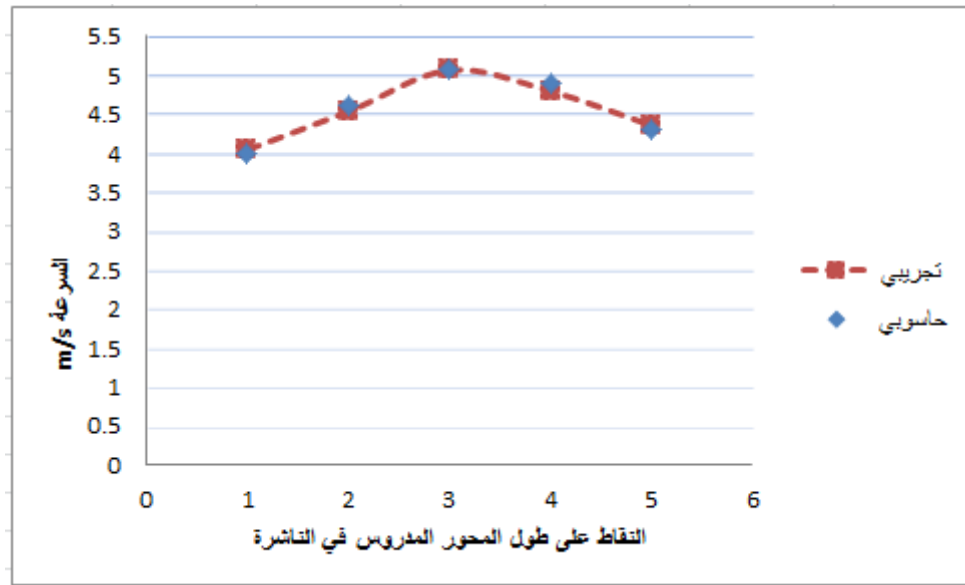
الجدول (4-4): مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسمية للرياح تعادل 3m/s.

النقاط	السرعة حاسوبياً m/s	السرعة تجريبياً m/s	انخفاض الضغط حاسوبياً pa	انخفاض الضغط تجريبياً pa
1	3.99	4.04	3.5	3.59
2	4.61	4.53	6.23	6.14
3	5.06	4.99	8.68	8.63
4	4.88	4.79	7.87	7.8
5	4.29	4.35	4.59	4.68

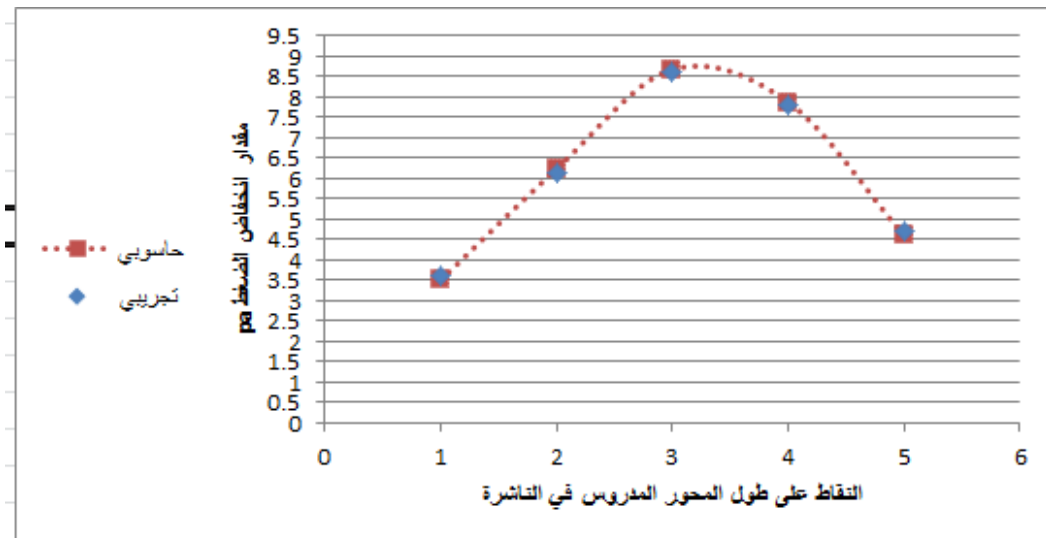
يوضح الشكل (4-11) مقارنة نتائج السرعة حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 3m/s. بينما يوضح الشكل (4-12) مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج

الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s.



الشكل (4-10): مقارنة نتائج السرعة حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s.



الشكل (4-11): مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 3m/s.

من النتائج التجريبية والحاسوبية نجد أن الناشرة مع حافة لعبت دوراً في انخفاض الضغط ضمن الناشرة، وبالتالي ازدادت السرعة، حيث أعلى قيمة للسرعة كانت على بعد 60% من مقدمة الناشرة وبلغت حاسوبياً 5.06m/s وتجريبياً 4.99m/s، يقابلها انخفاض في الضغط حاسوبياً بمقدار 8.68pa وتجريبياً بمقدار 8.63pa عند سرعة اسمية للرياح تعادل 3m/s.

4-7- مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند

سرعة اسمية للرياح تعادل 6m/s.

يبين الجدول (4-5) مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة

اسمية للرياح تعادل 6m/s.

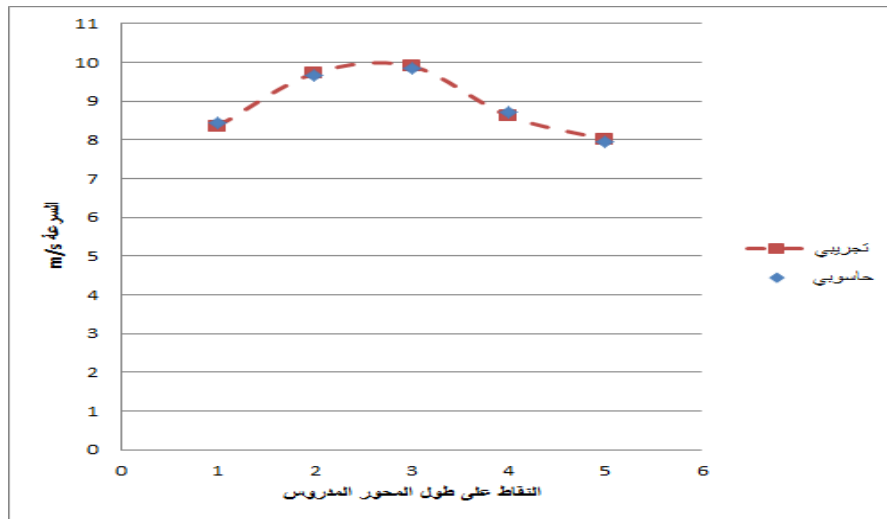
الجدول (5-4): مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسمية للرياح تعادل 6m/s.

النقاط	السرعة حاسوبياً m/s	السرعة تجريبياً m/s	انخفاض الضغط حاسوبياً pa	انخفاض الضغط تجريبياً pa
1	8.43	8.36	18.8	18.73
2	9.65	9.72	31	31.07
3	9.85	9.9	32.4	32.48
4	8.71	8.62	20.4	20.34
5	7.94	8.01	12.9	12.98

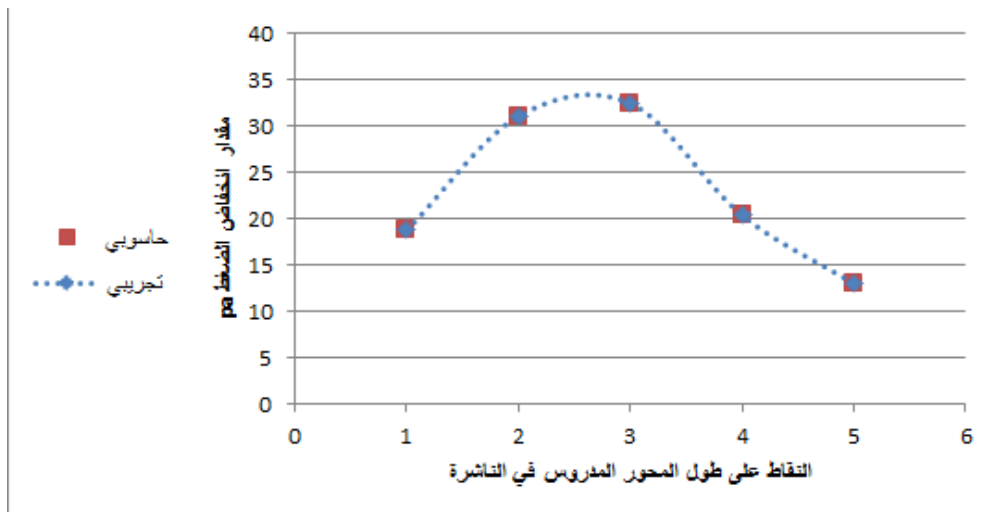
يوضح الشكل (13-4) مقارنة نتائج السرعة حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 6m/s. بينما يوضح الشكل (14-4) مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج

الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s.



الشكل (12-4): مقارنة نتائج السرعة حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s.



الشكل (13-4): مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 6m/s.

عند سرعة اسمية للرياح تعادل 6m/s نجد أنه كلما ازدادت سرعة الرياح الاسمية الداخلة إلى

النموذج يزداد انخفاض الضغط، وبالتالي تزداد السرعة، وبالمقارنة بين التجريبي والحاسوبي فإن النقطة

التي حصل عندها أكبر انخفاض للضغط بين النقاط الخمس هي النقطة (3) وكان بمقدار 32.4pa

حاسوبياً و 32.48pa تجريبياً وكانت السرعات المقابلة لها هي على التوالي حاسوبياً وتجريبياً 9.85m/s،

9.9m/s وذلك في المنطقة التي تبعد 60% عن مقدمة الجسم.

4-8- مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند

سرعة اسمية للرياح تعادل 8m/s.

يبين الجدول (6-4) مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة

اسمية للرياح تعادل 8m/s.

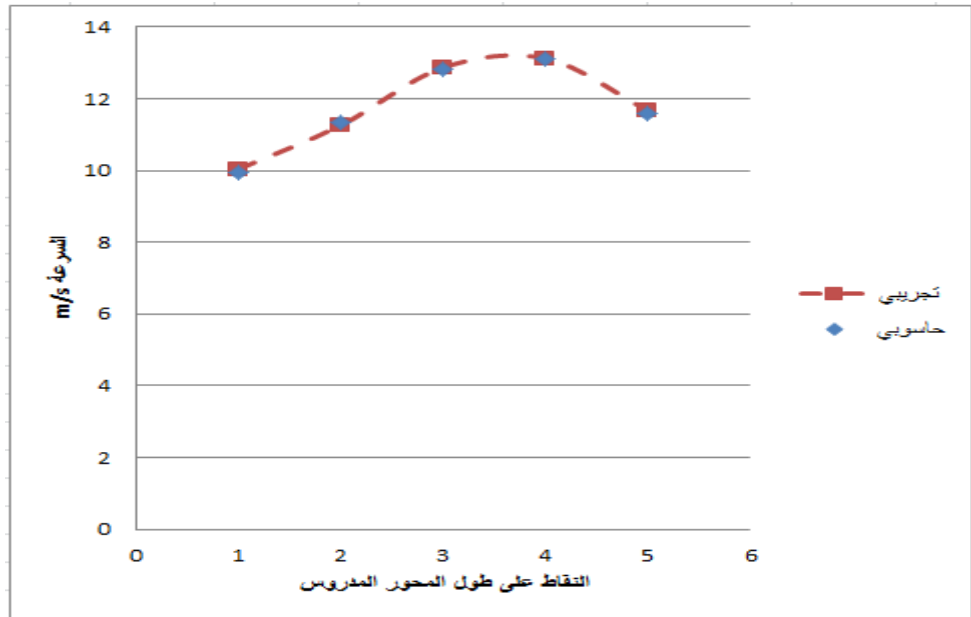
الجدول (6-4): مقارنة نتائج الضغط وانخفاض السرعة بين الحاسوبي والتجريبي عند سرعة اسمية للرياح تعادل 8m/s.

النقاط	السرعة حاسوبياً m/s	السرعة تجريبياً m/s	انخفاض الضغط حاسوبياً pa	انخفاض الضغط تجريبياً pa
1	9.95	10.04	16.6	16.65
2	11.32	11.26	35	34.91
3	12.8	12.87	54.4	54.49
4	13.12	13.21	57.6	57.65
5	11.6	11.67	36.5	36.55

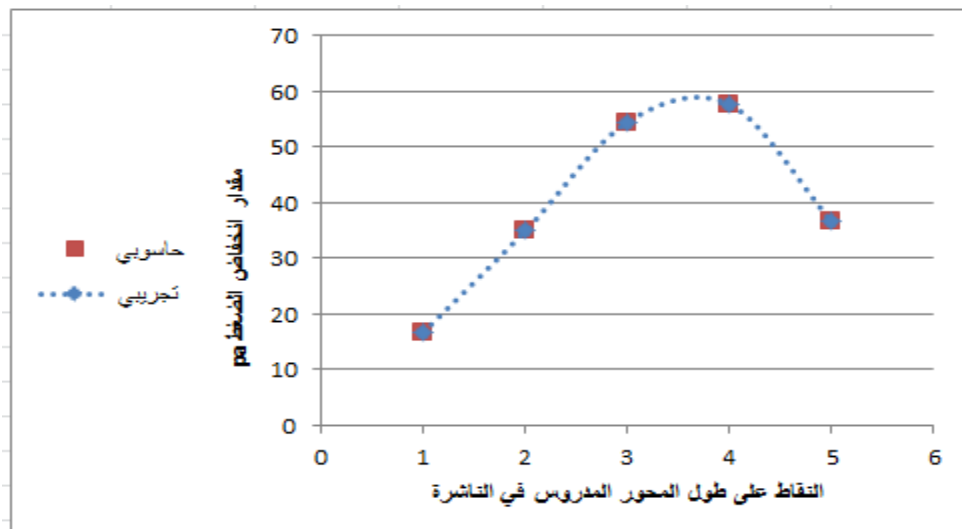
يوضح الشكل (11-4) مقارنة نتائج السرعة حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند

السرعة 8m/s. بينما يوضح الشكل (12-4) مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج

الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s.



الشكل (14-4): مقارنة نتائج السرعة حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s.



الشكل (15-4): مقارنة نتائج انخفاض الضغط حاسوبياً وتجريبياً للنموذج الثاني مع حافة عند السرعة 8m/s.

عند سرعة اسمية للرياح تعادل 8m/s انخفض الضغط على بعد 80% من مقدمة الناشرة بقيمة

تعادل 57.6pa حاسوبياً و57.65pa تجريبياً وكانت السرعة في الموقع نفسه عند النقطة (4) حاسوبياً

13.12m/s وتجريبياً تساوي 13.21m/s أي ازدادت السرعة في هذه المنطقة من الناشرة عن السرعة

الاسميّة بمعدل 64%، ولكن لوحظ أنّ مقدار انخفاض الضغط في مقدمة الناشرة فقط عند النقطة (1)

كان أكبر عند سرعة اسميّة للرياح تساوي 6m/s من مقدار انخفاض الضغط عند سرعة اسميّة 8m/s.

من النتائج السابقة نلاحظ وجود فوارق في معظم القيم التجريبية عن القيم الحاسوبية، تتراوح

هذه الفوارق بين 5% (9→5) زيادة أو نقصاناً عن القيم الحاسوبية، تعزى هذه الفوارق إلى:

- ظروف التجربة والأجهزة المستخدمة في التجارب العملية: حيث لكل جهاز ترتيب معين

بدءاً من حجرة الاختبار وصولاً إلى أجهزة القياس المستخدمة، يضاف إلى ذلك خطأ المشاهدة والقراءة،

والأبعاد الصغيرة لحجرة الاختبار التي حدّت من إمكانية اختبار هذا النموذج بشكل يحاكي اختباره

وكأنّه في الهواء الطلق، علماً أنّ كل الأدوات وأجهزة القياس المستخدمة قد تمّت معايرتها وفق جداول

المعايرة الخاصة بكل أداة، وتم أخذ ثلاث قراءات لكل قيمة عند كل نقطة من النقاط الخمس على طول

المحور المدروس، وحساب المتوسط الحسابي للقراءات الثلاث واعتباره القيمة التجريبية النهائية للسرعة

أو لانخفاض الضغط عند كل نقطة من النقاط الخمس، وذلك لتقليل نسبة الخطأ قدر الإمكان.

- القيم الحاسوبية: إنّ لخوارزمية الحل في برنامج ANSYS مجموعة من الارتفاعات أثناء

تحويل المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية (نسبة الخطأ)، يضاف إلى ذلك دقة الشبكة (Mesh)،

إنّ لنوعية الشبكة دوراً كبيراً في دقة النتائج والحل، ولكن زيادة نعومة الشبكة تتطلب أجهزة حاسوبية

بمواصفات عالية، وتيار كهربائي مستمر، لأن ذلك يؤدي إلى زيادة الوقت المستغرق من قبل البرنامج

لحل المعادلات وإظهار النتائج، وقد تمّت زيادة عدد دورات الحل أثناء المحاكاة الحاسوبية إلى 100

دورة حل بدقة شبكة تعادل 88%، وذلك لتقليل نسبة الخطأ في إظهار نتائج السرعة وانخفاض الضغط

عند كل نقطة من النقاط الخمس على طول المحور المدروس، بغية الحصول على قيم حاسوبية أكثر

دقة.

الخاتمة

في هذه الأطروحة الموسومة بعنوان: "تطوير ناشرة قصيرة مدمجة مع حافة حول دوار توربين ريحي" تمّ التركيز على تصميم نموذج الناشرة الذي يحقّق لها أداءً أيروديناميكياً جيّداً، وذلك من خلال اختيار الأبعاد الهندسيّة الملائمة التي تجعل هذه الناشرة أداة تساعد على زيادة الخرج الطاقّي من التوربين الريحيّ المغطى بناشرة قصيرة مدمجة مع حافة، مقارنةً بالتوربينات الريحيّة التقليديّة بدون ناشرة، التي تركّب في أماكن معينة فقط. إنّ اختيار المناطق التي تحقّق سرعة اسميّة مناسبة للرياح أدى إلى صعوبات جمّة في استثمار طاقة الرياح، التي تعدّ من أهمّ الطاقات البديلة. بناءً على النتائج الحاسوبية والتجريبية التي توصّلنا إليها في هذا البحث، أدّت هذه الناشرة إلى زيادة في سرعة الرياح ضمنها بمقدار كبير عن السرعة الاسميّة للرياح الداخلة إليها، وهذا يساعد على استخدام التوربينات الريحيّة على نطاق جغرافيّ أوسع، وخصوصاً في ظلّ التوجّه الحكومي والأهليّ للاستثمار الأمثل للطاقات المتجدّدة في سورية.

الاستنتاجات

- التعديل الذي تم على الناشرة وإضافة الحافة القائدة لها، قد أعطى نتائج إيجابية عند سرعات رياح منخفضة، حيث أن الزيادة البسيطة في سرعة الرياح تنعكس إيجابياً على استطاعة التوربين الريحي لأن الاستطاعة تتناسب مع مكعب السرعة.
- عند ازدياد سرعة الهواء الداخل إلى الناشرة انخفض الضغط بقيم أكبر وبالتالي انعكس ذلك على زيادة السرعة في الناشرة بقيم أكبر، ولكن تشكلت لدينا منطقة الأثر الذيلي متوسطة التأثير التي قد تؤدي في بعض الحالات إلى تشكّل اضطرابات تؤثر سلّماً فقط في كفاءة التوربين المتموضع خلف النموذج بشكل مباشر.
- نتيجة لاصطدام الهواء بالحافة أثناء جريانه على السطح الخارجي للناشرة، فقد كسب سرعة انزلاق، وذلك نتيجة لنعومة الحافة وانسيابية الشكل، فلم تتحوّل الحافة إلى مصدّ هواء بل كان عملها مفيداً.
- بحسب النموذج الأفضل تصميمياً تبين أن لشكل مدخل الناشرة دوراً مهماً في توجيه وتقويم مسار الجريان بشكل أفقي، وذلك للاستفادة من طاقته كي لا تتبعثر بشكل عامودي عند اصطدام الرياح مباشرة بقطر متضيق.

المقترحات والتوصيات

- دراسة النموذج المقترح مع وجود دَوَّارٍ ريحيٍّ وذلك مع الأخذ بعين الاعتبار الأثر الأيروديناميكي لطرف ريشة الدَّوار الريحي (حادة مدبَّبة، مستقيمة).
- دراسة آليَّة الحافة المتكيفة ذاتيًّا التي تفتح تلقائيًّا عند سرعات رياح عالية جدًا.
- دراسة دور هذا التصميم في تقليل التشويش على إشارات الراديو والرادار.
- دراسة أثر هذا التصميم في تقليل التلوث الضوضائي والضجيج الأيروديناميكي الناتج عن التوربين.
- دراسة هذا النموذج عند زوايا ميل مختلفة للحافة.
- دراسة نموذجين متتالين لدَوَّارٍ ريحيٍّ مع ناشرة قصيرة مدمجة مع حافة لمعرفة المسافة التي يجب ان تفصل بين كل دَوَّارين متتالين في مزرعة ريحيَّة.
- تأمين نفق ريحيٍّ بأبعاد كبيرة، متاح الاستخدام لطلبة البحث العلمي، بغية تخفيف المعوقات الإدارية والعلمية مثل: اختيار الأبعاد بما يتلاءم مع أبعاد حجرة اختبار النفق الريحي.

قائمة المراجع

- [1] Abea K., Nishidab M., Sakuraia A., "Experimental and numerical investigations of flow fields behind a small wind turbine with a flanged diffuser." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, no. 12, pp. 951–970, 2005.
- [2] Hansen, M. O. L., 2008. *Aerodynamics of Wind Turbines*, Earthscan, UK.
- [3] D.G. Phillips, P.J. Richards, R.G.J. Flay diffuser development for a diffuser augmented wind turbine using computational fluid dynamics book from department of mechanical engineering the University of Auckland, New Zealand.
- [4] F. A. Woodward, "Analysis and design of wing-body combinations at subsonic and supersonic speeds," *Journal of aircraft*, vol. 5, pp. 528-534, 1968.
- [5] W. C. Y. Oberkamp and J. C. Y. Nicolaides, "Aerodynamics of finned missiles at high angle of attack," *AIAA journal*, vol. 9, pp. 2378-2384, 1971.
- [6] W. Blake, "Missile Datcom- Applications to projectiles," in *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, Boston, MA, 1989, pp. 212- 221.

- [7] E. H. Smith, S. K. Hebbar, and M. F. Platzler, "Aerodynamic characteristics of a canard-controlled missile at high angles of attack," *Journal of spacecraft and rockets*, vol. 31, pp. 766-772, 1994.
- [8] J. White, "An assessment of missile DATCOM prediction accuracy relative to generic Body+ Wing+ Tail missile pitch aerodynamics," *AIAA paper*, pp. 95-1893, 1995.
- [9] F. Moore and T. Hymer, "Improved methodology for axial force prediction at angle of attack," *Journal of Spacecraft and rockets*, vol. 35, pp. 132-139, 1998.
- [10] Habip and A. Mehmet, "Prediction of Aerodynamic Characteristics of Missiles with Circular and Noncircular Cross Sections," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol. 23, pp. 149- 160, 1999.
- [11] E. J. Abney and M. A. McDaniel, "High angle of attack aerodynamic predictions using missile datcom," *AIAA*, vol. 5086, p. 2005, 2005.
Loai El-Mahdy et. Al 54
- [12] T. J. Sooy and R. Z. Schmidt, "Aerodynamic predictions, comparisons, and validations using missile Datcom (97) and aeroprediction 98 (AP98)," *Journal of spacecraft and rockets*, vol. 42, pp. 257-265, 2005.

- [13] Lesieutre, D. J., " Nonlinear Aerodynamic Predictions of Aircraft and Missiles Employing Trailing-Edge Flaps," Proceedings of the 52nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2014-0055, 2014.
- [14] Martinez, M., " Preliminary Aeromechanical Design of Sub-Guided Munition for Artillery Rockets," Proceedings of the 29th International Symposium on Ballistics, 9-13 May, Edinburgh, Scotland, 2016.
- [15] Doyle, J. B. and Rosema, C. C., "Improved Validation Methodology for Missile Datcom Development," AIAA paper 2011-1241, January 2011.
- [16] Maurice, A. F., "Aerodynamic performance predictions of a SA-2 Missile using Missile Datcom," Master Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2009
- [17] O. Baysal, K. Fouladi, and D. Miller, "Computations of supersonic flows over a body at high angles of attack," AIAA journal, vol. 27, pp. 427-437, 1989.
- [18] T. Birch, D. Ludlow, N. Qin, and B. DERA, "Towards an efficient, robust and accurate solver for supersonic viscous flows," in Proceedings of the ICAS 2000 Congress, Harrogate, UK, 2000.
- [19] J. Sahu, K. Heavey, and S. Dinavahi, "Application of CFD to high angle of attack missile flow fields," Chimera, vol. 10, p. 11, 2000.

- [20] S. B. Khelil, P. Guillen, M. Lazareff, and R. G. Lacau, "Numerical simulation of roll induced moment of cruciform tactical missiles," *Aerospace Science and Technology*, vol. 5, pp. 109-124, 2001.
- [21] S. Deck, P. Duveau, P. d'Espiney, and P. Guillen, "Development and application of Spalart–Allmaras one equation turbulence model to three-dimensional supersonic complex configurations," *Aerospace Science and Technology*, vol. 6, pp. 171-183, 2002.
- [22] J. DeSpirito, M. Vaughn, and W. D. Washington, "CFD Investigation of Canard-Controlled Missile with Planar and Grid Fins in Supersonic Flow," *AIAA paper 2002-4509*, 2002.
- [23] X. Liu and S. Fu, "Numerical simulation of compressible separated turbulent flows over inclined slender body," *Journal of spacecraft and rockets*, vol. 42, pp. 572-575, 2005.
- [24] H. H. Al-Kayiem, A. K. Hussein, J. M. Jaleel, and S. H. Hussain, "Numerical Computation of 3-dimensional Supersonic Flow Field over Seamless Missiles," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 7, pp. 1563-1572, 2014.
- [25] Yang, L., Wang, M., and Gao, Z., "Numerical Investigation of Unsteady Aerodynamic Characteristics of a Pitching Missile," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 15, Issue 2, pp. 129-136, 2011.

- [26] Ohya, Y. “A highly efficient wind and water turbines with wind-lens technology.” Available: http://www.japan.ahk.de/fileadmin/ahk_japan/events_2012/5_Kyush_Uni_Prof_Ohya.pdf.
- [27] Isom, B. M., Palmer, R. D., Secrest, G. S., Rhoton, R. D., Saxion, D., Allmon, T. L., Reed, J., Crum, T. and Vogt, R. “Detailed observations of wind turbine clutter with scanning weather radars.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, pp. 894–910, 2009.
- [28] Schilling, D. R. (2013). “Wind lens: Fluid dynamics concentrated wind energy,” Industry Tap. [Online]. Available: <http://www.industrytap.com/wind-lens-fluid-dynamics-concentrated-wind-energy/523>.
- [29] Ragheb, M. and Ragheb, A. M. (2011). “Wind turbines theory — The Betz equation and optimal rotor tip speed ratio,” Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), InTech. doi: 10.5772/21398. from <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio>.

- [30] Balleri, A., Al-Armaghany, A., Griffiths, H., Tong, K., Matsuura, T., Karasudani, T. and Ohya, Y., “Measurements and analysis of the radar signature of a new wind turbine at X-band,” *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 7, no. 2, pp. 170–177, 2013.
- [31] Harvey, Scott, “Low-speed wind tunnel flow quality determination,” M.S. thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Naval Postgraduate School, 2011.
- [32] k.Prasad, V.Kumar, G.Swaminathan, G.Loganathan, Comutational investigation and design optimization of a duct augmented wind turbine (DAWT): ELSEVIER, Volume 22, Issue 3, India, 2020, pp.1186-1191.
- [33] Scheuerman, Jonathan P.(2017). WIND FLOW THROUGH SHROUDEDWINDTURBINES.Masterthesis.NAVALPOSTGRADUATESCHOOL,MONTEREY,CALIFORNIA.
- [34] Ambika G, Manohar L, Bharath B, Anurag C, Sampath N, CFD Simulation of Wind-Lens at Different Velocities: International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, Volume 3, Issue 2, India, 2017, pp.792-795.
- [35] Jakub B, Krzyszof D, Krzysztof K, Marcin K, Krzysztof S, Analysis approach for a diffuser augmented small wind turbine rotor, Poland, 2015.

- [36] Buyung K, Andrea T, Experimental study of shrouded micro-wind turbine: ELSEVIER, Volume 49, Issue 5, Australia, 2012, pp.92-98.
- [37] Yuji O, Takashi K, A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology: Energies, Volume 3, Issue 7, Japan, 2010, pp.634-649.
- [38] Ansys R19.

Abstract

In this thesis, a reference study was conducted to design a compact short diffuser with a brim. Two models of an compact ,short diffuser with and without a brim were also designed, and computer simulations were performed on each of them at three air speeds (3,6,8)m/s, then a comparison was made between them and the best model was adopted and the values of speed and pressure drop within it were shown in five points distributed over The length of the chosen model in order to show the effect of the brim and the shape of the model on increasing the speed within the model (diffuser), then this model was manufactured, and practical experiments were conducted on it in a wind tunnel ,and the experimental values were found for both the speed and pressure drop along the model as well, and the comparison was done between the computational and experimental results.

Keywords: Diffuser, Brim, Wind speed, Pressure drop.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Mechanical and Electrical Engineering Faculty

General Mechanic department



The Development of a compact short diffuser with a brim around wind turbine rotor

*A dissertation submitted in partial fulfillment
of the requierments for the degree of Master
in Renewable Energies Engineering*

By

Eng. Jawad Al Boueni

Supervisor

Dr. Hamza Mkarem

2021