

## تأثير الحقن المباشر في الخواص الديناميائية لمقطع الجناح ذي العتبة المواجهة للخلف

د. محمد إدريس أبو طيخ\* د. عبد الكريم عباس خضير\* إحسان زيدان سالم\*

تاريخ الاستلام: 2008/9/8

تاريخ القبول: 2009/3/5

### الخلاصة

يتناول البحث دراسة تأثير الحقن المباشر للهواء داخل العتبة في الخواص الديناميائية للجناح ذي العتبة الكاملة المواجهة للخلف. تم إجراء الاختبار على مقاطع الأجنحة في النفق الهوائي منخفض السرعة للحصول على توزيع الضغط على سطحي الجناح و إيجاد الخواص الديناميائية كالرفع و الكبح و نسبة الرفع الى الكبح. أما نظرياً فقد تم استخدام حقيبة برمجيات (Fluent 6.3) لمحاكاة الجريان الاضطرابي حول مقطع الجناح و الحصول على توزيع السرعة الاتجاهية للمقطع ذي العتبة و موقع انفصال الجريان و مقارنته مع النتائج التجريبية. تم إجراء الاختبارات العملية و النظرية عند سرعة جريان الهواء (35m/s) و لعدد رينولدز ( $4.4 \times 10^5$ ). أظهرت النتائج العملية التأثير الواضح لحقن الهواء داخل العتبة في قيمة معامل الضغط، فعند زيادة نسبة الحقن يقل الضغط المسلط على السطح العلوي لمقطع الجناح، مما أدى بدوره الى زيادة معامل الرفع للجناح ذي العتبة. لوحظ زيادة قيمة معامل الرفع مع زيادة نسبة الحقن حتى يصل إلى أعظم قيمة له عند نسبة حقن (8). أدى الحقن الأفقي الى زيادة معامل الرفع الأعظم بمقدار (12.2%) عن قيمته للمقطع الأصلي (NACA 0015) و بمقدار (6.27%) عن قيمته للمقطع ذي العتبة من دون حقن. و زيادة نسبة معامل الرفع إلى معامل الكبح الأعظم بمقدار (37.9%) عن المقطع الأصلي و (30.65%) عن المقطع ذي العتبة من دون حقن. أظهر توزيع السرعة النظري حول مقطع الجناح ذي العتبة أن زيادة نسبة حقن الهواء داخل العتبة يؤدي الى تأخير انفصال الجريان الناتج من وجود العتبة على السطح العلوي. المقارنة بين النتائج النظرية و العملية الخاصة بنسبة معامل الرفع إلى معامل الكبح الأعظم أظهرت توافقاً مقبولاً.

كلمات مرشدة (Keywords): حقن الهواء؛ جناح ذي عتبة؛ انفصال الجريان؛ خواص الجناح

## Effect of Direct Injection on the Aerodynamics Characteristics of Wing Airfoil with Backward Facing Step

### Abstract

Experimental and theoretical investigations were performed to study the effect of direct injection of air on aerodynamic characteristics for airfoil with backward facing full step. The experiments were done in a low- speed wind tunnel in order to obtain the pressure distribution on the airfoil surface and finding the aerodynamic characteristics (Lift, drag and lift to drag ratio). Theoretically the (Fluent6.3) software was utilized for simulating the turbulent flow around the airfoils and obtaining the distribution of direction of velocity around airfoil with step. All investigations were made for the (NACA0015) basic airfoil and the other one with a step at air velocity (35m/s) and for Reynolds number ( $Re=4.4 \times 10^5$ ). The experimental results show that there is a considerable effect in using injection of air inside the steps on the pressure. The pressure on the upper surface of the airfoil decrease with increasing the injection ratio. This effect leads to an increase in the lift coefficient (Cl). Due to the horizontal injection inside the full step at ( $U_j/U_\infty=8$ ), the ((Cl)max) was increased by (12.2%) with respect to the basic airfoil, and by (6.27%) with respect to the case of step without injection. The lift to drag ratio ((Cl/Cd)max) was increased by (37.9%) with respect to the basic airfoil and by (30.65%) with respect to the case of step without injection. The theoretical results show

the distribution of velocity vectors around the airfoil with step. The effect of separation of flow was reduced with the increasing of injection ratio. The comparison between the experimental and theoretical((Cl/Cd)max) shows acceptable agreement.

### الرموز المستخدمة

$N/m^2$	ضغط التيار الحر	$P_{\infty}$	m	C	وتر الجناح
-	عدد رينولدز	Re	-	$C_c$	معامل القوة المحورية
-	عدد رينولدز المصحح	$Re_{co}$	-	$C_d$	معامل الكبح
m	سمك الجناح في موقع العتبة	$T_s$	-	$C_l$	معامل الرفع
m/s	سرعة حقن الهواء	$U_j$	-	$C_N$	معامل القوة العمودية
m/s	سرعة التيار الحر	$U_{\infty}$	-	$C_p$	معامل الضغط
m	الاحداثي x	x	-	$D_u$	عمق العتبة %T
-	بعد العتبة عن الحافة الأمامية للمقطع %C	$X_s$	m	H	ارتفاع الماء في المضغط
m	الاحداثي y	y	-	L	طول العتبة %C
deg.	زاوية الهجوم	$\alpha$	-	max	أعظم
$kg/m^3$	كثافة الهواء	$\rho$	$N/m^2$	P	الضغط

### 1- المقدمة:

على انفصال الجريان عن طريق حقن الهواء في مكان معلوم من سطح الجناح من السبل الفعالة في هذا المجال اذ يعمل الهواء المحقون على تخفيف طبقات الهواء القريبة من السطح و بذلك يكسبها زخماً إضافياً يساعد على تراجع انفصال الجريان و بالتالي تحسين الخواص الديناموائية للجناح. و هذا ما تم على يد الباحثين (You and Moin) [2] من خلال تطوير نظام عالي القدرة للسيطرة على انفصال الجريان عن سطح الأجنحة بحقن الهواء من شق في مقدمة السطح العلوي للجناح. توصل الباحثون (Alam, et al.) [3] إلى السيطرة على الجريان في العتبات المواجهة للخلف داخل القنوات بإتباع حقن الهواء داخل العتبة الذي يؤدي إلى تقليل منطقة إعادة الدوران، و كذلك تحسين انسيابية الجريان حول العتبة. كما قدم الباحثون (Batenko, et al.) عام (2002) [4] دراسة نظرية حول تأثير الحقن و المص من الجدران المسامية على الخواص الديناموائية و الانفصال للجريان الطبقي في العتبات المواجهة للخلف داخل القنوات أيضاً إذ تم استعمال جدران مسامية في صنع العتبة وأدى ذلك إلى تقليل قفزة الانفصال بالمقارنة مع العتبة ذات السطح غير المسامي لنفس عدد رينولدز. يلاحظ أن البحوث السابقة المتعلقة

تعد ظاهرة انفصال الطبقة المتأخرة أو ما يعرف بانفصال الجريان من الظواهر المؤثرة في مجمل الخواص الديناموائية للجناح، كمعامل الرفع و معامل الكبح. اذ أن تأخير حدوث الانفصال يؤدي إلى تحسين أداء الجناح بسبب تقليل الدوامات خلف نقطة الانفصال أو ما يعرف بالجريان العكسي. قدم الباحثان (Kline and Fogleman) عام (1972) تصميمًا لمقطع جناح جديد يحتوي على عتبة مواجهة للخلف [1]، ففي هذا النوع من الأجنحة تعمل العتبة المواجهة للخلف على تحسين الخواص الديناموائية للجناح كزيادة معامل الرفع (Cl) و زيادة نسبة الرفع إلى الكبح (Cl/Cd) من خلال تأخير حدوث الانفصال الذي يتيح عدم التواصل الديناموائي في منطقة العتبة إذ تعمل على احتواء التيار المنفصل في داخلها، و هذا يؤدي إلى زيادة مدى زوايا الهجوم قبل حدوث ظاهرة الأنهاء. لم تلاق مقاطع الأجنحة ذات العتبات الاهتمام الكافي في حينها حتى أواخر التسعينات من القرن الماضي اذ أعيد تسليط الضوء مرة أخرى على هذا النوع من الأجنحة باعتبارها أحد الحلول الفعالة للسيطرة على ظاهرة الانفصال في الأجنحة الثابتة أو الدوارة على حد سواء. تعد السيطرة

عن طريق صمام أمان خاص و سعة الخزان (50 L) والقدرة الكهربائية للضاغط هي (2 kW). و مقياس تدفق الهواء (Flow meter) من نوع (Heinrichs)، ذي مدى (0 – 300 L/h). تم توصيل الضاغط بفتحة حقن الهواء في مقطع الجناح بوساطة أنبوب مطاطي يربط بأنبوب قياس الضغط الساكن الخاص بفتحة الحقن المختارة. و يتم التحكم بمعدل تدفق الهواء بوساطة صمام تحكم بوابي.

تحتسب سرعة حقن الهواء ( $U_j$ ) من فتحة الحقن من معدل تدفق الهواء الذي يمثل حاصل ضرب مساحة فتحة الحقن في سرعة الهواء مع الأخذ بنظر الاعتبار معدل خسائر التدفق المأخوذ من المصدر [6].

## 2-2 حساب المعاملات الديناميكية:

تم إجراء حسابات الجانب العملي والمتمثلة بحساب توزيع الضغط على سطح مقطع الجناح ومن ثم حساب كل من معامل الرفع والكبح الضغطي للمقطع المستعمل بالاستناد إلى المعادلات الآتية [7]:

$$C_P = \frac{(P - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} = \frac{(H - H_s)}{(H - H_t)} \quad (1)$$

والتي من خلالها تم حساب معاملات القوى الديناميكية العمودية والمحورية وذلك بتكامل توزيع الضغط على طول الوتر وهي كالآتي:

$$C_N = \int_0^1 (C_{P_{Lower}} - C_{P_{Upper}}) d\left(\frac{x}{c}\right) \quad (2)$$

$$C_C = \int_{-y/c}^{y/c} C_P \cdot d\left(\frac{x}{c}\right) \quad (3)$$

تم حل المعادلتين (2)، (3) عددياً باستخدام طريقة سمبسون (3/8) للتكامل العددي باستخدام (12) شريحة على كل من السطحين العلوي والسفلي للجناح. وتم حساب كل من معامل الرفع والكبح الناشئ عن الضغط من المعادلتين الآتيتين:

$$C_l = C_N \cos a - C_C \sin a \quad (4)$$

$$C_d = C_N \sin a + C_C \cos a \quad (5)$$

بالجريان حول الأجحة ذات العتبات، كانت تبحث في تأثير العتبة في الخواص الديناميكية بدون حقن. في حين ركزت البحوث التي تتضمن الحقن داخل العتبات في حال استعمال العتبة داخل القنوات و ليس على مقطع جناح. لذا فإن الهدف الأساس من هذا البحث هو دراسة تأثير حقن الهواء المباشر داخل العتبة في الخواص الديناميكية للجناح ذي العتبة الكاملة المواجهة للخلف. و التعرف على سلوك الجريان حول المقطع ذو العتبة عند حقن الهواء بنسب مختلفة داخلها.

## 2- الجانب العملي:

لغرض التعرف على تأثير الحقن المباشر للهواء في العتبة المواجهة للخلف في الخصائص الديناميكية لمقطع الجناح ذي العتبة الكاملة تم إجراء الاختبارات العملية على نموذجين من الأجحة، الأنموذج الأول هو جناح من نوع (NACA 0015) غير المعدل، أما النوع الآخر فهو جناح ذو عتبة كاملة مواجهة للخلف في السطح العلوي منه ( $Lu=0.5C$ ,  $Du=0.5T$ ) كما في الشكل (1)، أما الجهاز المستعمل في الاختبارات العملية فهو النفق الهوائي ذو السرعة الواطئة. إن أبعاد أنموذج الجناح الرئيس تتمثل بكونه ذا شكل مستطيل و ذا باع مقداره (305mm) وله وتر مقداره (180mm) وأعلى سمك له عند ( $x=54mm$ ) ابتداء من الحافة الأمامية للمقطع وقدره (27mm)، فضلاً عما سبق فإن إحداثيات المقطع أخذت مطابقة للمقطع المذكور في المصدر [5]. تم تثبيت أنابيب الضغط الساكن على السطح العلوي وعددها (13) أنبوباً، هذه الأنابيب مصنوعة من الفولاذ المقسى بقطر خارجي قدره (1mm) وقطرها الداخلي قدره (0.7mm). يوضح الجدول (1) توزيع مواقع تقويع الضغط الساكن لمقطع الجناح ذي العتبة الكاملة المواجهة للخلف. وقد وضعت جميع فتحات قياس الضغط الساكن في منتصف الباع لتقليل تأثير الجدران الجانبية للنفق في القراءات.

تمثل النقطة (A) في الشكل (1) موقع ثقب حقن الهواء داخل العتبة.

## 2-1 منظومة حقن الهواء:

تتكون منظومة حقن الهواء من ضاغط الهواء نوع (MANCO) ذا مرحلة واحدة، أقصى ضغط له (11bar) يتم تحديده

## 1. حل المسألة (Solution of the problem)

يتم في هذه الخطوة التحضير لحل المسألة إذ يتم اختيار نوع الجريان مستقر بالنسبة للزمن وثنائي الأبعاد والجريان هو اضطرابي لا انضغاطي و نموذج الاضطراب المستخدم هو من نوع  $(k - e)$ ، وكذلك تحديد سرعة الجريان  $(U_{\infty} = 35 \text{ m/s})$  و تحديد قيم سرعة الحقن  $(U_j = 2U_{\infty}, 4U_{\infty}, 6U_{\infty}, 8U_{\infty})$ .  
تم تحديد سرعة الحقن في البرنامج بواسطة إدخال مركبة سرعة عمودية على السطح في موقع الحقن المعين. هذه السرعة تكون ذات قيمة ثابتة مساوية إلى سرعة الحقن المختارة.

2. معاينة النتائج (Viewing of results).

## 4- النتائج و المناقشة:

تم تقسيم نتائج هذا البحث على قسمين رئيسيين، يشمل الأول جميع النتائج التي تم الحصول عليها من الاختبارات العملية في النفق الهوائي لمقطع الجناح الأصلي (NACA 0015) و مقطع الجناح ذي العتبة الكاملة مع أو بدون حقن. تم إجراء الاختبارات العملية باستخدام جهاز النفق الهوائي ذي السرعة الواطئة، و كان معدل سرعة جريان الهواء داخل حيز الاختبار  $(35 \text{ m/s})$  و عدد رينولدز المصحح  $(Re = 4.4 \times 10^5)$ . تتضمن النتائج العملية كل من توزيع الضغط  $(C_p)$  على طول وتر مقطع الجناح و معاملي الرفع  $(C_l)$  و الكبح الضغطي  $(C_d)$ ، و نسبة الرفع الى الكبح. أما القسم الثاني فيشمل النتائج التي تم الحصول عليها من برنامج (Fluent 6.3) و تتضمن توزيع متجهات السرعة حول مقاطع الأجنحة التي تعطي صورة واضحة لتأثير الحقن في العتبات في سلوك الجريان حول مقطع الجناح. و قد تم الأخذ بعين الاعتبار تصحيح كل من زوايا الهجوم و عدد رينولدز المستخدمة في النفق الهوائي بسبب تغيير زوايا الهجوم لمقطع الجناح داخل حيز الاختبار و من خلال معادلات تصحيح النفق الهوائي [10].

## 4-1 النتائج العملية:

## مقطع الجناح الأصلي (NACA 0015):

يبين كلا من الشكل (4)، و الشكل (5) توزيع الضغط على طول الوتر للسطحين العلوي والسفلي على التوالي، و الشكل

## 3- الجانب النظري:

للوصول إلى الصورة الكاملة لتأثير الحقن في العتبة، تم استخدام حقيبة برمجيات (Fluent 6.3) لمحاكاة الجريان المستقر ثنائي الأبعاد الاضطرابي و اللانضغاطي للحصول على توزيع متجهات السرعة و الخواص الديناميكية لمقطع الجناح ذو العتبة مع و بدون حقن.

يتم توظيف برنامج (Fluent 6.3) على مرحلتين [8]:

**المرحلة الأولى (Pre Processing):** يتم فيها تجهيز الشكل الهندسي للحل و بتطبيق برنامج (Gambit 2.3) على وفق الخطوات الآتية كما في الشكل (2) حيث يمثل الشكل الهندسي للجناح المستخدم مع شبكة الحل العددي أما الشكل (3) فيمثل حيز الاختبار و أبعاده حسب توصيات المصدر [8]:

1- **تكوين النموذج (Modeling):** يتم رسم الحدود الخارجية لمقطع الجناح. ثم يحول المقطع كمساحة داخل حيز الاختبار. إن أبعاد حيز الاختبار المبينة بالشكل (3) تضمن التقليل من تأثير الطبقة المتاخمة للحيز في مقطع الجناح.

2- **تكوين الشبكة (Grid generation):** يتم عمل شبكة من نوع (C-grid) عن طريق تحويل الإحداثيات الكارتيزية  $(x, y)$  إلى نظام إحداثيات الجسم (Body fitted coordinate system)  $(\xi, \eta)$  على وفق توجيهات المصدر [9]. و تتم هذه العملية أولاً بتكوين شبكة اعتيادية و بعدها يتم عمل شبكة دقيقة على سطح الجناح. يتم بعد ذلك تقسيم الخطوط المكونة للمقطع و حيز الاختبار و عمل الشبكة الرئيسة للمساحة المتولدة. أما عدد النقاط في حيز الاختبار فبلغ (50000) نقطة، و نوع الشبكة هو (Map Mesh) رباعية الأضلاع، إذ يمكن إجراء عملية تكتيف (clustering) في المناطق الضرورية (و هي مناطق الانحدار الشديد للسرعة قرب سطح الجناح).

## 3- تصنيف حدود الاختبار .

**المرحلة الثانية (Post processing):** يتم فيها حل المسألة بواسطة برنامج (Fluent 6.3) وفق الخطوات الآتية:

الرفع الناتج عن تقليل الضغط المسلط على السطح العلوي للجناح، و أن أكبر نسبة لمعامل الرفع التي معامل الكبح كانت  $((Cl/Cd)_{max}=44.08)$  وذلك عندما  $(U_j/U_\infty=8)$  و بنسبة زيادة مقدارها (37.9%) عن مقطع الجناح الأصلي. و بنسبة زيادة مقدارها (30.65%) عن مقطع الجناح ذي العتبة الكاملة من دون حقن كما مدون في الجدول (2).

#### 4-2 النتائج النظرية:

##### مقطع الجناح الأصلي (NACA 0015):

يبين الشكل (9) توزيع السرعة الاتجاهية حول مقطع الجناح لنفس زوايا الهجوم التي تم اختبارها عملياً، و من الملاحظ أن انفصال الجريان يحدث قرب الحافة الخلفية عند  $(x/c=0.73)$  من بداية الحافة الأمامية لزوايا هجوم  $(\alpha=4deg)$ . أما عند زوايا هجوم  $(\alpha=8deg)$  فإن انفصال الجريان يحدث عند منتصف مقطع الجناح تقريباً عندما  $(x/c=0.41)$  من بداية الحافة الأمامية للجناح تقريباً و عند زوايا هجوم  $(\alpha=12deg)$  فإن انفصال الجريان يحدث في مقدمة الجناح عندما  $(x/c=0.13)$ .

##### مقطع الجناح ذو العتبة بدون حقن:

يظهر الشكل (10) توزيع متجهات السرعة حول مقطع الجناح ذو العتبة الكاملة من دون حقن، يبين الشكل أن وجود العتبة أدى إلى تراجع انفصال الجريان عند زوايا الهجوم  $(\alpha=12deg)$  بالمقارنة مع المقطع الأصلي في الشكل (9). و عند زوايا هجوم أقل يلاحظ أن العتبة قد أحتوت منطقة التيار الدوراني الذي ينشأ فوق السطح العلوي للمقطع.

##### مقطع الجناح ذو العتبة مع الحقن:

تظهر الأشكال من (11) إلى (14) توزيع متجهات السرعة حول مقطع الجناح ذو العتبة الكاملة مع الحقن الأفقي حيث نلاحظ أن الحقن يؤدي إلى تراجع موقع انفصال الجريان و أضمحلاله. و هذا التراجع يزداد بزيادة نسبة الحقن، إن التأثير الإيجابي لاستعمال العتبة مع الحقن يظهر جلياً عند مقارنة هذه الأشكال مع شكلي توزيع السرعة للجناح الأصلي (9) و للجناح ذي العتبة الكاملة من دون حقن (10).

يظهر الشكلين (15) و (16) العلاقة بين

$(Cl/Cd)_{max}$  و نسبة الحقن العملية و النظرية على التوالي. قيمة  $(Cl/Cd)_{max}$  تزداد عموماً

(7) يمثل معامل الرفع ومعامل الكبح الضغطي و النسبة بينهما، التي تم حسابها جميعاً من معامل الضغط المقاس على سطح المقطع، و أن أكبر قيمة لمعامل الرفع كانت  $(Cl_{max}=1.088)$  عند  $(\alpha=12deg)$  و لكن أكبر نسبة لمعامل الرفع إلى معامل الكبح الضغطي هي  $((Cl/Cd)_{max}=31.96)$  و ذلك عند  $(\alpha=8deg)$  كما مبين بالشكل (7). سيتم الاستفادة من هذه الأشكال للمقارنة مع الأشكال الخاصة بالأجنحة ذات العتبات المواجهة للخلف لدراسة تأثير نسبة الحقن داخل العتبة في الخواص الديناميكية للجناح ذي العتبة المواجهة للخلف.

##### مقطع الجناح ذو العتبة بدون حقن:

يظهر الشكل (6) توزيع الضغط على السطح العلوي لمقطع الجناح ذي العتبة الكاملة عند الحقن الأفقي. و حالة عدم الحقن تكون عندما  $(U_j/U_\infty=0)$ ، و يظهر مدى تأثير العتبة الكاملة المواجهة للخلف في توزيع الضغط مقارنة مع توزيع الضغط على سطح العلوي لمقطع الجناح الأصلي (NACA 0015) في الشكل (4). يلاحظ وجود تغير في الضغط المسلط عند بداية الحافة الأمامية للعتبة بسبب تكون الدوامات الناتج عن التغير المفاجئ لسطح الجناح، حيث يبدأ الضغط بالانخفاض و يصل انخفاض الضغط إلى مستوى أقل من الضغط المسلط على مقطع الجناح الأصلي عند نفس الموقع، وهذا يؤدي إلى نشوء معامل رفع سالب عند  $(\alpha=0deg)$ ، الناتج عن عدم تناظر توزيع الضغط على سطحي المقطع، إذ أن قيمة معامل الرفع عند هذه الزوايا  $(Cl=-0.226)$ ، و أن أعظم معامل رفع كان  $(Cl_{max}=1.149)$ ، عندما  $(\alpha=12deg)$ . أما أكبر نسبة لمعامل الرفع إلى معامل الكبح كانت  $((Cl/Cd)_{max}=33.74)$  عندما  $(\alpha=4deg)$  كما مبين في الشكل (8) عندما  $(U_j/U_\infty=0)$ .

##### مقطع الجناح ذو العتبة مع الحقن:

يظهر الشكل (6) توزيع الضغط على السطح العلوي لمقطع الجناح ذي العتبة الكاملة مع الحقن الأفقي الموازي لوتر مقطع الجناح، و يلاحظ التأثير الواضح لعملية الحقن على توزيع الضغط، إذ أن زيادة نسبة الحقن تؤدي إلى خفض الضغط المسلط على السطح العلوي لمقطع الجناح في منطقة العتبة و الناتج عن أكتساب الهواء الموجود قرب سطح الجناح سرعة إضافية بسبب تيار الهواء المحقون في العتبة. و كذلك يبين الشكل (8) الزيادة الحاصلة في معامل



4. المقارنة بين النتائج النظرية و العملية الخاصة بنسبة  $(Cl/Cd)_{max}$  أظهرت توافقاً مقبولاً.

#### المصادر

[1]-Kline, R.L. and Fogleman, F.F. "Airfoil for Aircraft" U.S. Patent No.3,706,430, Washington, D.C., 1972.

[2]-You, D. and Moin, P. "Large-Eddy Simulation of Flow Separation Over an Airfoil with Synthetic Jet Control" Center for Turbulence Research Annual Research Briefs, 2007.

[3]-Alam, M. R. Liu, W. and Haller, G. "Closed-Loop Separation Control: An Analytic Approach" PHYSICS OF FLUIDS 18, 043601. 2006.

[4]-Batenko, S.R. Grechanova, A.P. and Terekhov, V.I. "The Effect of Porous Blowing and Suction on Aerodynamics and Heat Transfer in Separated Laminar Flow in Duct Behind of Backward Facing Step" The Physical Principles of Experimental and Mathematical Modeling of Gas Dynamics and Heat Mass Transfer in Power Plants\ Saint Petersburg, pp. 34-39. 2002.

[8]-Abbott, I.H. and Von Doenhoff, A.E. *Theory of Wing Sections*, Dover publications, INC. 1959.

[9]-Patrick, H. O. and William, E. C. *Compressible Fluid Flow*, McGraw-Hill, INC. 1997.

[10]-Houghton, E.L. and Carpenter, P.W. *Aerodynamics for Engineering Student*, Butterworth-Heinemann, 2003.

[5]-{FLUENT USERS SERVICES CENTER}, <http://www.Fluentusers.com>, 2006.

[6]-Anderson, J. D. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*, McGraw-Hill, INC. 1995.

[7]-Rae, J.W.H. and Pope, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley & Sons 1999.

بزيادة نسبة الحقن. يلاحظ أن قيم  $(Cl/Cd)_{max}$  العملية تكون أكبر من القيم النظرية و السبب يعود إلى كون معامل الكبح العملي يمثل معامل الكبح الضغطي فقط و المحسوب من توزيع الضغط على سطح الجناح. في حين أن معامل الكبح النظري الذي تم الحصول عليه من برنامج (Fluent 6.3) يمثل معامل الكبح الكلي.

#### 6- الاستنتاجات:

1. أظهرت النتائج العملية كما كان متوقعاً التأثير الواضح لحقن الهواء داخل العتبة في قيمة معامل الضغط، إذ أن زيادة نسبة حقن الهواء تؤدي إلى تقليل الضغط المسلط على السطح العلوي لمقطع الجناح. و يظهر هذا التأثير واضحاً في منطقة الحقن. أن زيادة نسبة حقن الهواء تؤدي إلى انخفاض منتظم بالضغط المسلط على طول منطقة العتبة.

2. أظهرت النتائج الخاصة بتوزيع متجهات السرعة للجناح ذي العتبة الكاملة المواجهة للخلف أن زيادة نسبة حقن الهواء داخل العتبة كما هو متوقع يؤدي إلى تراجع موقع انفصال الجريان و أضمحلاله على السطح العلوي لمقطع الجناح لزوايا الهجوم من  $(\alpha=0deg)$  إلى  $(\alpha=12deg)$  عموماً. و قد أظهرت النتائج أيضاً أن زيادة نسبة الحقن في الجناح ذي العتبة الكاملة المواجهة للخلف يجعل الجريان حول مقطع الجناح أكثر أنسيابية.

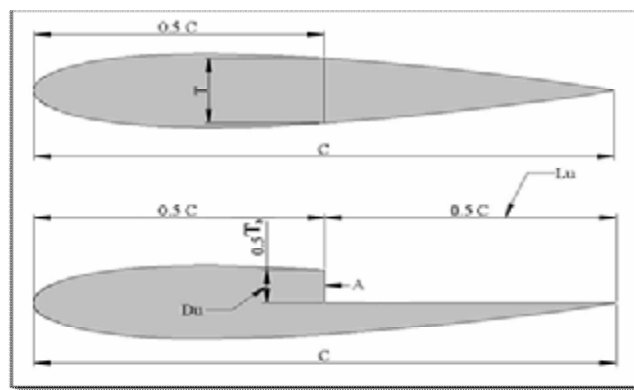
3. تؤدي زيادة نسبة الحقن داخل العتبة إلى زيادة معامل الرفع بصورة عامة. نتيجة انخفاض الضغط المسلط على السطح العلوي لمقطع الجناح. ففي النتائج الخاصة بالجانب العملي للجناح ذي العتبة الكاملة، وجد أن أكبر زيادة لمعامل الرفع  $(Cl_{max})$  كانت بمقدار (12.2%) عن المقطع الأصلي و بمقدار (6.27%) عن المقطع ذي العتبة الكاملة من دون حقن. و وجد أيضاً أن زيادة نسبة الحقن داخل العتبة في الجناح ذي العتبة الكاملة تؤدي إلى زيادة نسبة معامل الرفع إلى معامل الكبح  $((Cl/Cd)_{max})$ ، إذ كانت الزيادة بمقدار (37.9%) عن المقطع الأصلي و عن المقطع ذي العتبة الكاملة من دون حقن كانت الزيادة بمقدار (30.65%).

جدول (1) إحداثيات تقوَب الضغط الساكن للمقطع ذو العتبة الكاملة في السطح العلوي

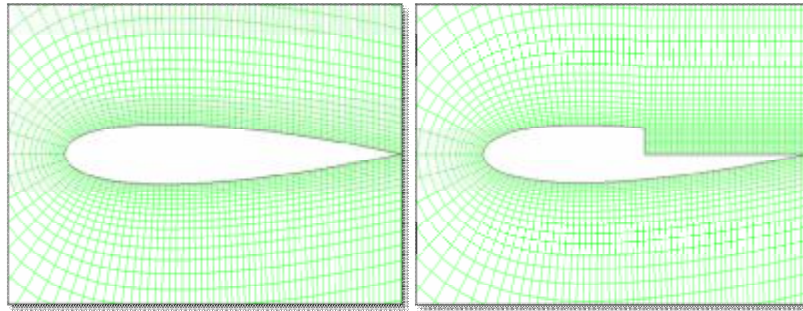
Hole	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X/C	0.01	0.04	0.09	0.18	0.3	0.4	0.5	0.5	0.51	0.61	0.69	0.77	0.86

جدول (2) النتائج العملية لمقاطع الأجنحة الثلاثة عند ( $U_j/U_\infty=8$ )

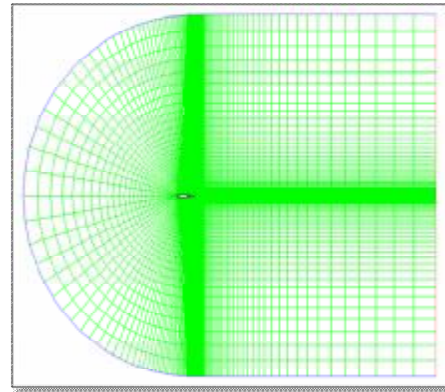
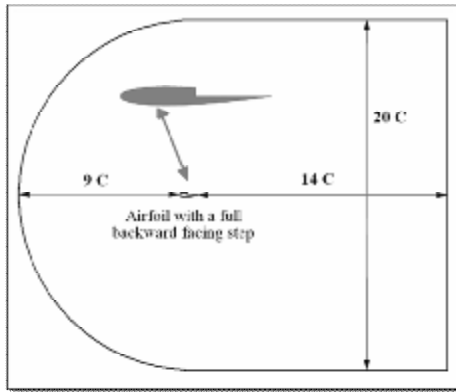
النسبة المئوية للزيادة عن المقطع المناظر من دون حقن		النسبة المئوية للزيادة عن المقطع الأصلي		$(Cl/Cd)_{max}$	$(Cl)_{max}$	نوع الجناح
$(Cl/Cd)_{max}$ %	$(Cl)_{max}$ %	$(Cl/Cd)_{max}$ %	$(Cl)_{max}$ %			
-	-	-	-	31.96	1.088	NACA 0015
-	-	5.57%	5.6%	33.74	91.14	الجناح ذو العتبة الكاملة من دون حقن
30.65%	6.27%	37.9%	12.2%	44.08	1.221	الجناح ذو العتبة الكاملة مع الحقن عند (A)



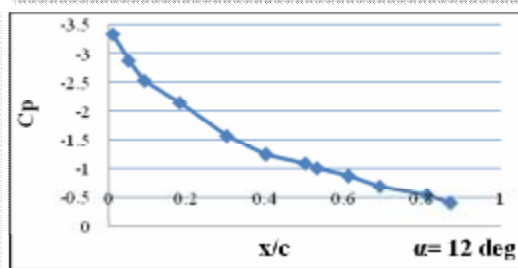
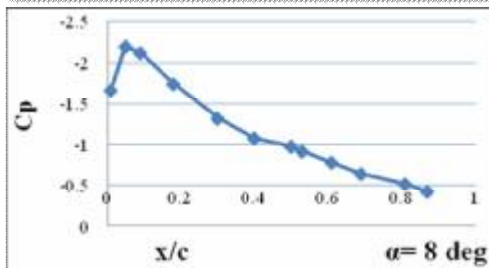
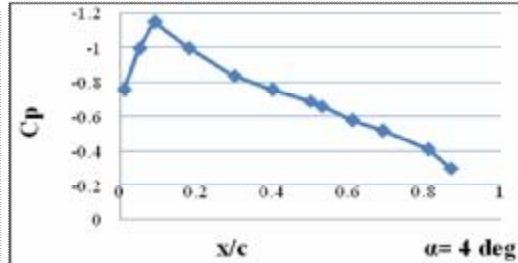
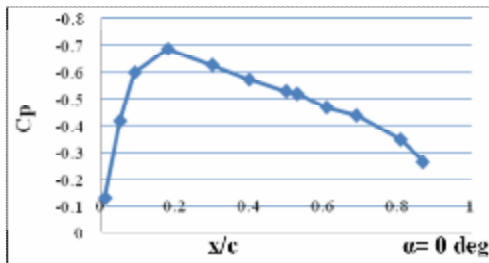
الشكل (1) مقاطع الأجنحة المستخدمة



شكل (2) شكل الشبكة حول مقطع الجناح الأصلي و الجناح ذو العتبة الكاملة المواجهة للخلف

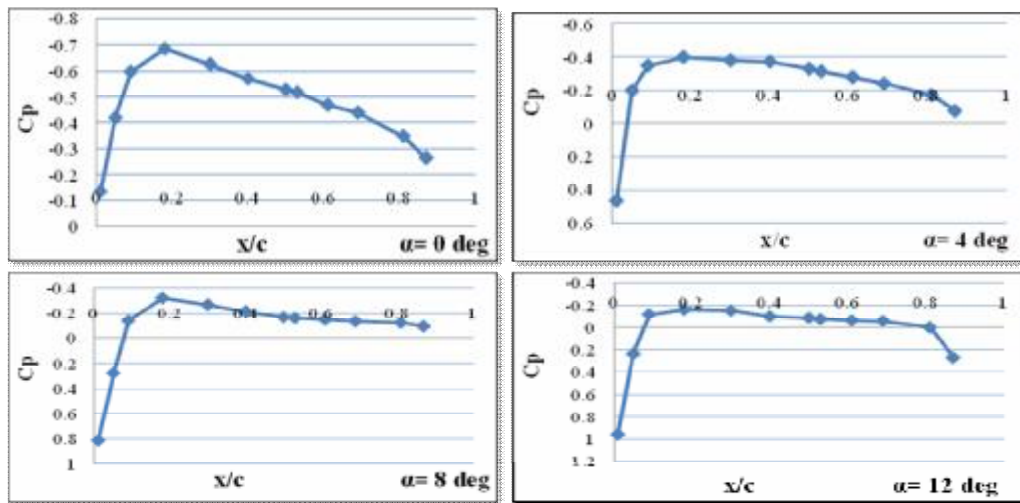


شكل (3) أبعاد حيز الاختبار و مقطع الجناح مع شبكة الحل العددي

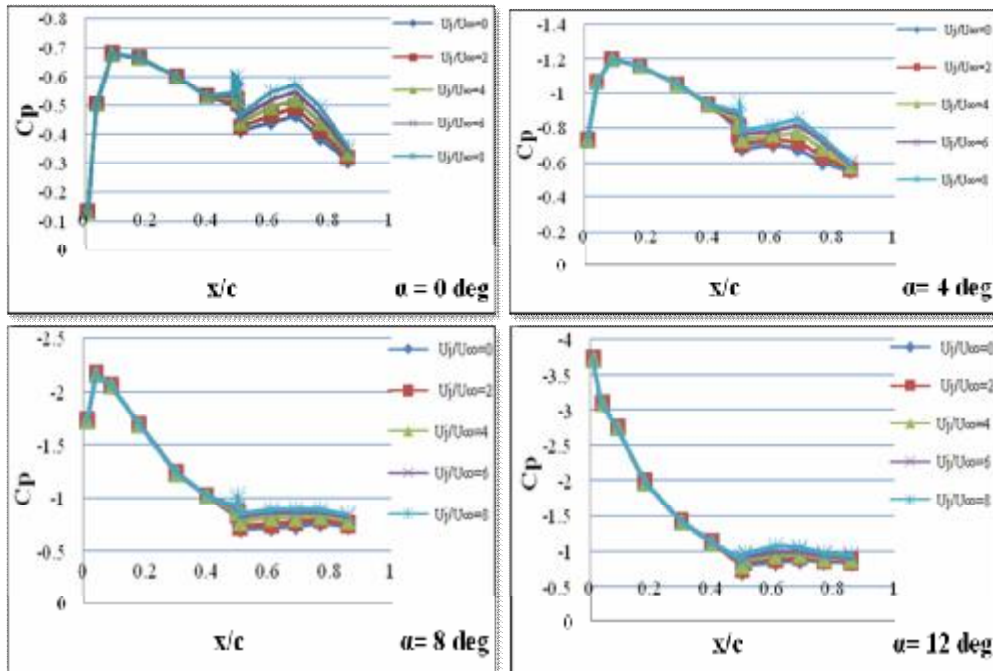


شكل (4) توزيع الضغط المقاس على السطح العلوي لمقطع الجناح الأصلي (NACA 0015)

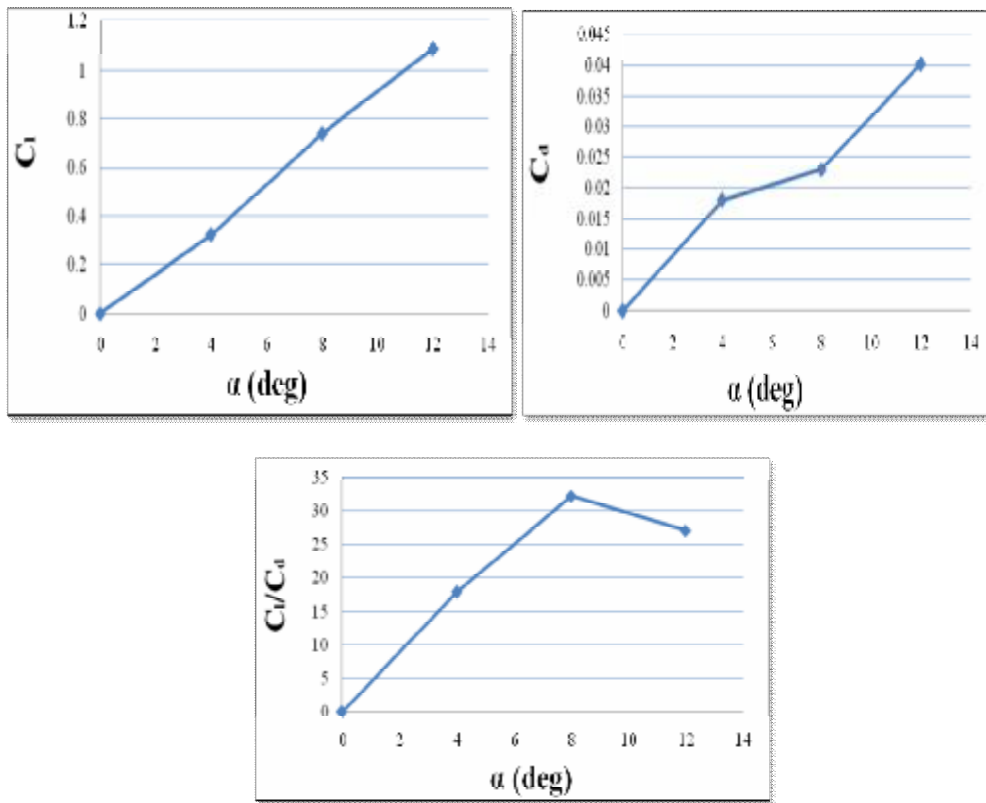




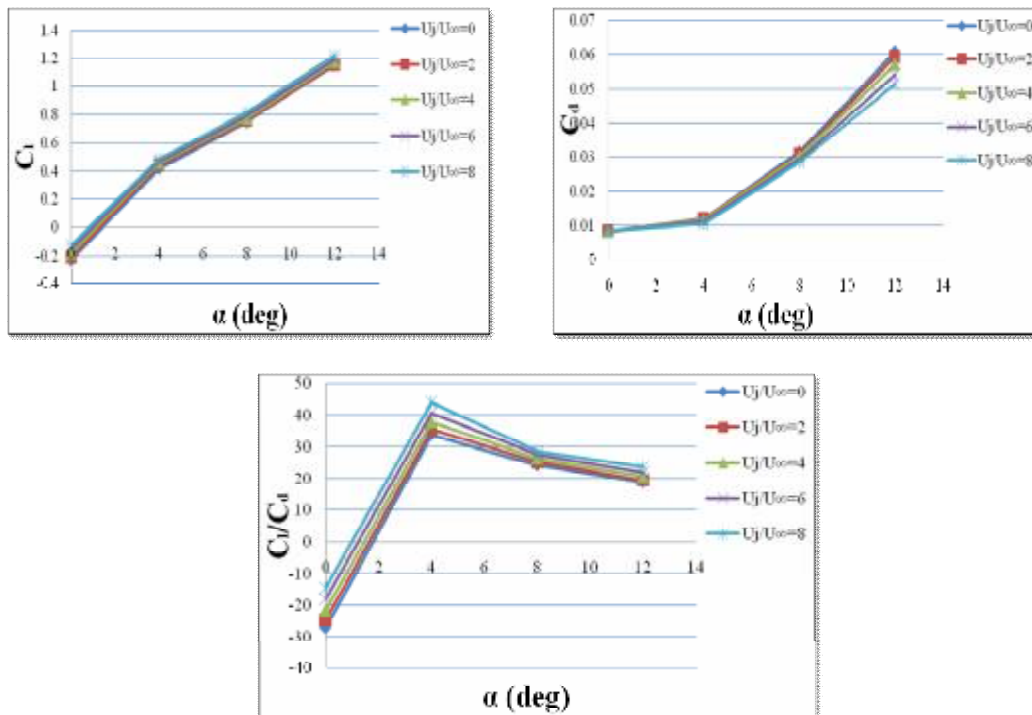
شكل (5) توزيع الضغط المقاس على السطح السفلي لمقطع الجناح الأصلي (NACA 0015)



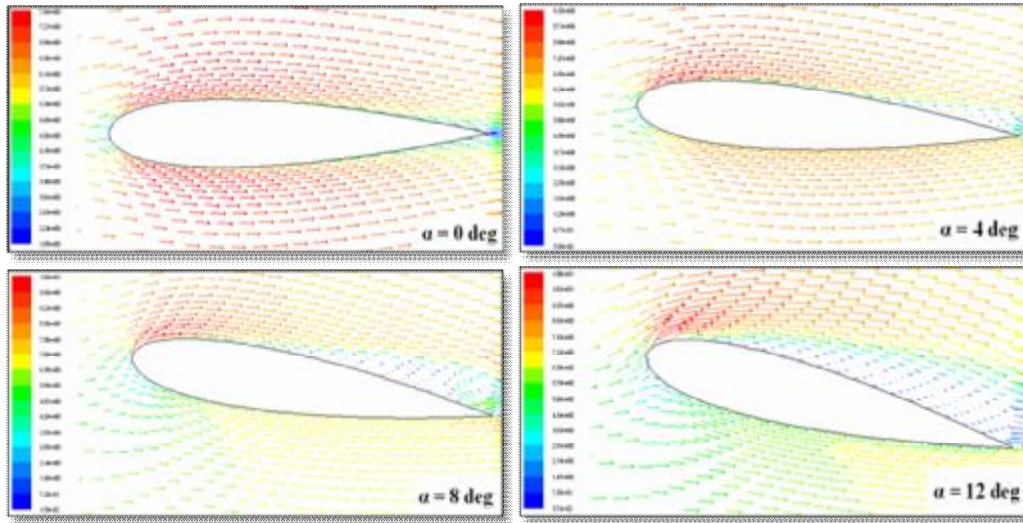
شكل (6) توزيع الضغط المقاس على السطح العلوي للجناح ذو العتبة الكاملة – الحقن الأفقي



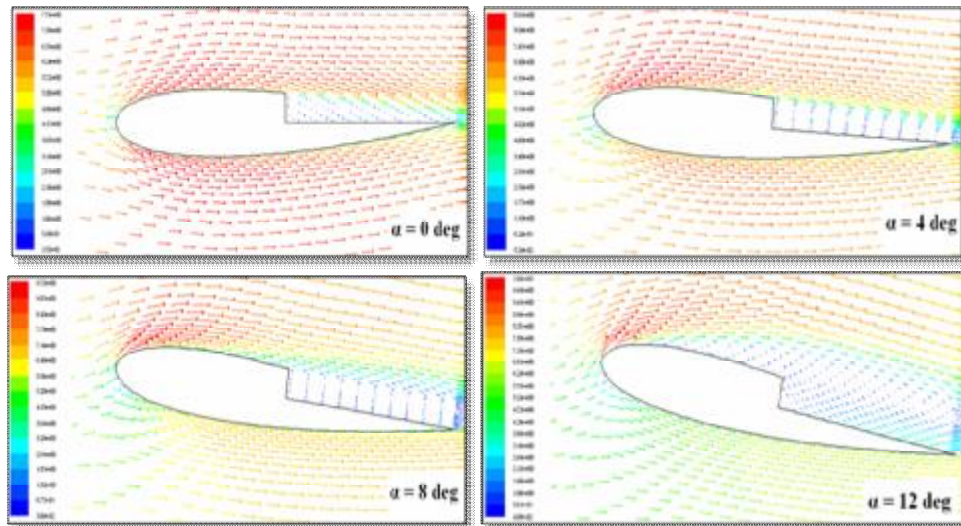
شكل (7) منحنيات الرفع و الكبح و نسبة الرفع إلى الكبح العملية للجناح الأصلي (NACA 0015)



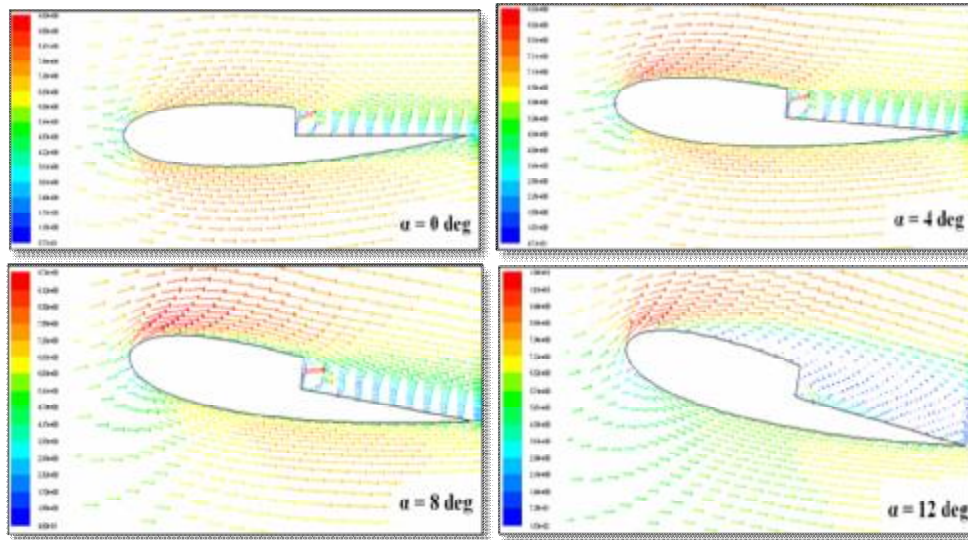
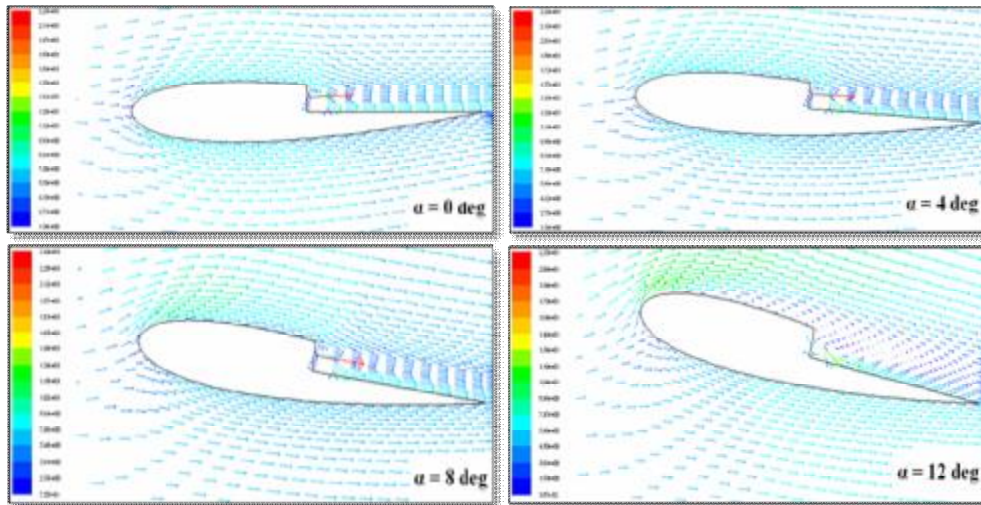
شكل (8) منحنيات الرفع و الكبح و نسبة الرفع إلى الكبح العملية للجناح ذو العتبة الكاملة



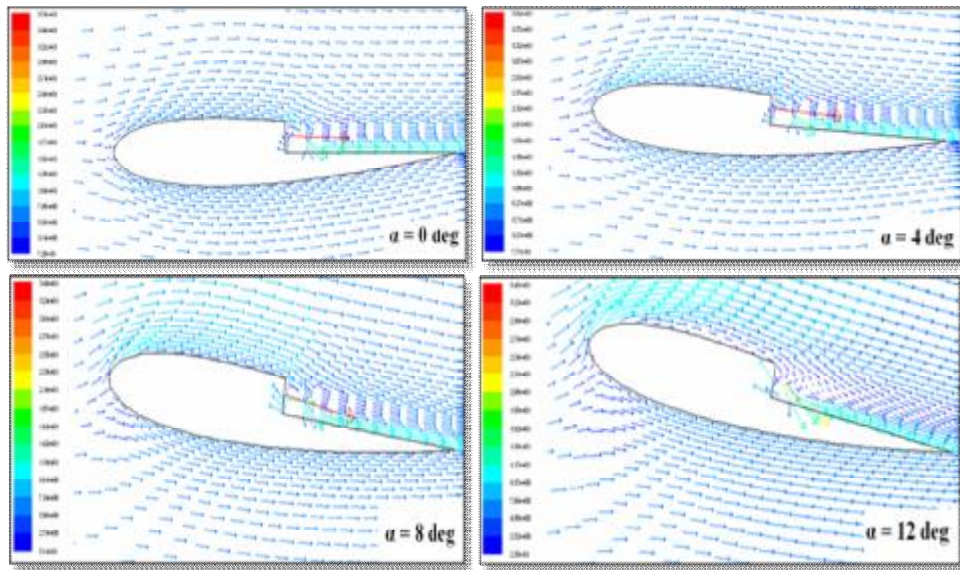
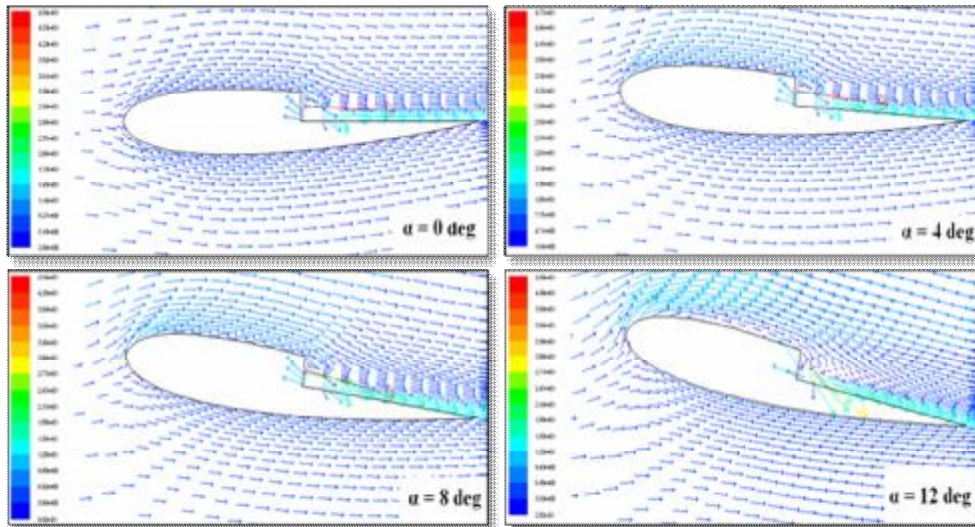
شكل (9) توزيع السرعة الاتجاهية للجناح الأصلي (NACA 0015)



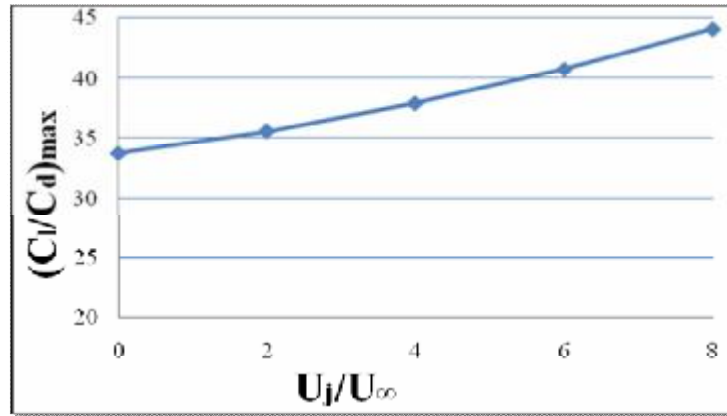
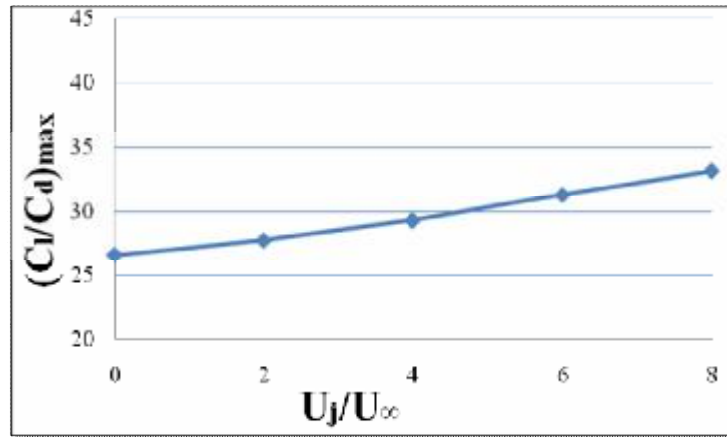
شكل (10) توزيع السرعة الاتجاهية للجناح ذو العتبة الكاملة من دون حقن

شكل (11) توزيع السرعة الاتجاهية للجناح ذو العتبة الكاملة – الحقن الأفقي و ( $U_j/U_\infty=2$ )شكل (12) توزيع السرعة الاتجاهية للجناح ذو العتبة الكاملة – الحقن الأفقي و ( $U_j/U_\infty=4$ )



شكل (13) توزيع السرعة الاتجاهية للجناح ذو العتبة الكاملة – الحقن الأفقي و ( $U_j/U_\infty=6$ )شكل (14) توزيع السرعة الاتجاهية للجناح ذو العتبة الكاملة – الحقن الأفقي و ( $U_j/U_\infty=8$ )



شكل (15) علاقة  $(C_l/C_d)_{\max}$  مع نسبة الحقن العملية ( $Re_{co} = 4.4 \times 10^5$ )شكل (16) علاقة  $(C_l/C_d)_{\max}$  مع نسبة الحقن النظرية ( $Re_{co} = 4.4 \times 10^5$ )