دراسة تجريبية لحقل الجريان خلف نموذج اسطوانة ذات رأس نصف كروي باستخدام طرائق قياس مختلفة[1]

المهندس يحيى كشكول[2] الأستاذ الدكتور المهندس انطانيوس عقل[3]
الأستاذ الدكتور المهندس ألفريد ليدر[4]

الملخص

يعرض هذا البحث نتائج قياس حقل السرعة لجريان يتميز بطابع إعصاري خلف نموذج اسطوانة، ذات رأس نصف كروي وذلك باستخدام ثلاث طرائق قياس مختلفة هي: مسبار السرعة الليزري – الدوبلري (LDA) Laser-Doppler-Anemometer، ومسبار السلك الساخن Hotwire-Anemometer ومسبار الضغط خماسي الثقوب - Five- Hole Pressure-Probe.

وقد أجريت مقارنة بين نتائج القياس بهدف تحديد دقة قيم السرعة المقيسة ووثوقيتها بالطرائق الثلاث المشار إليها، ومن ثَم تحديد مجال القياس لكل منها، آخذين بالحسبان أن نتائج القياس بمسبار السرعة الليزري – الدوبلري هي الأكثر دقة ووثوقية، لأن المسبار لا يحدث أي تشويش لحقل الجريان.

والجدير بالإشارة أن نتائج قياس حقل السرعة، التي يقتصر عليها هذا البحث، تشكل جزءاً من نتائج تجارب وقياسات عديدة ومختلفة شملت قيم الطاقة الحركية المضطربة، ومركبات السرعة الزاوية، وإجهادات الفص الإعصارية (إجهادات رينولدز المماسية)، وغيرها.

[1] أُعِد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للطالب يحيى كشكول بإشراف الأستاذ الدكتور المهندس أنطانيوس عقل ومشاركة الأستاذ الدكتور المهندس ألفريد ليدر.

[2] قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

[3] قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

[4] معهد ميكانيك السوائل، كلية هندسة الميكانيك وبناء السفن، جامعة روستوك.

1. المقدمة

لدراسة حقول الجريان المستقرة وغير المستقرة، خاصةً عندما يهيمن عليها الطابع الإعصاري، كما في حالة الجريان حول جناح يهتز، أو الجريان خلف مركبة، طورت طرائق نظرية حسابية مختلفة لتحديد القوى، والعزوم المؤثرة في أجسام الجريان، والاستطاعات المتولدة منها. وتستخدم هذه الطرائق اليوم تقنيات الحاسوب للنمذجة والمحاكاة Modelling and Simulation، وتستعين للحل العددي بطرائق الرياضيات العددية مثل طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method (FEM) وطريقة الحجوم المنتهية Finite Volume Method(FVM) وغيرها. وعلى الرغم من التطوير المستمر للبرمجيات المناسبة لهذه الطرائق النظرية، وللطاقات الحاسوبية فإن نتائج الحسابات النظرية ليست مرضية عملياً في جميع الحالات. وعندئذٍ لابد من اللجوء إلى الطرائق التجريبية التي تطورت من حيث مبادئ وأجهزة القياس تطوراً كبيراً. وتصنف هذه الطرائق في فئتين رئيسيتين:

الأولى: تشمل طرائق ترئية الجريان المختلفة، التي تسمح بإجراء دراسة تجريبية **نوعية** لحقل الجريان للتعرف إلى تفاصيله، وتقود إلى فهم بعض الظواهر الفيزيائية المتولدة فيه وتفسيرها، فضلاً عن تحديد مدى تأثير بعض المتحولات في القيم الهيدرو- والإيروديناميكية المتوقعة. مثلاً تأثير شكل الجسم في قوة المقاومة وتغير قيمتها مع تغير صورة الجريان حول الجسم [4، 2].

طُورت، ولا تزال تُطور، طرائق مختلفة لترئية الجريان، انظر مثلاً [10، 11]، مع كل ما يلزمها من تقنيات للتصوير والتسجيل. ومن أهم وأقدم الطرائق التقليدية المعروفة لترئية الجريان طريقة استخدام مواد ملونة، مثل الحبر في جريانات الماء والدخان في جريانات الهواء.

الثانية: تشمل طرائق وأجهزة القياس المختلفة التي تسمح بإجراء دراسات تجريبية **كمية** لقياس وتحديد حقل السرعة والضغط ومركبات الاضطراب لكامل حقل الجريان،

أو في مناطق محددة فيه، انظر مثلاً [1، 2، 4، 11، 12]. تعتمد بعض هذه الطرائق التجريبية على قياس حقل السرعة قيمةً واتجاهاً، باستخدام مسابير الضغط متعددة الثقوب، التي تقيس فروق ضغط تعبر عن مركبات السرعة وبعضها يعتمد على مبادئ كهربائية وحرارية مثل مسابير السلك الساخن والفلم الساخن [13,11]، ومنها ما يعتمد على مبادئ فيزياء الضوء مثل مقاييس السرعة الليزرية الدوبلرية [1,3] . ساعدت كل هذه الطرائق على معرفة وتحليل صورة الجريانات المضطربة ثلاثية البعد وأسهمت في تعميق الفهم الفيزيائي لطبيعة الجريان المضطرب وبنيته المعقدة، والتعرف إلى مناطق انفصال الجريان وتشكّل الأعاصير التي يمكن أن تولد اهتزازات كبيرة قد تؤثر في متانة الأبنية البرجية، ويمكن أن تولد ضجيجاً عالياً خاصة في آلات الجريان، وتؤثر في قوة المقاومة لمركبات النقل التي بدورها تؤثر في استهلاك كمية الوقود، ومن ثَم الانبعاثات المضرة بالبيئة.

قمنا بسلسلة من التجارب المنظمة لقياس المعطيات الرئيسة لحقل جريان ذي طابع إعصاري خلف نموذج بشكل اسطوانة ذات رأس نصف كروي باستخدام طرائق وأجهزة قياس مختلفة، وطرحت بعض نتائج القياس في ورقتي بحث أمام مؤتمرين علميين اختصاصيين، ونشرت ورقتا البحث في وثيقتي مداولات المؤتمرين، انظر [17,16]. وفي هذا البحث سنحصر الموضوع بعرض نتائج القياس **لحقل السرعة** وتحليلها وتقويمها باستخدام:

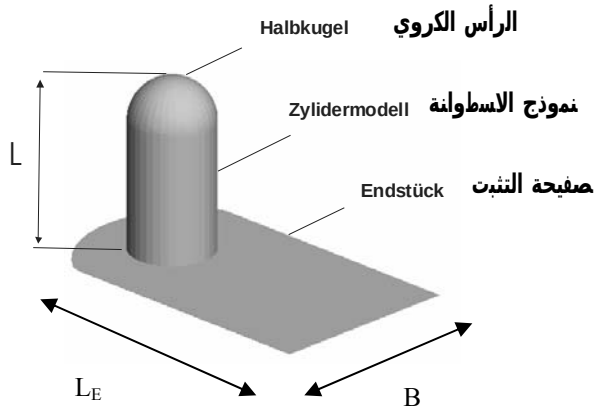
- مسبار الضغط خماسي الثقوب،
- مسبار السلك الساخن ثنائي البعد،
- مقياس السرعة الليزري- الدوبلري.

وسنسعى من خلال مناقشة النتائج، ومقارنتها مع بعضها بعضاً إلى تقديم صورة أوضح للبنية المعقدة للجريان الإعصاري من جهة، وتحديد مدى وثوقية ودقة طرائق وأجهزة القياس المستخدمة من جهة أخرى.

2. وصف التجهيزات التجريبية وتحديد نقاط القياس

1.2 نموذج القياس

تم اختيار نموذج القياس بشكل اسطوانة دائرية ذات رأس نصف كروي، لما له من أهمية كبيرة في كثير من التطبيقات العملية، مثلا في مجال ايروديناميك مركبات النقل [12,10] ، فضلاً عن كونه يتيح إمكانية التعرف إلى بنية وطبيعة الجريان خلف نموذج يجمع اسطوانة مع نصف كرة، لأن تفاصيل الجريان لكل من الاسطوانة والكرة على حده، معروفة من خلال العديد من الدراسات التفصيلية [15,5]. ولكننا لم نعثر في المراجع المتوفرة لنا على أي بحث يعالج الجريان حول النموذج المختار. ويوضح الشكل (1) نموذج القياس المختار، ويتضمن الجدول (1) أبعاده التي تم تحديدها وفقاً لمعطيات القناة الهوائية، انظر(2.2).



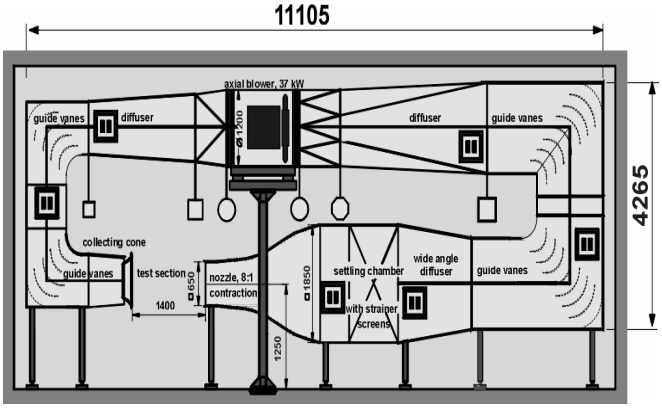
الشكل (1): نموذج القياس

الجدول (1): أبعاد نموذج القياس

قطر الاسطوانة ونصف الكرة	D = 109 [mm]
ارتفاع النموذج	L=219 [mm]
نسبة الطول الى القطر	L/D=2
طول صفيحة التثبيت	L_E = 431 [mm]
عرض صفيحة التثبيت	B=300 [mm]

2.2 وصف القناة الهوائية

أنجزت عمليات قياس حقل الجريان خلف نموذج القياس في القناة الهوائية التابعة لمعهد ميكانيك السوائل بجامعة روستوك في ألمانيا، الشكل (2) . القناة من طراز جوتنجن Goettingen ، ذات مقطع قياس Test section مفتوح بطول 1400 mm، ودرجة اضطراب لا تتجاوز 0.5%. يتم توليد تيار الهواء في القناة بواسطة مروحة يديرها محرك كهربائي باستطاعة أعظمية P=37 kW، و صممت فتحة خروج التيار إلى مقطع القياس بشكل نفاثة ذات مقطع مربع الشكل أبعاده 650X650 mm^2 . تبلغ السرعة الأعظمية لجريان الهواء في مقطع القياس V_{max}=54 m/s، ويتم التحكم بسرعة الجريان بواسطة التحكم بسرعة دوران المروحة . القناة مجهزة بميزان سداسي لقياس القوى والعزوم، وكذلك بحامل خاص لتثبيت نموذج القياس المستخدم ، وبحوامل مناسبة لتثبيت أجهزة القياس. فضلاً عن ذلك توفر القناة إمكانية ترئية الجريان والتقاط صور الجريان.



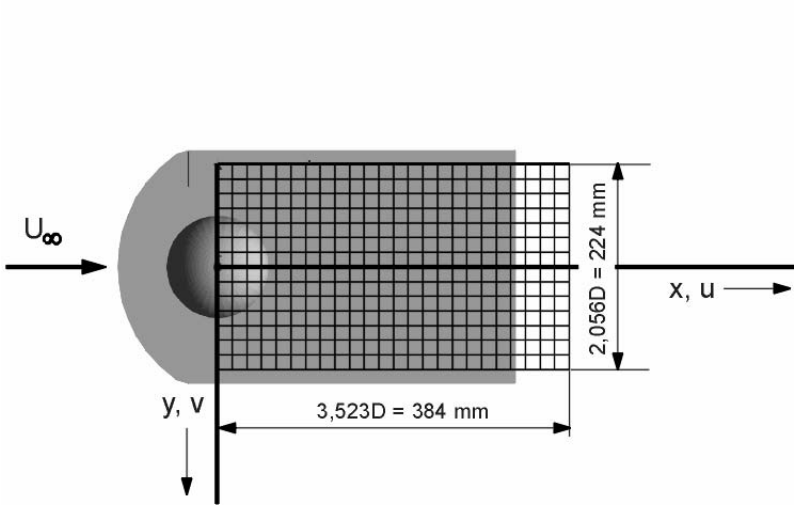
الشكل (2): شكل القناة الهوائية وأبعادها في مخبر ميكانيك السوائل بجامعة روستوك [3]

3.2 تحديد شبك القياس ومستوياته:

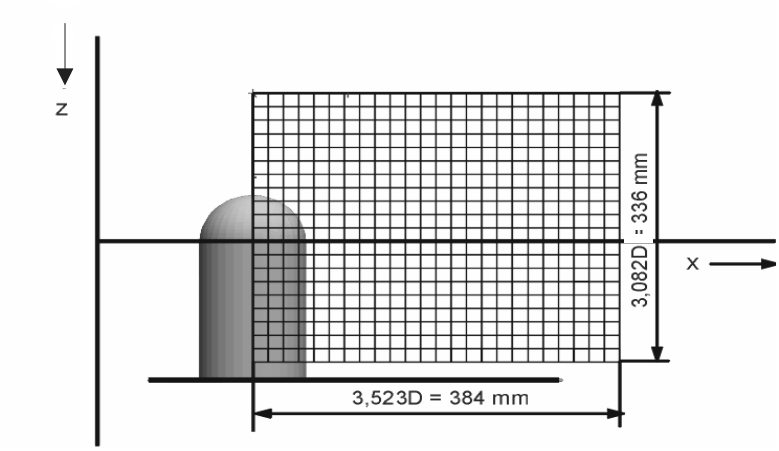
لتحديد نقاط القياس ومستوياته لمسح كامل حقل الجريان خلف نموذج القياس اعتمدنا مبدأ الإحداثيين x و y منطبقاً على محور الاسطوانة، الشكل (3-a)، ومبدأ الإحداثي z منطبقا على نقطة تقاطع محور الاسطوانة مع صفيحة التثبيت، الشكل (3-b). وحددت نقاط القياس باتجاه المحور x في المجال: $0 \le x \le 3.532.D = 384$ mm , وباتجاه المحور y في المجال $-112 \le y \le +112$ mm . وتم اختيار مستويات القياس ، الشكل (3-c)، باتجاه المحور z في المجال $0 \ge z \ge -336$ mm .وباعتماد خطوة قياس mm $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 16$ ، للانتقال من نقطة قياس إلى أخرى باتجاه المحاور الثلاثة تم تحديد عدد نقاط ومستويات القياس باتجاه المحاور الثلاثة x, y, z ، كما هو مبين في الجدول (2)، الذي يتضمن أيضاً العدد الإجمالي لنقاط القياس لكل من أجهزة القياس الثلاثة المستخدمة. وقد بلغ المجموع العام لنقاط القياس 20130 نقطة.

الجدول (2): عدد نقاط ومستويات القياس

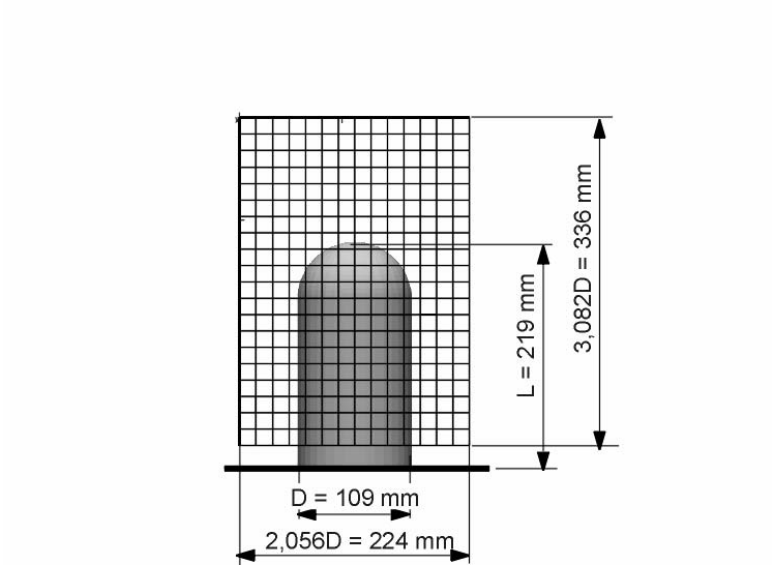
محاور الإحداثيات	x	y	z	عدد نقاط القياس
خطوة القياس [mm]	Δx =16	Δy= 16	Δz = 16	الإجمالي
عدد نقاط القياس باتجاه محاور الإحداثيات باستخدام مسبار الضغط خماسي الثقوب	20	15	19	5700
عدد نقاط القياس باتجاه محاور الإحداثيات باستخدام مسبار السلك الساخن	23	15	19	6555
عدد نقاط القياس باتجاه محاور الإحداثيات باستخدام مقياس السرعة الليزري - الدوبلري	25	15	21	7875



(a



(b



(c

الشكل (3): تحديد شبك القياس ومستوياته

a) شبك القياس في المستوي xy b) شبك القياس في المستوي xz

c) شبك القياس في المستوي yz

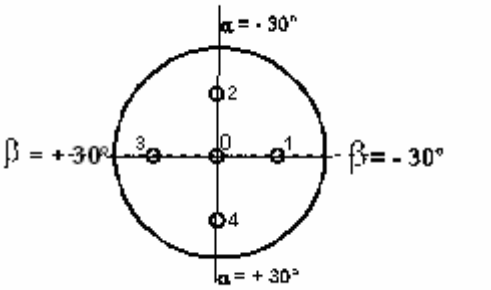
3. وصف أجهزة القياس وتوضيح مبدأ عملها

1.3 مسبار الضغط خماسي الثقوب

استخدم مسبار ضغط خماسي الثقوب، صنع بمعهد ميكانيك السوائل بجامعة ميـونيخ التقنية في ألمانيا، انظر التفاصيل في [12] والشكل (5)، ويمكن بواسطة هذا المـسبار تحديد قيمة السرعة ، واتجاهها ضـمن مجـال زاوي لزاويـة الـورود α وزاويـة الانحراف β مقداره $\alpha, \beta = \pm 30^{\circ}$ وبدقة جيدةً.

يتكون رأس المسبار، المصنع من النحاس الأصفر لسهولة تشكيله وتشغيله، من جزء اسطواني بقطر خارجي 2mm، ومقدمة مخروطية الشكل مجهزة بخمسة ثقوب مرقمة من 0 إلى 4، قطر كل منها 0.2mm ،الشكل (4). ويتألف جسم المسبار من أنبوبـات تتزايد أقطارها الخارجية من 3mm إلى 8mm، و يحتوي في داخله خمس أنبوبـات، كل منها بقطر خارجي 0.4mm و موصولة مع أحد ثقوب رأس المسبار، الشكل (5)، بواسطتها تُنْقَلُ قيم الضغط التي يتحسسها رأس المسبار إلى جهاز ماسـح و معـالج ضغط Scanivalve، الموصول بدوره مع حاسوب مزود ببرنامج خاص Aeroview، انظر[18]، يقوم بحساب السرعة الموضعية قيمة واتجاهاً، في كل نقطة قياس، بدلالـة فروق الضغط المقيسة، فضلاً عن تحليل شعاع السرعة لمركباته، وتمثيل النتائج لكامل حقل الجريان بيانياً. ولإجراء عملية القياس يثبت المسبار على حامل يستطيع الحركـة باتجاه المحاور الثلاثة بواسطة محرك كهربائي، يقاد عن طريق الحاسوب، الشكل(6)، وذلك بعد أن تكون قد تمت معايرة المسبار بدقة عالية.

أجريت معايرة المسبار في القناة الهوائية في جريان غير مشوش سـرعته معلومـة ومحددة U_{∞}=27,72 m/s واتجاهها معلوم ومحدد. وقيست قيم الضغوط $P_{0,\ldots,4}$ ، التي تلتقطها ثقوب رأس المسبار الخمسة 0,1,2,3,4



الشكل (4): ترقيم ثقوب رأس المسبار

الموصولة مع ماسح ومعالج الضغط في 169 نقطة قياس نتجت عن تغيير كل من زاوية الورود α وزاوية الانحراف β بمعدل 5^0 ضمن المجال الزاوي لكل منهما $\alpha,\beta=\pm30^0$. حللت نتائج القياس هذه وعولجت بالحاسوب، ونتيجة ذلك حدد سطح المعايرة المبين في الشكل (7)، والمتضمن قيم معامل زاوية الورود K_α ومعامل زاوية الانحراف K_β المعرفين بالعلاقتين:

$$K_\alpha=\frac{P_4-P_2}{\Delta P} \quad (1)$$

$$K_\beta=\frac{P_3-P_1}{\Delta P} \quad (2)$$

حيث يمثل (P_4-P_2) فرق الضغط بين الثقبين المتقابلين 2 و 4 ويمثل (P_3-P_1) فرق الضغط بين الثقبين المتقابلين 1 و 3 لرأس المسبار. ويمثل ΔP حسب [12] فرق الضغط المتعلق بقيم الضغوط الملتقطة من الثقوب الخمسة وفق العلاقة (3):

$$\Delta P = \left[\frac{1}{5} \sum_{i=0}^{4} \left(P_i - \frac{\sum_{i=0}^{4} P_i}{5} \right)^2 \right]^{0.5} + \left[P_0 - \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{4} \right] \quad (3)$$

وبدلالة ΔP تحسب القيم اللابعدية لكل من الضغط الكلي والضغط الاستاتيكي من العلاقتين:

$$K_{Ps} = \frac{P_0 - P_S}{\Delta P} \quad (4)$$

$$K_{Pt} = \frac{P_0 - P_t}{\Delta P} \quad (5)$$

حيث P_0 يمثل الضغط الملتقط من الثقب 0 لرأس المسبار، و P_s الضغط الاستاتيكي و P_t الضغط الكلي المقيسين بأنبوبة براندل الموصولة مع ميكرومانومتر بيتس Betz ذي الدقة $0.1\ \mathrm{N/m^2}$. عندما يتم توضيع المسبار في نقطة قياس محددة داخل حقل الجريان، الشكل (6)، فإنه يلتقط قيم الضغوط $P_{0....4}$ في تلك النقطة. من هذه القيم يمكن حساب كل من K_α و K_β. وبالعودة إلى منحنى المعايرة يمكن تحديد كل من الزاويتين α, β المقابلتين لقيمة كل من K_α و K_β في كل نقطة قياس، وكذلك قيمة كل من K_{Ps} و K_{Pt}. وبالعودة إلى العلاقتين (4) و (5) وقياس الضغط P_0 يمكن تحديد كل من الضغط الكلي والاستاتيكي حسب العلاقتين (6) و(7):

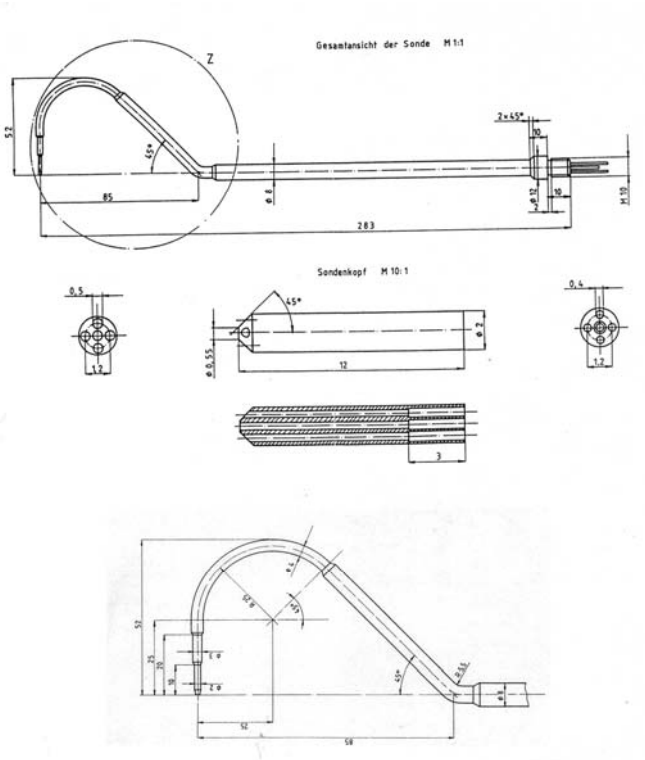
$$p_t = p_0 - K_{pt} \cdot \Delta p \quad (6)$$

$$p_s = p_0 - K_{ps} \cdot \Delta p \quad (7)$$

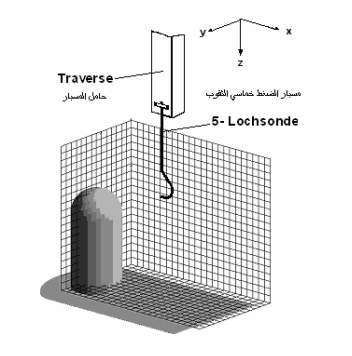
ومن ثَم تنتج قيمة السرعة الموضعية حسب العلاقة (8):

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \qquad (8)$$

شعاع السرعة الموضعية يمكن تحليله إلى مركباته u,v,w. ومن مسح كامل حقل الجريان يتم تحديد حقل السرعة وتمثيله بيانياً.

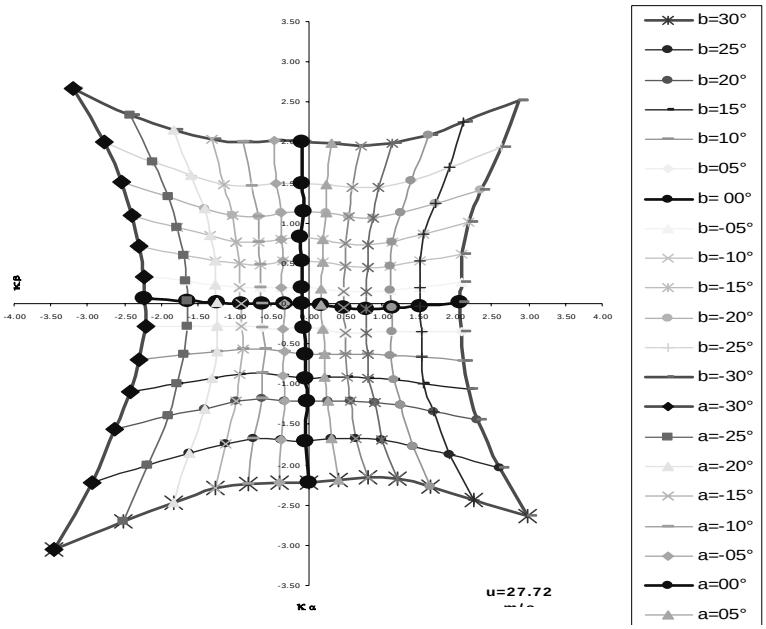


الشكل (5): شكل مسبار الضغط خماسي الثقوب وأبعاده [12]



الشكل (6): توضيع مسبار الضغط داخل حقل الجريان لإجراء القياس

$a = \alpha$ و $b = \beta$



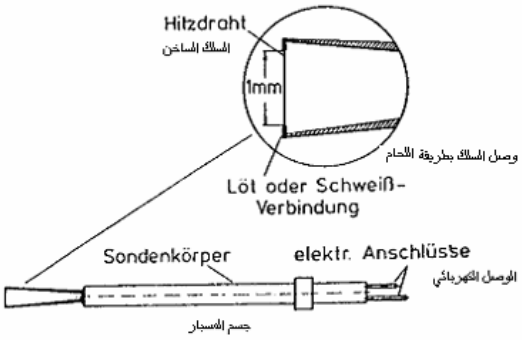
الشكل (7): سطح المعايرة للمسبار عند سرعة جريان U_∞ **= 27.72 m/s**

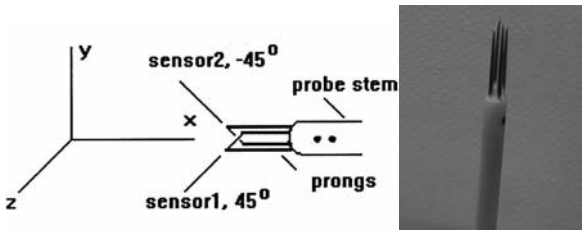
2.3 مسبار السلك الساخن

يعتمد مبدأ عمل مسبار السلك الساخن لقياس مركبات السرعة وتذبذباتها في حقل الجريان خلف نموذج القياس على أن السلك الرفيع والصغير جداً، المثبت على مسندين في رأس المسبار، انظر الشكل (8)، يوصل مع دارة كهربائية تغذيها في أبسط الأحوال مدخرة، الشكل (9-a)، تتألف من جسر قياس M من أجل قياس المقاومة الكهربائية للمسبار R_H، ومن مقاومة متغيرة R لتعيير شدة التيار الكهربائي Ie المار بالمسبار ومن مقياس أمبير A. عندما يوضع السلك المسخن كهربائياً في جريان مائع أو غاز تنقص درجة حرارته وتكون من أجل استطاعة تسخين ثابتة درجة حرارة السلك مقياساً لسرعة الجريان. فإذا فرضنا R_H مقاومة المسبار بعد التسخين، R_o مقاومته قبل التسخين، V سرعة الجريان تنتج من قوانين الانتقال الحراري، حسب [9]، العلاقة:

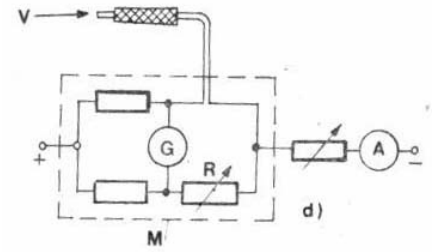
$$I_e^2 \cdot R_H = \left(R_H - R_o\right)\left(A + B\sqrt{V}\right) \quad (9)$$

المعروفة باسم قانون كنج King's law، حيث A وB ثوابت تختلف من مسبار إلى آخر وتتحدد قيمتها بتعيير المسبار عند سرعات معلومة في أقنية تعيير خاصة.

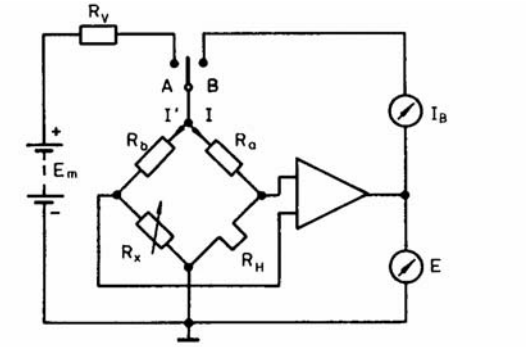




الشكل (8): مكونات مسبار الساك الساخن، حسب [2],[14]



الشكل (9-a): دارة بسيطة توضيحية لوصل مسبار الساك الساخن بطريقة (CCA) [9]
M جسر القياس ، G مقياس جلفاني ، A مقياس امبير، R مقاومة متغيرة

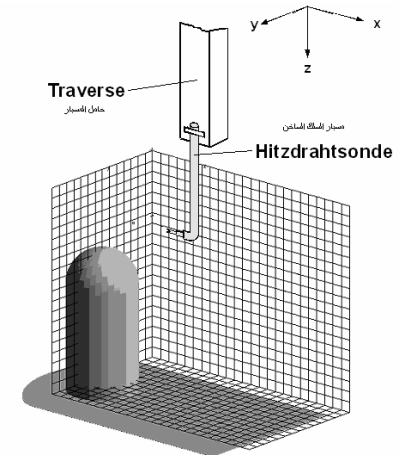


لشكل (9-b): دارة بسيطة توضيحية لوصل مسبار الساك الساخن بطريقة (CTA) [2]
R_x مقاومة متغيرة لتعيير شدة التيار الكهربائي I المار بالمسبار ، R_H مقاومة الساك ،E_m منبع تغذية ، A,B مفتاح قلاب R_V مقاومة لضبط قيمة التيار الكهربائي، E مقياس الجهد ، I_B مقياس أمبير

تستخدم طريقتان لوصل الدارة الكهربائية مع مسبار السلك الساخن:
الأولى طريقة الجهد الثابت أو شدة التيار الثابتة (CCA) , I =const ، والثانية طريقة درجة الحرارة الثابتة أو المقاومة الثابتة (CTA) , R =const. ميزة الطريقة الأولى أن دارة التوصيل بسيطة وتستخدم لقياس سرعات صغيرة جداً، وسيئتها أن عطالة التأشير تزداد مع ازدياد السرعة، ومن ثَم تقل حساسية المسبار. ويعتمد فيها مبدأ القياس على أن مقاومة المسبار R_H تابع للسرعة V بموجب العلاقة (9).
أما الطريقة الثانية فتتطلب دارة توصيل أكثر تعقيداً، الشكل (9-b)، وترتبط كمية الحرارة المنتقلة $Q^{\bullet}$ مع السرعة u وتغير درجة الحرارة ΔT، حسب [2] ، بالعلاقة (10)

$$Q^{\bullet} = \left[A + B(\rho \cdot u)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot \Delta T \quad (10)$$

حيث A, B, n ثوابت تختلف من مسبار إلى آخر وتتحدد قيمتها بتعيير المسبار عند سرعات معلومة. ميزة هذه الطريقة أن حساسية تأشير المسبار لا تتأثر تقريباً بزيادة السرعة، ولذلك فإن غالبية مسابير السرعة ذات السلك الساخن تعمل على أساسها.
استخدم في البحث مسبار سلك ساخن ثنائي البعد طراز 55P61 ، ومن صنع شركة دانتيك Dantec، ويعمل بطريقة درجة الحرارة الثابتة (CTA) [14] ، الشكل (8). يتألف هذا المسبار من سلكين رفيعين جداً مصنوعين من خليطة معدنية من البلاتينيوم والتنغستين، يبلغ قطر السلك الواحد D=0.5 µm وطوله L=1.25 [mm]. قبل البدء بعملية القياس داخل حقل الجريان يثبت المسبار على حامل، يستطيع الحركة باتجاه المحاور الثلاثة x,y,z عن طريق محرك كهربائي، يقاد عن طريق الحاسوب. والشكل (10) يوضح توضيع مسبار السلك الساخن داخل حقل الجريان، بحيث يكون محور المسبار موازيا" تماماً للمحور x وبهذا التوضيع يتمكن المسبار من قياس مركبتي السرعة u,w باتجاه المحورين x,z. كما يمكن قياس المركبة الثالثة للسرعة v باتجاه المحور y بتدوير المسبار 90^o حول محوره.



الشكل (10): توضيع مسبار الساك الساخن داخل حقل الجريان

3.3 مقياس السرعة الليزري-الدوبلري

لقياس حقل السرعة، خلف نموذج القياس استخدم مقياس السرعة الليزري-الـ دوبلري ثلاثي الأبعاد، أي يمكن بواسطة هذا المقياس تحديد المركبات الثلاث للسرعة u،v،w. ويتألف هذا المقياس من:

- مقياس ليزري- دوبلري ثنائي البعد قطر عدسته 60mm، لتحديد كل من مركبتـي السرعة u،v في المستوي x,y . يصدر هذا المقياس زوجين من الأشـعة الليزريـة: الزوج الأول مؤلف من أشعة خضراء اللون بطول موجة L_1=514.5 mm، والـ زوج الثاني مؤلف من أشعة زرقاء اللون بطول موجة L_2=488 mm وباستطاعة250 mW.
- مقياس ليزري- دوبلري أحادي البعد قطر عدسته 60mm لتحديد المركبـة الثالثـة للسرعة w في اتجاه المحور z. يصدر هذا المقياس زوجاً من الأشعة الخضراء اللون بطول موجة L_3=532 mm واستطاعة 50 mW. الـشكل (11) يوضـح مكونـات

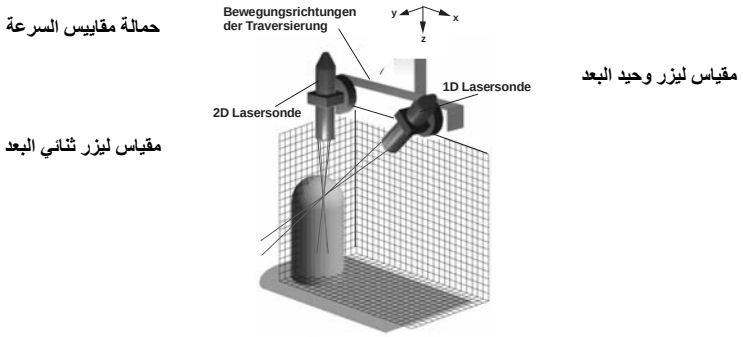
مقياس السرعة الليزري- الدوبلري وتوضعه في حقل الجريان، والشكل (12) يوضح مبدأ قياس سرعة الجريان على النحو الآتي:

من مولد أشعة ليزرية Laser Sender يصدر شعاع ليزري ينقسم بعد اصطدامه بمقسم الأشعة Divider إلى شعاعين 1 و 2 لهما السعة نفسها. بواسطة عدسة إرسال مجمعة يلتقي الشعاعان الليزريان في محرق العدسة الذي يمثل حيز القياس أو حجمه Measurement volume. وعندما يعبر جزيء سائلي حيز القياس يصدر ضوءاً منتشراً بسعة متغيرة، يتم تجميعه بواسطة عدسة مجمعة ويرسل منها إلى مستقبل وكاشف ضوئي Photodetector، يتولى عملية تحليل الضوء، وتحويل الإشارة الضوئية إلى إ شارة كهربائية تنقل إلى معالج ومحلل خاص Burst Signal Analyser (BSA)، الذي يظهر بالنتيجة سرعه الجزيء الذي عبر حيز القياس. وتحسب السرعة، حسب [3]، من العلاقة (11):

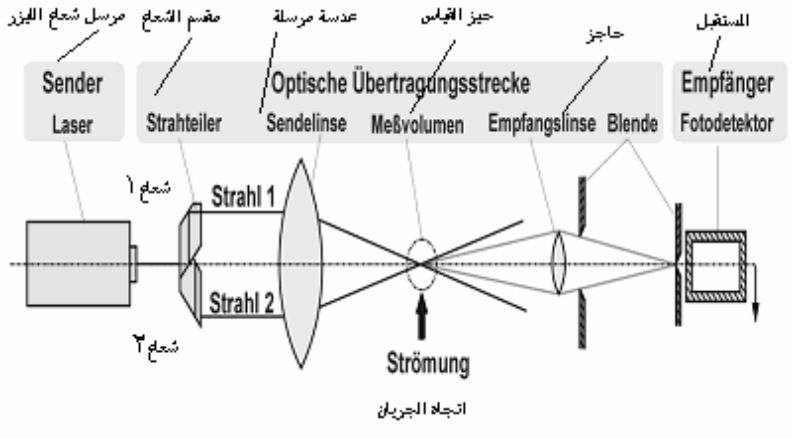
$$U_{\perp} = f_s.\Delta x = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot f_s \cdot \lambda_0 \cdot \frac{1}{\sin \varphi / 2} \qquad (11)$$

حيث: n ثابت يتعلق بنوع السائل وتبلغ قيمته في حالة الهواء n=1، Δx البعد بين الشرائح المتداخلة في حيز القياس، f_s التردد الدوبلري، λ_0 طول موجة شعاع الليزر، φ الزاوية بين شعاعي الليزر.

قبل البدء بعملية القياس يجب دهن نموذج القياس باللون الأسود، تفادياً للانعكاسات الشديدة لأشعة الليزر المرتدة من سطح النموذج.



الشكل (11): توضيع مقياس السرعة الليزري- الدوبلري



الشكل (12): مبدأ قياس السرعة باستخدام مقياس السرعة الليزري- الدوبلري ثنائي البعد [6]

4. تقويم ومقارنة نتائج القياس:

أجريت جميع القياسات عند عدد رينولدز $Re = 2.10^5$ الذي تقابله سرعة غير مشوشة للجريان مقدارها U_∞=27.5m/s.

1.4 مقارنة نتائج القياس لمركبة السرعة $\overline{w}$ باتجاه المحور z باستخدام مقياس السرعة الليزري- الدوبلري ومسبار الضغط خماسي الثقوب

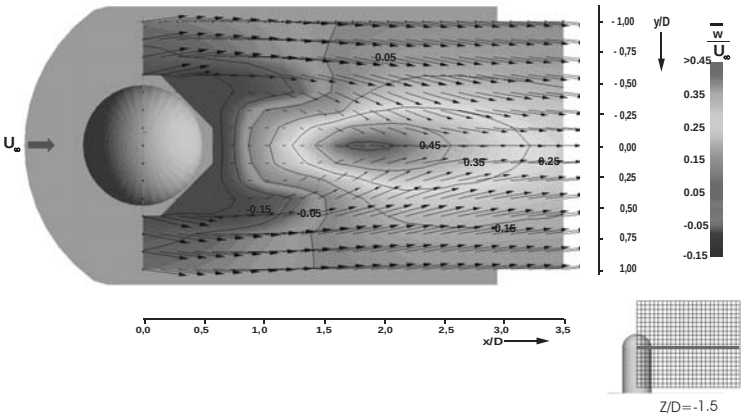
يعرض الشكلان (13و14) نتائج القياس بمقياس السرعة الليزري – الدوبلري لمركبات السرعة الوسطية $\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}$، حيث تمثل الأشعة مركبتي السرعة $\overline{u}, \overline{v}$ باتجاه x,y، واللون يمثل المركبة الثالثة للسرعة $\overline{w}$ باتجاه المحور z. وتعطى قيمة السرعة الوسطية، حسب [7]، بالعلاقة:

$$\overline{u_i} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_{in} \qquad i=1\ldots3 \quad (12)$$

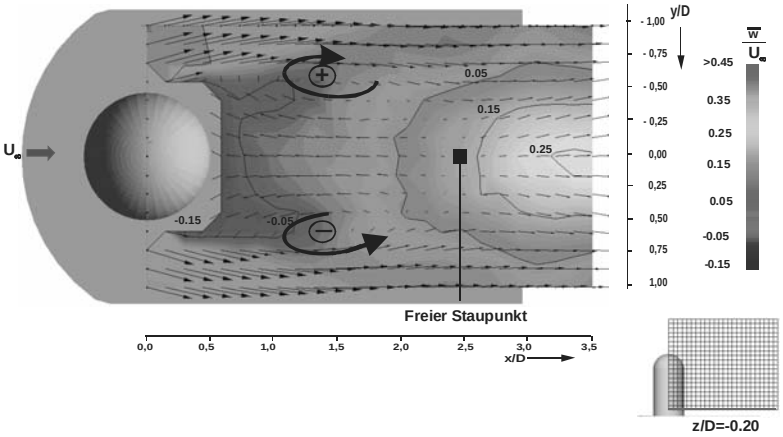
حيث N : عدد الجزيئات التي عبرت حيز القياس لكل نقطة قياس (2500 جزيء)

i : للدلالة على مركبات السرعة باتجاه محاور الإحداثيات x,y,z

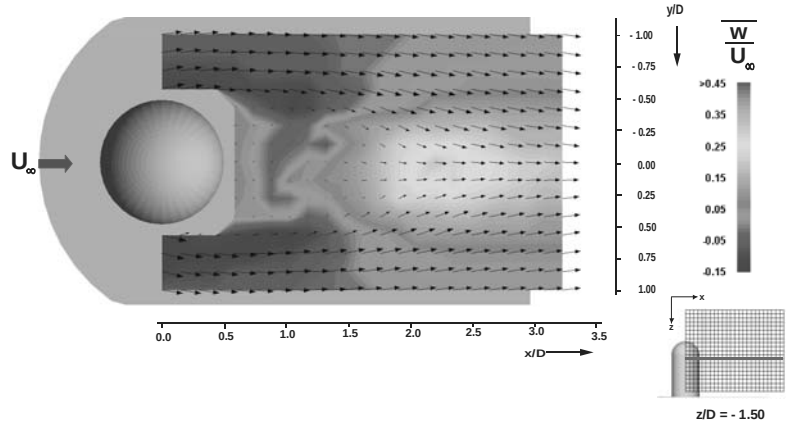
وللمقارنة يعرض الشكلان (15و16) النتائج المقابلة المقيسة بمسبار الضغط خماسي الثقوب.



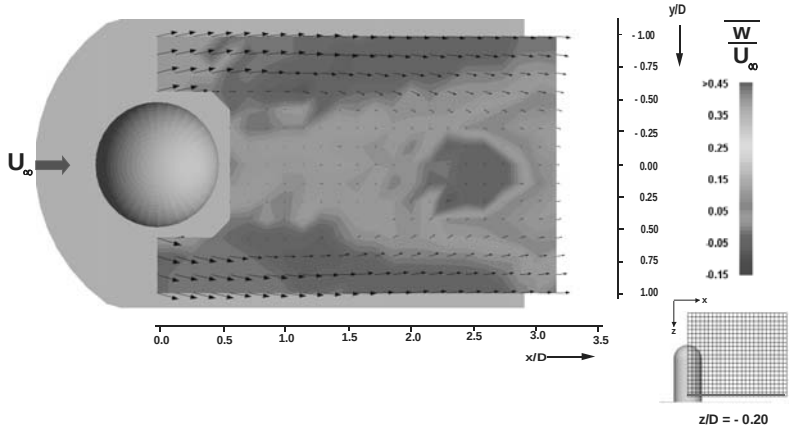
الشكل(13): مركبة السرعة $\overline{w}/U_\infty$ في المستوي xy وعند z/D=-1,5 باستخدام مقياس السرعة الليزري- الدوبلري



الشكل (14): مركبة السرعة $\overline{w}/U_\infty$ في المستوي xy وعند z/D=-0,20 باستخدام مقياس السرعة الليزري- الدوبلري



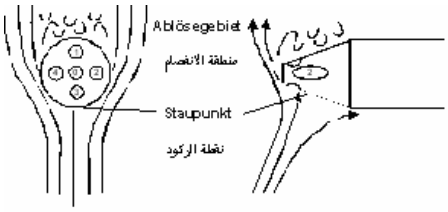
الشكل (15): مركبة السرعة $\overline{w}/U_\infty$ في المستوي xy وعند z/D=-1,5 باستخدام مسبار الضغط خماسي الثقوب



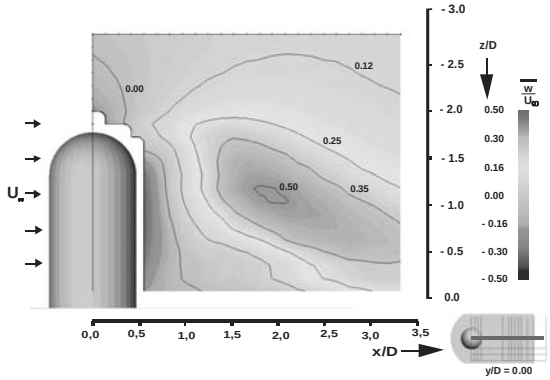
الشكل (16): مركبة السرعة $\overline{w}/U_\infty$ في المستوي xy وعند z/D=-0,20 باستخدام مسبار الضغط خماسي الثقوب

من مقارنة النتائج نجد أن نتائج القياس باستخدام مسبار الضغط خماسي الثقوب وخاصة في مناطق تشكل الأعاصير، ومنطقة الماء الميت خلف الاسطوانة، لم تكن مطابقة للنتائج المقيسة باستخدام مقياس السرعة الليزري-الدوبلري، والسبب الرئيسي لذلك أن مسبار الضغط خماسي الثقوب يعطي نتائج دقيقة في مجال زاوي للجريان لا يتجاوز $\alpha,\beta=\pm 30^0$، حيث α زاوية الورود و β زاوية الانحراف للمسبار. وكما هو واضح في الشكلين (13، 14) فإن منطقة الجريان العكسي تتشكل خلف الاسطوانة تماماً وفيها يتحرك الجريان عائداً إلى الاسطوانة. وفي هذه المنطقة لم يتمكن مسبار الضغط من التقاط قيم الضغط الصحيحة، ومن ثَم فإن نتائج القياس لم تكن دقيقة مقارنةً بالنتائج المقيسة بمقياس السرعة الليزري-الدوبلري. وتفسير ذلك أن الأعاصير المتشكلة في منطقة الجريان العكسي، ونتيجة السرعات التي تحرضها، تجعل رأس المسبار بالنسبة لاتجاه أشعة السرعة خارج المجال الزاوي المحدد له $\pm 30^0$، وينتج عند ذلك انفصام الطبقة الحدية على رأس المسبار وتشكل أعاصير تشوش عملية

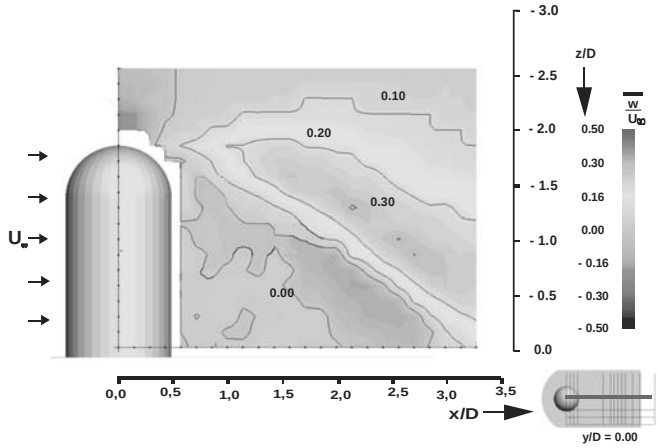
التقاط الضغط من ثقوب رأس المسبار، الشكل (17). من مقارنة الشكلين (18، 19) نجد أن القيمة الأعظمية لمركبة السرعة $\overline{w}$ في المستوي xz تبلغ $\overline{w}/U_\infty$=0.5 عند x/D = 2.0 و z/D = -1.1 بمقياس السرعة الليزري-الدوبلري، في حين تأخذ قيمة السرعة الاعظمية المقيسة بمسبار الضغط خماسي الثقوب قيمة $\overline{w}/U_\infty$=0.3 عند x/D = 2.2 و z/D = -1.3 أي خارج منطقة الجريان العكسي، انظر الشكل (19)، وهذا يعود إلى أن مسبار الضغط خماسي الثقوب لم يتمكن من التقاط قيم الضغط في هذه المنطقة. أما في المجال البعيد نسبياً عن منطقة الانفصام وتشكل الأعاصير، فإن مسبار الضغط خماسي الثقوب يعطي نتائج مرضية جداً مقارنةً بمقياس السرعة الليزري-الدوبلري.



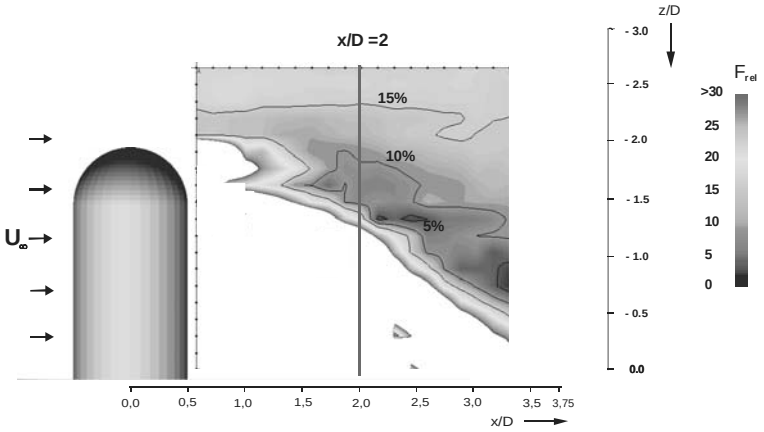
الشكل (17): انفصام الجريان على رأس المسبار في مجال زاوي يزيد على $\pm 30^0$



الشكل (18): مركبة السرعة $\overline{w}/U_\infty$ في المستوي y/D=0.0 مقيسة بمقياس السرعة الليزري – الدوبلري



الشكل (19): مركبة السرعة $\overline{w}/U_\infty$ في المستوي y/D=0.0 مقيسة بمقياس الضغط خماسي الثقوب



الشكل(20): الخطأ النسبي المرتكب لمسبار الضغط خماسي الثقوب وذلك عند x=2D مقارنة مع مقياس السرعة

الليزري –الدوبلري

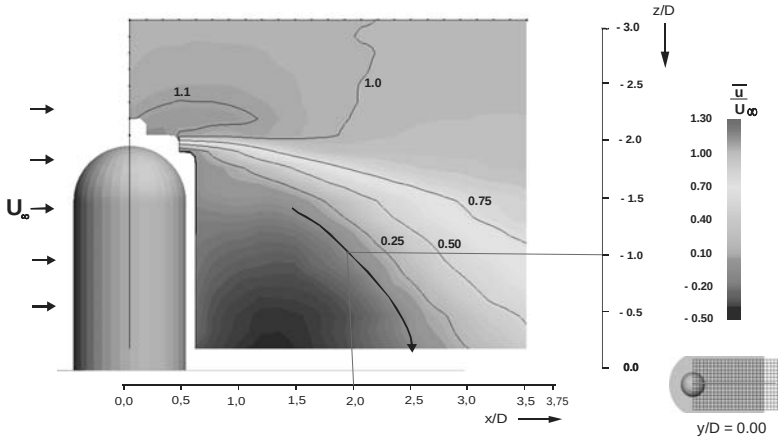
الشكل (20) يتضمن قيم الخطأ النسبي المرتكب باستخدام مسبار الضغط خماسي الثقوب مقارنة مع مقياس السرعة الليزري-الدوبلري، وذلك في المستوي x = 2D،

حيث نرى بوضوح أن نسبة الخطأ تزيد على 30% في منطقة الجريان العكسي، خلف الاسطوانة مباشرة، أما في المجال البعيد عن هذه المنطقة ، فإن قيمة الخطـأ النـسبي تقل لتصل إلى قرابة 5% فقط. وقد تم حساب الخطأ النسبي من العلاقة :

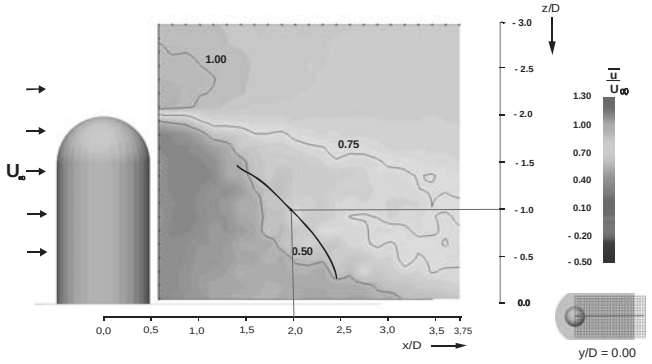
$$F_{rel} = \left|\overrightarrow{u_{5-Loch-Sonde}} - \overrightarrow{u_{LDA}}\right| / \left|\overrightarrow{u_{LDA}}\right| \times 100 \qquad (13)$$

2.4 مقارنة نتائج القياس لمركبة للسرعة $\bar{u}$ باتجاه المحور x باسـتخدام مقيـاس السرعة الليزري- الدوبلري ومسبار السلك الساخن.

الشكل (21) يتضمن نتائج القياس لمركبة السرعة $\bar{u}$ باتجاه المحور x وذلك باستخدام مقياس السرعة الليزري-الدوبلري، ويتضمن الشكل (22) نتائج قيـاس $\bar{u}$ باسـتخدام مسبار السلك الساخن.



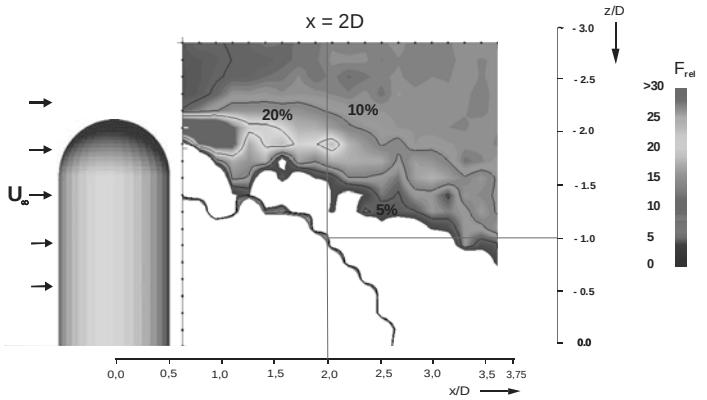
الشكل (21): مركبة السرعة $\bar{u}/U_\infty$ في المستوي y/D=0.00 باستخدام مقياس السرعة الليزري- الدوبلري



الشكل (22): مركبة السرعة $\bar{u}/U_\infty$ في المستوي y/D=0.00 باستخدام مقياس السلك الساخن

من تدقيق هذين الشكلين ومقارنة النتائج نجد أن مسبار السلك الساخن لم يتمكن من قياس مركبة السرعة $\bar{u}$ خلف الاسطوانة تماماً، أي في منطقة الجريان العكسي، وذلك لأن مثل هذه المسابير لاتتمكن من قياس مركبة السرعة السالبة (المعاكسة لاتجاه الجريان)، وهذه المركبة تسيطر في منطقة الجريان العكسي. أما في منطقة الجريان خلف نصف الكرة ومكان تشكل الجديلتين الإعصاريتين فإن نسبة الخطأ تزداد لتصل إلى 30% باستخدام مسبار السلك الساخن، وذلك لأن مسبار السلك الساخن في مثل هذه المناطق لا يستطيع التجاوب مع تغير السرعة وتذبذباتها المفاجئة، ومن ثم قياس قيمها بدقة كافية. الشكل (23) يتضمن الخطأ النسبي المرتكب لنتائج القياس بمسبار السلك الساخن مقارنةً مع مقياس السرعة الليزري-الدوبلري وذلك في المستوي xz وعند x=2D ، حيث نرى بوضوح أن نسبة الخطأ تزيد على 30% في منطقة الجريان العكسي، خلف الاسطوانة مباشرة ،عند $x \le 2.5$ و $z/D \ge -1.0$. أما في المجال البعيد عن هذه المنطقة، فإن قيمة الخطأ النسبي تتراوح بين 5% وحتى 10% فقط. وقد تم حساب الخطأ النسبي من العلاقة:

$$F_{rel} = \left|\overrightarrow{u_{CTA}} - \overrightarrow{u_{LDA}}\right| / \left|\overrightarrow{u_{LDA}}\right| \times 100 \qquad (14)$$



الشكل (23): الخطأ النسبي المرتكب لمقياس السلك الساخن في المستوي xz وذلك عند x=2D مقارنةً مع مقياس السرعة الليزري –الدوبلري

5. الخاتمة والاستنتاجات

تناول البحث عرض وتحليل وتقويم ومقارنة نتائج قياس حقل السرعة لجريان ذي طابع إعصاري خلف نموذج اسطوانة ذات رأس نصف كروي. وذلك باستخدام ثلاث تقنيات وطرائق قياس هي:

مسبار الضغط خماسي الثقوب، مقياس السلك الساخن ثنائي البعد، ومقياس السرعة الليزري- الدوبلري ثلاثي البعد، والتي تختلف عن بعضها بعضاً من حيث مبدأ القياس ومستوى التقنية، وكذلك من حيث الدقة والوثوقية. كل طريقة قياس من هذه الطرائق سبق استخدامها في العديد من البحوث العلمية التجريبية، ولكننا لم نعثر في المراجع العلمية المتوافرة لنا على أي بحث استخدمت فيه الطرائق الثلاث المذكورة، لإجراء قياسات لحقل الجريان نفسه، بما يتيح المقارنة بين النتائج، وتحديد مجال القياس لكل طريقة منها، ومن ثَم تحقيق أحد أهداف هذا البحث.

توصل البحث إلى نتائج عديدة، نجمل أهمها بالنتائج الرئيسية الآتية:

• أثبتت نتائج القياس إمكانية استخدام طرائق القياس الثلاث، للتعرف إلى البنية الأساسية لحقل الجريان وطبيعته المعقدة. ولكن دقة قيم السرعة المقيسة متفاوتة، وتتراوح بين جيدة ومقبولة وغير مقبولة بالنسبة لكل من مسبار الضغط خماسي الثقوب ومقياس السلك الساخن، وخاصة في منطقة انفصام الجريان وتشكل الأعاصير المولدة لجريانات عكسية. وبالمقابل يتيح مقياس السرعة الليزري- الدوبلري إمكانية القياس في كامل حقل الجريان ذي الطبيعة الإعصارية المعقدة، وقيم السرعة المقيسة به هي الأكثر دقة ووثوقية، ومن ثَم اعتمدت في هذا البحث أساساً للمقارنة مع نتائج القياس الأخرى.

• نتائج القياس باستخدام مسبار السلك الساخن هي نتائج مرضية وتصل الدقة فيها إلى 95% (أي الخطأ النسبي 5% فقط) في بعض المناطق من حقل الجريان، وخاصةً في المناطق البعيدة عن الجريان العكسي، مثلاً عند z/D =-1.3 و x/D =2.5 . أما في منطقة الجريان العكسي خلف الأسطوانة مباشرةً فقد بلغ الخطأ النسبي قيمة أكبر من 30%، لأن مسبار السلك الساخن في مناطق الجريان الإعصارية لا يمكنه التقاط قيم السرعة السالبة (المعاكسة لاتجاه الجريان).

• نتائج القياس باستخدام مسبار الضغط خماسي الثقوب هي أيضاً نتائج مرضية وقريبة من نتائج القياس لحقل السرعة باستخدام مسبار السلك الساخن، حيث وصلت دقة القياس باستخدام هذا المسبار إلى95% في بعض مناطق حقل الجريان، وخاصةً المناطق التي لم تتجاوز فيها زاوية الانحراف وزاوية الورود لاتجاهات مركبات السرعة 30^0 درجة، ولكن في حال تم تجاوز هذه الزاوية فإن الطبقة الحدية على رأس المسبار ستتعرض لعملية انفصام وتشكل أعاصير، ونتيجة ذلك لا يتمكن المسبار من قياس قيم السرعة.

6. المراجع العلمية References

[1]Ruck, B.; Laser- Doppler- Anemometrie, Eine berührungslose optische Strömungs-geschwindigkeitsmesstechnik. AT- Fachverlag, Stuttgart, 1987

[2] Eckelmann, H.; Einführung in die Strömungsmesstechnik. Teubner Verlag, Stuttgart, 1997

[3]Leder, A.; Windkanalmessungen mit LDA- Systemen. In: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Hrsg : B. Ruck, AT-Fachverlag, Stuttgart ,1990

[4] Nitsche, W.; Strömungsmesstechnik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1994

[5]Leder, A.; Abgelöste Strömungen- Physikalische Grundlagen. Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, Vieweg Verlag, Braunschweig,1992

[6]Oschatz, L.; Laser- Doppler Messungen im dreidimensionalen Ablösegebiet eines endlich langen Kreiszylinders, Projektarbeit; Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Rostock, 2001

[7]Richter, F. und Leder, A.: Reynoldszahleffekte bei der dreidimensionalen Umströmung eines Zylinderstumpfes unter dem Einfluss der Zentrifugal-beschleunigung, In: "Lasermethoden. in der Strömungsmesstechnik",9. Fachtagung der GALA e. V., Shaker Verlag, Aachen, 2001

[8] Laschka, B.; Vorlesungsmanuskript: Strömungsmechanik I, II, Technisch Universität München, 1992

[9] Ackl, A. : ميكانيك السوائل التكتيكي الجزء الأول والثاني، منشورات جامعة دمشق ، 1986

[10] Hucho, W.A.: Aerodynamik des Autombils , VOGEL – Verlag, Duesseldorf 1994.

[11] Goldstein R.J (Editor): Fluid Mechanics Measurements. Springer Verlag, Berlin, New York, 1983

[12] Kashkoul, Y.: تصميم وتصنيع ومعايرة مسبار ضغط خماسي الثقوب واختباره في قناة هوائية لقياس حقل السرعة والضغط في جريان خلف نموذج مركبة. رسـالة

ماجستير 1999، جامعة دمشق كلية هـ.م.ك بإشراف مشترك من أ.د.م. إنط ـ انيوس عقل، جامعة دمشق، وأ.د.م. بوريس لاشكا، جامعة ميونيخ التقنية.

[13] Strickert, H.: Hitzdraht- und Hitzfilmanemometrie , VEB Verlag Technik, Berlin, 1974
[14] Hot-wire Anemometry ,Catalog "Dantec Dynamics A/S, 2002
[15] Schlichting, H; Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie, 9. Auflage Springer Verlag, Berlin / Heidlberg,1997
[16] Kashkoul, Y.; Grebin, U.; Ackl, A.; Hassel, E.; Leder, A. : Dreidimensinale Strömungsstruktur im Ablösegebiet einer Zylinderstumpf-Halbkugelkonfiguration, in: Leder, A.; Brede, M.; Ruck, B.; Dopheide, D. (Hrsg.) Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik,10.Fachtagung der GALA e.V. 2002, Universitätsdruckerei Rostock, S. 27.1-27.6
[17] Leder, A.; Grebin, U.; Hassel, E.; Kashkoul, Y.; Ackl, A.: 3D-Flow structures behind a circular cylinder with hemispherical head geometry, Proc. Appl. Math. Mech. (PAMM),3,pp.40-43, 2003
[18] Breitsamter,Ch.: Erweiterung und Verfeinerung eines Programmes zur Messung mit einer Fuenf-Loch-Sonde in Wirbeldominierten Stroemungsfelden, Bericht Tu Muenchen, 1990

7. جدول الرموز و المصطلحات والاختصارات

A	مقياس أمبير	α	زاوية الهجوم
B	عرض صفيحة التثبيت	β	زاوية الانحراف
D	قطر الاسطوانة	Δp	فرق الضغط
F_{rel}	الخطأ النسبي	Δx	البعد بين شريحتين داخل حيز القياس
f_s	تردد الإشارة	φ	الزاوية بين شعاعي الليزر
I_e	شدة التيار الكهربائي	λ_0	طول موجة شعاع الليزر
K_α	معامل زاوية الهجوم	ρ	الكثافة
K_β	معامل زاوية الانحراف	BSA	محلل إشارة الموجة
K_{ps}	معامل الضغط الاستاتيكي	CCA	طريقة الجهد الثابت لمسبار السلك الساخن
K_{pt}	معامل الضغط الكلي	CTA	طريقة درجة الحرارة الثابتة لمسبار السلك الساخن
L	ارتفاع النموذج	FEM	طريقة العناصر المنتهية
L_E	طول صفيحة التثبيت	FVM	طريقة الحجوم المنتهية
M	جسر قياس	LDA	مقياس السرعة الليزري- الدوبلري
$p_{0\to4}$	الضغوط الملتقطة بالمسبار		
P_0	الضغط على رأس المسبار		
P_t	الضغط الكلي		
P_s	الضغط الاستاتيكي		
R	مقاومة متغيرة		
Re	عدد رينولدز		
R_H	مقاومة المسبار بعد التسخين		
R_o	مقاومة المسبار قبل التسخين		
$U_\perp$	السرعة التي تعبر حيز القياس		
U_∞	السرعة غير المشوشة		
u,v,w	مركبات السرعة		
$\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}$	مركبات السرعة الوسطية		
V	شعاع السرعة الموضعية		
x, y, z	محاور الإحداثيات		

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2006/8/31.