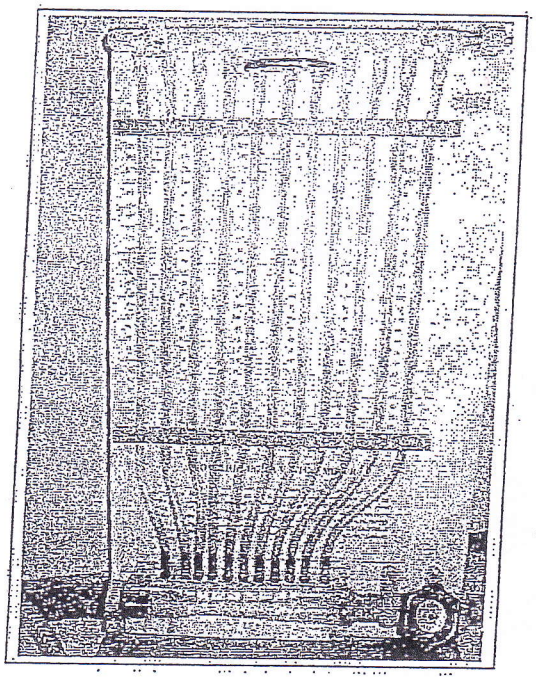
تجربة رقم
(4)

التدفق عبر مقياس فنشوري

Flow through Venturi Meter



تجربة رقم (4)

التدفق عبْر مقياس فنشوري

Flow through Venturi Meter

✓ مقدمة

يُعد موضوع قياس معدل تصريف السوائل المارّة في الأنابيب والمجاري عموماً من المسائل المهمة في الأغراض الصناعية والتطبيقات الحقلية الزراعية. توجد عدة طرق لقياس تصريف السوائل تختلف وتتنوع حسب التطبيق الميداني لها، ومن أبسطها الطريقة المباشرة.. والتي تتمثل بتجميع حجم معين من السائل الخارج من الأنبوب في زمن معين. لكن هذه الطريقة لا تصلح للاستخدام عندما يُراد قياس معدل التصريف في نقطة أو مكان معين داخل الأنبوب أثناء الجريان. لذا فإن هناك طرق وأجهزة خاصة لهذا الغرض. ومن أكثرها شيوعاً العدّادات التي تستخدم في معظم شبكات الري ومحطات تعبئة الوقود وغيرها.

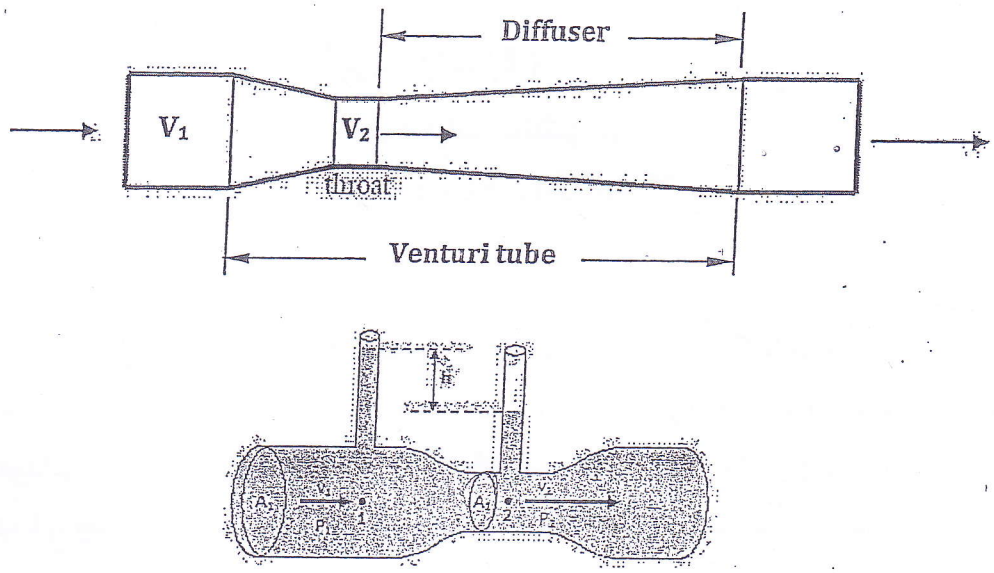
هناك جهاز آخر يُدعى جهاز الأشعة فوق الصوتية، والذي يُعد من الأجهزة الحديثة والدقيقة لقياس التصريف داخل الأنابيب، حيث يوضع فوق الأنبوب الذي يجري بداخله السائل، ويقوم بتحسس الجريان بواسطة الأشعة فوق الصوتية، ثم يحول الإشارات إلى أرقام تمثل معدل الجريان يتم قراءتها على شاشة رقمية.

أما في مجال المعامل والمختبرات فهناك عدة أجهزة لقياس التدفق في الأنابيب، من أكثرها شيوعاً مقياس فنشوري (Venturi Meter) الذي سيتم التطرق إليه في هذه التجربة.
ولكل من هذه المقاييس المعملية معاملات للتصريف، حيث أنها تقيس التصريف النظري، ولحساب التصريف الفعلي الحقيقي لابد من ضرب التصريف النظري في معامل المقياس الخاص به.

✓ مقياس فنشوري (Venturi Meter)

مقياس فنشوري [شكل رقم 1] عبارة عن جهاز استُعمل لسنوات طويلة لقياس معدل تدفق المائع خلال أي منظومة من الأنابيب. يتألف الجهاز من أنبوب بقطر معين يحدث فيه تخصّر تدريجي ينتهي إلى أنبوب ضيّق يُدعى العنق (Throat) ثم يتوسع الأنبوب تدريجياً ليعود لنفس قطر الدخول، ويسمى هذا الجزء الناشر (Diffuser).

تعتمد فكرة المقياس في حساب معدل جريان المائع على قياس هبوط الضغط الحاصل خلال الأنبوب. حيث أن سرعة الجريان ستزداد في المنطقة الضيقة من الأنبوب، يُرافقها هبوط في الضغط، ويعتمد كل منهما على معدل تدفق المائع. ومن خلال قياس مقدار الهبوط في الضغط بين منطقة الدخول ومنطقة التخصر في الأنبوب يمكن حساب معدل جريان المائع. والشكل أدناه يوضح أنبوب فنشوري.



شكل (1) أنبوب فنشوري

✓ الغرض من التجربة

يتمثل الغرض من التجربة فيما يأتي:

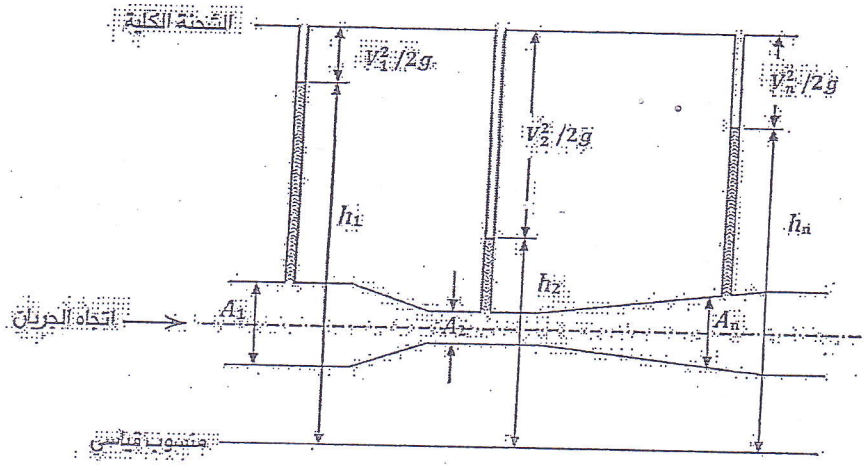
1. قياس معدل التدفق الحجمي والكتلي للماء.
2. حساب الخسارة في الطاقة اثناء مرور المائع في أنبوب فنشوري.
3. استخراج معامل التصريف للأنبوب (Coefficient of Discharge, C_d).
4. دراسة توزيع الضغط خلال المقاطع المختلفة للأنبوب.

✓ نظرية التجربة

سيتم فرض وجود سائل لا انضغاطي (الماء) يجري خلال أنبوب متصل به مقياس فنشوري كما موضح في الشكل رقم (2) أدناه. مع فرض عدم وجود خسارة في الطاقة أثناء مرور الماء خلال الأنبوب، وثبوت عمود ضغط الماء الساكن (الستاتيكي) (h) وسرعة الجريان خلال المقطع المعين.

سيتم تطبيق معادلة برنولي (Bernoulli Equation) على المقاطع الآتية في الجريان:

الرقم (1) : يشير إلى مقطع الدخول في منطقة الجريان قبل أنبوب فنشوري.
الرقم (2) يشير إلى مقطع في منطقة التخصر (العنق) في أنبوب فنشوري.
الرمز (n) يشير إلى أي مقطع في أنبوب فنشوري بعد منطقة التخصر.



شكل (2)

وبذلك نحصل على:

$$\frac{P_1}{\rho g}+\frac{V_1^2}{2g}+Z_1=\frac{P_2}{\rho g}+\frac{V_2^2}{2g}+Z_2=\frac{P_n}{\rho g}+\frac{V_n^2}{2g}+Z_n \qquad (1)$$

حيث أن:

P = ضغط الماء المار في المقاطع $(1, 2, n)$.

V = سرعة الماء في المقاطع $(1, 2, n)$.

z = ارتفاع الماء عن مستوى الإسناد في المقاطع $(1, 2, n)$.

g = التعجيل الأرضي = $(9.81\ m/s^2)$

وبالتعبير عن ارتفاع عمود الضغط الستاتيكي بالعلاقة $(h = P/\rho g)$ للمقاطع في معادلة برنولي، ونتيجة تساوي قيم (z) في جميع المقاطع لكون الأنبوب أفقياً مستقيماً، ستُختزل معادلة برنولي إلى الشكل الآتي:

$$h_1+\frac{V_1^2}{2g}=h_2+\frac{V_2^2}{2g}=h_n+\frac{V_n^2}{2g} \qquad (2)$$

وحسب معادلة الاستمرارية (Continuity Equation) يمكن حساب التصريف النظري (Q_{th}):

$$Q_{th}=A_1V_1=A_2V_2=A_nV_n \qquad (3)$$

حيث تمثل (A) مساحة مقطع الأنبوب في المواقع $(1, 2, n)$.

ولغرض تبسيط الحسابات سيتم الاقتصار على مقطعين من الأنبوب فقط: (1) و (2).

من العلاقة (3) نجد أن:

$$V_1=V_2\frac{A_2}{A_1}$$

وبتعويضها في العلاقة (2) نحصل على:

$$h_1 + \frac{V_2^2}{2g}\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \qquad (4)$$

وبالتبسيط نحصل على سرعة الماء في العنق:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g\,(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \qquad (5)$$

بالتعويض في المعادلة (3) نحصل على معادلة لحساب التدفق النظري للماء (Q_{th}):

$$Q_{th} = A_2 \sqrt{\frac{2g\,(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \qquad (6)$$

أما معدل التدفق (التصريف) الحقيقي (Q_{act}) فيتم حسابه من العلاقة:

$$Q_{act} = \frac{Vol.}{t} = \frac{m}{\rho\, t} \qquad (7)$$

حيث أن:

$Vol.$ = حجم الماء (m^3)

t = الزمن (sec)

m = كتلة الماء (kg)

ρ = كثافة الماء = (1000 kg/m³)

يُلاحظ عملياً أن قيمة التصريف الفعلي (الحقيقي) المقاسة والتي تُحسب من المعادلة (7) تكون دائماً أقل من قيمة التصريف النظري التي تُحسب من المعادلة (6)، ويعود ذلك إلى الفقدان والخسارة في الطاقة المحملة للسائل بين المقطعين (1) و (2) نتيجة تأثير قوى الاحتكاك والدوامات، إضافة إلى الإختناق الحاصل في منطقة العنق. كما أن سرعة الجريان ليست ثابتة بين المقاطع. ولغرض التصحيح والتغلب على هذا الفرق يتم إدخال معامل التصريف في المعادلة (6) والذي يساوي:

$$C_d = \frac{Q_{act}}{Q_{th}} \qquad (8)$$

وعليه فإن المعادلة (7) ستصبح:

$$Q_{th} = C_d\, A_2 \sqrt{\frac{2g\,(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \qquad (9)$$

إن قيمة (C_d) تختلف قليلاً من مقياس إلى آخر، وحتى بالنسبة للمقياس الواحد. وتتراوح قيمتها لأنبوب فنشوري بين (0.92 – 0.99).

يمكن إيجاد توزيع الضغط خلال المقاطع المختلفة لأنبوب فنشوري من العلاقة:

$$h_1 - h_n = \frac{V_n^2 - V_1^2}{2g} \qquad (10)$$

حيث يمثل (h_n) ارتفاع عمود الضغط في أي أنبوب مانوميتر يتم اختياره من الأنابيب العشرة المتبقية.

- **حساب خسائر الجريان (Flow Losses):**

1. الخسارة في عمود الضغط (h_L) :

$$h_L = h_1 - h_{11} \qquad (11)$$

حيث يمثل (h_{11}) ارتفاع عمود الضغط في أنبوب المانوميتر الأخير في التسلسل.

2. الخسارة في التصريف (Q_L) :

$$Q_L = Q_{th} - Q_{act} \qquad (12)$$

3. الخسارة في الطاقة ($P.E_L$) :

$$P.E_L = \rho g\, Q_L\, h_L \qquad (13)$$

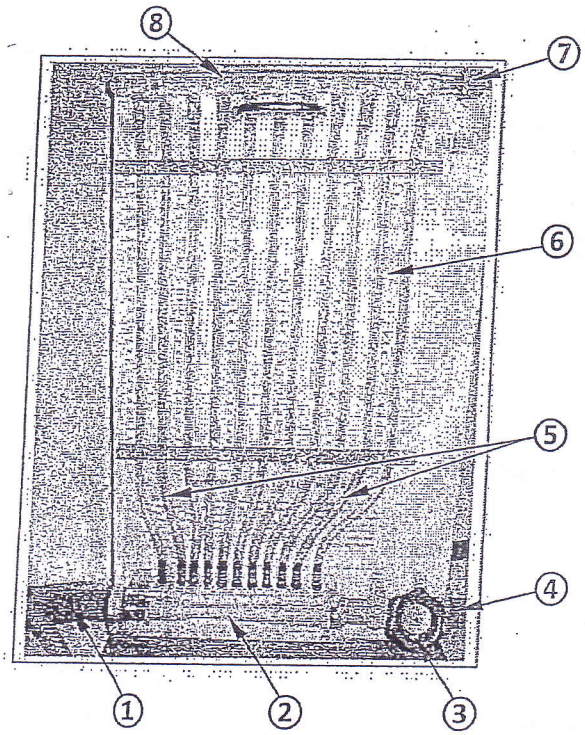
✓ وصف جهاز التجربة

يتألف جهاز التجربة الموضح أدناه من أنبوب شفاف متغير مقطع المساحة مصنوع من البلاستك يُدعى أنبوب فنشوري (Venturi Tube). يتصل سطحه العلوي خلال ثقوب صغيرة مع أحد عشر أنبوباً بلاستيكياً شفافاً تمثل مانومترات بيزومترية موزعة على طول أنبوب فنشوري، يُقاس بواسطتها ارتفاع عمود ضغط السائل (الماء) خلال مسطرة مدرّجة لهذا الغرض. تتصل المانومترات من الأعلى مع أنبوبة شفافة تُدعى غرفة التهوية، تستخدم للتحكم في ارتفاع عمود الماء في المانومترات نتيجة ضغط الهواء المحصور فيها، وذلك عن طريق صمام لتفريغ الهواء يوجد في أحد جوانبها. يتم ضخّ الماء إلى أنبوب فنشوري عبر صمام التجهيز، كما يتم التحكم في معدل الجريان من خلال صمّام التحكم الموجود عند نهاية الأنبوب.

يتم وضع وضبط استقامة أنبوب فنشوري مع ملحقاته بواسطة مساند مسنّة على منظومة لتجهيز الماء تُدعى الطاولة الهيدروليكية (Hydraulic Bench).

ويتألف جهاز مقياس فنشوري الموضح في الشكل رقم (3) من الأجزاء الآتية:

1. أنبوب مرتبط بصمام تجهيز السائل.
2. أنبوب فنشوري.
3. صمام التحكم في معدل الجريان.
4. أنبوب خروج السائل.
5. أنابيب قياس ضغط السائل.
6. شريط قياس ارتفاع عمود السائل.
7. صمام التهوية.
8. غرفة الهواء المضغوط.

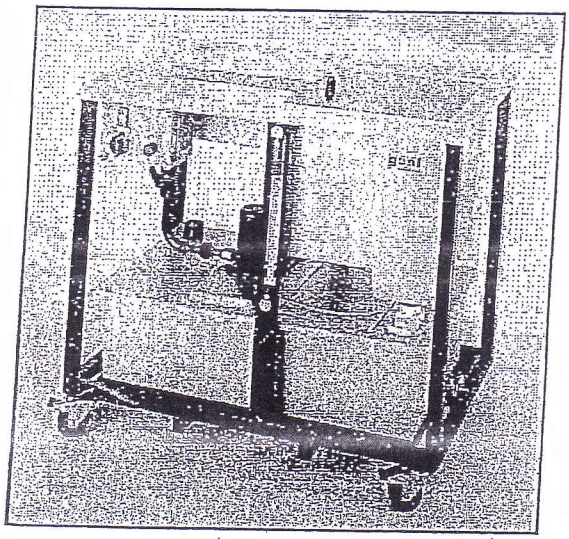


شكل (3) مقياس فنشوري مع ملحقاته

- **الطاولة الهيدروليكية (Hydraulic Bench)**

هي عبارة عن منظومة متكاملة لتجهيز وضخ السائل وحساب معدل جريانه.

تتألف المنظومة من حوض في الأسفل يتم ملؤه بالسائل المراد الاختبار به. وفي داخل الحوض توجد مضخة غاطسة تقوم بضخ السائل عبر أنبوب متصل بصمام للتحكم في معدل التجهيز. تُستخدم الطاولة الهيدروليكية بصورة خاصة لحساب معدل التصريف الحقيقي للسائل.. عن طريق تجميع السائل الخارج من أنبوب التجهيز في حوض يحوي على تدريج لقياس الحجم. وبحساب الزمن اللازم لتجميع حجم معين من السائل يمكن قياس معدل التصريف. يحوي حوض التجميع على صمام يمكن من خلاله تصريف وإعادة السائل إلى الحوض السفلي.



الطاولة الهيدروليكية (Hydraulic Bench)

يمكن استخدام الطاولة الهيدروليكية في أي تطبيق أو تجربة لها علاقة بتصريف وتدفق السائل، كما هو الحال في التجربة الحالية لمقياس فنشوري. وذلك بربط المقياس بأنبوب التجهيز من المضخة، وأنبوب خروج السائل إلى حوض الطاولة. كما سيتم من خلالها قياس معدل التصريف الحقيقي لغرض حساب معامل التصريف لمقياس فنشوري.

✓ الخطوات العملية

1. يتم تشغيل مضخة الطاولة الهيدروليكية، ويفتح صمّام التجهيز وكذلك صمّام السيطرة (التحكم) ليمر الماء خلال الأنبوب لعدة ثوانٍ لغرض طرد وإزالة فقاعات الهواء، ثم يغلق صمّام التحكم تدريجياً فيرتفع الماء في المانومترات البيزومترية وينضغط الهواء في أنبوبة التهوية. وعند وصول الماء إلى مستوى مناسب يُغلق صمام التجهيز تدريجياً كذلك، مما يؤدي إلى بقاء الهواء داخل الفراغ مضغوطاً. وبعد أن يتم غلق صمامي السيطرة والتجهيز بصورة نهائية فإن المقياس يكون مملوءاً بماءٍ متوازن تحت ضغط معتدل. عندها يتم ضبط الجهاز بواسطة القوالب المثبتة في القاعدة ليُوضع بصورة أفقية. ويكون مستوى الماء في جميع المقاييس واحداً. وبهذا يكون الجهاز معداً لإجراء التجارب.
2. يُفتح كل من صمّامي التجهيز والتحكم مجدداً بصورة تدريجية للحصول على أكبر قيمة للفرق في ارتفاعات عمود الماء $(h_1 - h_2)$ بين منطقة الدخول ومنطقة العنق، أي أن يكون ارتفاع عمود الضغط في المقطع الأول (h_1) في حدود (250 mm) تقريباً.
3. تتم السيطرة على صمّام التحكم لتغيير ارتفاع عمود الماء في العنق (h_2) بحيث يكون ارتفاعه أقل ما يمكن، وفي حالة وجود صعوبة في تثبيت الارتفاعين يُطرد قسم من الهواء من الصمام.
4. يسجل ارتفاع عمود ضغط الماء في المانومترات البيزومترية (التي ستحدد في التجربة)، ويحسب الزمن المستغرق لجمع حجم معين من الماء.
5. يقلّل التدفق قليلاً بغلق صمام التحكم، وتسجل قيم الارتفاعات: (h_1) ، (h_2) و (h_{11}) فقط، ويسجل الزمن لجمع نفس الحجم من الماء .وتكرر هذه الخطوة للحصول على عدة قراءات.

- ملاحظة: يسجل توزيع الضغط خلال الأنبوبة للقراءة الأولى فقط.

✓ الحسابات والنتائج

- المعلومات الخاصة بأنبوب فنشوري:
  - قطر الأنبوب عند المدخل: $(d = 26\ mm)$ ، مساحة مقطع المدخل: $(A = 531\ mm^2)$
  - قطر الأنبوب عند العنق: $(d = 16\ mm)$ ، مساحة مقطع العنق: $(A = 201\ mm^2)$

والجدول التالي يعرض قيم قطر أنبوب فنشوري في مناطق اتصاله بأنابيب المانومترات الأحد عشر:

	رقم المقطع	القطر (mm)
Entrance Region	1	26.00
	2	23.20
	3	18.40
Throat Region	4	16.00
	5	16.80
	6	18.47
	7	20.16
	8	21.84
	9	23.53
	10	25.24
Exit Region	11	26.00

جدول القراءات

h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_{11} (mm)	Vol. (Lit.)	Time (sec)

- ارتفاع عمود الضغط للقراءة الأولى (mm)

h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}

جدول النتائج

Q_{act} (m^3/sec)	Q_{th} (m^3/sec)	C_d	h_L (m)	Q_L (m^3/s)	$P.E_L$ (J)	$(h_1-h_2)^{1/2}$ (m)

✓ مناقشة النتائج

1. ما الفائدة من استخدام مقياس فنشوري؟ أعط مثالاً على ذلك.
2. ارسم العلاقة بين $\sqrt{h_1-h_2}$ و Q_{act} ، وناقش هذه العلاقة.
3. ارسم العلاقة بين C_d المستخرجة من الحسابات مع Q_{act} ، واشرح كيفية تغير C_d من الرسم.
4. ارسم العلاقة بين الخسارة في عمود الضغط و Q_{act} ، وناقشها.
5. ارسم توزيع الضغط خلال أنبوب فنشوري للقراءة الأولى فقط، وقارن مع النتائج النظرية.

✓ الخطوات العملية

1. يتم تشغيل مضخة الطاولة الهيدروليكية، ويفتح صمّام التجهيز وكذلك صمّام السيطرة (التحكم) ليمر الماء خلال الأنبوب لعدة ثوانٍ لغرض طرد وإزالة فقاعات الهواء، ثم يغلق صمّام التحكم تدريجياً فيرتفع الماء في المانومترات البيزومترية وينضغط الهواء في أنبوبة التهوية. وعند وصول الماء إلى مستوى مناسب يُغلق صمام التجهيز تدريجياً كذلك، مما يؤدي إلى بقاء الهواء داخل الفراغ مضغوطاً. وبعد أن يتم غلق صمامي السيطرة والتجهيز بصورة نهائية فإن المقياس يكون مملوءاً بماءٍ متوازن تحت ضغط معتدل. عندها يتم ضبط الجهاز بواسطة القوالب المثبتة في القاعدة ليُوضع بصورة أفقية. ويكون مستوى الماء في جميع المقاييس واحداً. وبهذا يكون الجهاز معداً لإجراء التجارب.
2. يُفتح كل من صمّامي التجهيز والتحكم مجدداً بصورة تدريجية للحصول على أكبر قيمة للفرق في ارتفاعات عمود الماء $(h_1 - h_2)$ بين منطقة الدخول ومنطقة العنق، أي أن يكون ارتفاع عمود الضغط في المقطع الأول (h_1) في حدود (250 mm) تقريباً.
3. تتم السيطرة على صمّام التحكم لتغيير ارتفاع عمود الماء في العنق (h_2) بحيث يكون ارتفاعه أقل ما يمكن، وفي حالة وجود صعوبة في تثبيت الارتفاعين يُطرد قسم من الهواء من الصمام.
4. يسجل ارتفاع عمود ضغط الماء في المانومترات البيزومترية (التي ستحدد في التجربة)، ويحسب الزمن المستغرق لجمع حجم معين من الماء.
5. يقلّل التدفق قليلاً بغلق صمام التحكم، وتسجل قيم الارتفاعات: (h_1) ، (h_2) و (h_{11}) فقط، ويسجل الزمن لجمع نفس الحجم من الماء .وتكرر هذه الخطوة للحصول على عدة قراءات.

- ملاحظة: يسجل توزيع الضغط خلال الأنبوبة للقراءة الأولى فقط.

✓ الحسابات والنتائج

- المعلومات الخاصة بأنبوب فنشوري:
  - قطر الأنبوب عند المدخل: $(d = 26\ mm)$ ، مساحة مقطع المدخل: $(A = 531\ mm^2)$
  - قطر الأنبوب عند العنق: $(d = 16\ mm)$ ، مساحة مقطع العنق: $(A = 201\ mm^2)$