"تشكل الدوامات السطحية في حجرات الإمتصاص للمضخات بأنابيب امتصاص شاقولية"

الدكتور المهندس أمجد زينو[1]

الملخص

إنَّ تشكل الدوامات السطحية في مآخذ محطات الضخ (حجرات الامتصاص) يسمح بدخول الهواء إلى المضخة، وهذا يسبب خفض غزارة المضخة وضاغطها ومن ثَمَّ مردودها.

هذا البحث يحتوي على دراسة تجريبية أجريت على نماذج بأبعاد مختلفة من حجرات الامتصاص في مخبر الهيدروليك– كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق، يهدف إلى دراسة العوامل المؤثرة (الأبعاد–عمق الغمر– الغزارة) في تشكل الدوامات السطحية وشدتها في حجرات الامتصاص المزودة بأنابيب امتصاص شاقولية. وقد وجد أن شدة الدوامة السطحية ξ تتعلق بعدد فراود في الحجرة $Fr_H = \frac{Q}{b \cdot H \cdot \sqrt{g \cdot H}}$ وببعد الجدار الخلفي لها l/D وارتفاع فتحة قمع الامتصاص عن الأرضية z/D.

[1] قسم الهندسة المائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

1. مقدمة

تعدُّ الدوامات السطحية من الظواهر الهيدروليكية الملفتة للانتباه والمصادفة في العديد من المنشآت المائية. فيمكن أن تتشكل على سطح بحيرات السدود بالقرب من مآخذ المفرغات السفلية، كما تصادف بكثرة على سطح الماء في مآخذ محطات الضخ (حجرات الامتصاص). إن تشكل الدومات السطحية في حجرات امتصاص المضخات من الأشياء غير المسموحة لأنها تؤثر بشكل سلبي في عمل المضخة، وتؤدي إلى تخفيض مردودها بشكل كبير. عند دخول الهواء إلى المضخة في أثناء عملها تنخفض غزارتها بشكل متناسب مع كمية الهواء، وأثبتت الدراسات أنه عندما تكون كمية الهواء الداخلة إلى المضخة بحدود 6% فيمكن أن يهبط المنحني المميز $(H-Q)$ وينخفض ضاغطها بحدود $\%(15-10)$، كما يمكن للمضخة أن تتوقف بالكامل عن العمل عندما تكون كمية الهواء الداخلة إليها بحدود 15% [14]. عدا ذلك عند دخول الهواء إلى المضخة يمكن له أن يتجمع في الأجزاء المحدبة من خطوط الضخ على شكل مخدات هوائية تؤدي إلى قطع الجريان إن لم يتم تنفيس الهواء بشكل مستمر.

أنجزت عدة بحوث لدراسة ظاهرة تشكل الدوامات السطحية وتحديد العوامل المؤثرة فيها [1,2,3,4,5,6]، وكان هناك اتفاق في الآراء أحياناً واختلاف أحياناً أخرى. إن معظم البحوث التي تمت عن ظاهرة الدوامات السطحية كانت تركز على دراسة هذة الظاهرة من الناحية الفيزيائية وذلك من أجل إيجاد قوانين النمذجة الفيزيائية الخاصة بها. وبشكل عام ما زالت الدراسات التجريبية والنظرية عن تشكل الدوامات السطحية في حجرات امتصاص المضخات قليلة، وبحاجة إلى العديد من البحوث.

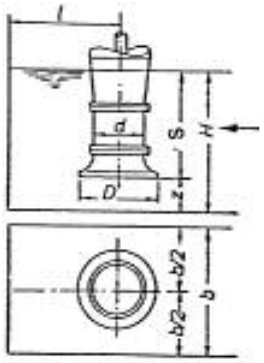
2. هدف البحث

يعدُّ هذا البحث متابعة لبحث سابق أنجز في كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق [15] عن دراسة الظواهر الهيدروليكية للجريانات في حجرات الامتصاص للمضخات. ويتركز البحث هذه المرة في دراسة تشكل نماذج الدوامات السطحية في حجرات

الامتصاص للمضخات ذات أنابيب الامتصاص الشاقولية (الشكل 1) بشكل مفصل مع الأخذ بالحسبان تغير غزارة المضخة. أما هدف البحث فهو:

أولاً: دراسة العوامل المؤثرة في ظاهرة تشكل الدوامات السطحية في حجرات الامتصاص، وهي:

1–عرض الحجرة b. 2– ارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن أرضية الحجرة z. 3– بعد الجدار الخلفي عن محور أنبوب الامتصاص l. 4– عمق الغمر في حجرة الامتصاص s. 5– غزارة المضخة.



الشكل (1). حجرة امتصاص نموذجية

ثانياً: ايجاد أبعاد الحجرة التي تضمن عدم تشكل هذه الدوامات.

3. التحليل البعدي ونمذجة ظاهرة الدومات السطحية

لصعوبة ظاهرة تشكل الدوامات السطحية، قد يكون من الصعب جداً نمذجتها رياضياً بالاعتماد على حل معادلات نافييه–ستوكس–رينولدز للجريان المضطرب. رغم أنه جرت مؤخراً بعض البحوث [7,8] لنمذجة الجريان في حجرات الامتصاص رياضياً بالاعتماد على معادلات الجريانات المثالية (معادلات أولر)، إلا أن هذه البحوث ما زالت في البدايات. الحل الأدق في مثل هذه الحالات لدراسة وإظهار مدى تأثير كل من العناصر المؤثرة في هذه الظاهرة هو إجراء التجارب. ولكن إنجاز التجارب على حجرات امتصاص بمقياس حقيقي إن لم يكن أمراً مستحيلاً فهو في منتهى الصعوبة ومكلف جداً، والحل الأفضل المستخدم الذي يعطي نتائج دقيقة إلى حد كبير هو إجراء التجارب على نماذج فيزيائية بمقياس مصغر [9]. إن عملية النمذجة الفيزيائية تتطلب تصنيع نماذج حجرات متشابه مع الأصل، وبتوافر بعض الإمكانات الفنية في المخابر

يمكّننا من إجراء التجارب ومن تغيير العناصر بسهولة وبشكل اقتصادي. كما أن تصنيع النماذج من مواد شفافة يمكننا من رؤية الجريان بالعين المجردة ومن تصويره، مع التنويه هنا إلى أن اختبار تأثير أبعاد الحجرة أوعمق الماء فيها على تشكل الدوامات السطحية لا يمكن إلا من خلال المشاهدة.

لتحقيق التشابه بين الأصل والنموذج يجب أن تتحقق الشروط الآتية: 1- التشابه الهندسي، 2- التشابه الحركي، 3- التشابهة التحريكي. عندما يتحقق التشابه التحريكي، ينتج عنه تحقق التشابه الحركي، لذلك لا بد من دراسة القوى المؤثرة في ظاهرة الدوامات السطحية في حجرات الامتصاص بشكل تفصيلي ودقيق.

تؤثر مجموعة من القوى في تشكل ظاهرة الدوامات السطحية في الحجرة، ولتحديد هذه القوى ننطلق من المعادلات التفاضلية الأساسية للجريانات " معادلات نافييه – ستوكس " في الحالة المستقرة. تكتب هذه المعادلات بالشكل الشعاعي كما يأتي:

$$\left(\vec{V}\cdot\nabla\right).\vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\cdot grad(p) + \nu\cdot\nabla^2\vec{V}$$

بضرب حدود المعادلة السابقة بالكتلة m ، نحصل على:

$$m\cdot\left(\vec{V}\cdot\nabla\right).\vec{V} = m\cdot\vec{F} - m\cdot\frac{1}{\rho}\cdot grad(p) + m\cdot\nu\cdot\nabla^2\vec{V}$$

يتضح من المعادلة السابقة أن الجريان يتعرض للقوى الآتية:

- قوى العطالة: $\overrightarrow{F_I} = m\cdot\left(\vec{V}\cdot\nabla\right).\vec{V}$
- قوى الثقالة: $\overrightarrow{F_g} = m\cdot\vec{F}$
- قوى الضغط: $\overrightarrow{F_p} = m\cdot\frac{1}{\rho}\cdot grad(p)$
- قوى اللزوجة: $\vec{F}_\nu = m\cdot\nu\cdot\nabla^2\vec{V}$

إضافة إلى القوى السابقة توجد قوى التوتر السطحي التي توثر في السطح الفاصل بين الماء والهواء:

$$\overrightarrow{F_t} = \sigma \cdot L$$

يمكن القول تؤثر في تشكل الدوامات السطحية في حجرات الامتصاص المقادير الفيزيائية الآتية:

$$u, g, \rho, \mu, \sigma, D, d, s, b, z, l$$

أي توجد العلاقة الآتية:

$$F(u, g, \rho, \mu, \sigma, D, d, s, b, z, l, \xi) = 0$$

حيث ξ: معيار يعبر عن شدة الدوامة المتشكلة. عدد المقادير الفيزيائية $n = 12$، وعدد الواحدات الأساسية التي تدخل في هذه المقادير $m = 3$. وحسب نظرية باكنغهام يمكن التعبير عن العلاقة السابقة بالشكل اللابعدي الآتي:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) = 0$$

حيث: $(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$ هي مقادير لابعدية. ولايجاد هذه المقادير نستخدم نظرية التحليل البعدي، فيكون لدينا ما يأتي:

$$\pi_1 = \frac{u}{\sqrt{g \cdot d}} = \mathrm{F}r$$

$$\pi_2 = \frac{u \cdot \rho \cdot d}{\mu} = \mathrm{Re}$$

$$\pi_3 = \frac{\rho \cdot u^2 \cdot d}{\sigma} = We$$

$$\pi_4 = \frac{d}{D}, \pi_5 = \frac{s}{D}, \pi_6 = \frac{z}{D}, \pi_7 = \frac{l}{D}, \pi_8 = \frac{d}{D}, \pi_9 = \xi$$

أي أن شدة الدوامة تتبع المتغيرات الآتية وفق العلاقة:

$$\xi = f\left(\frac{d}{D}, \frac{b}{D}, \frac{z}{D}, \frac{l}{D}, \frac{s}{D}, Fr, \mathrm{Re}, We\right)$$

في البحث لن يتم تغيير قمع الإمتصاص، وقد استخدم قمع ذو شكل يعتمد على معـــدل منتظم لهبوط الضغط [13] فيه $\frac{D}{d} = 1.5$، وهذا القمع استخدم في جميع التجـــارب.

من ثَمَّ شدة الدوامة ستكون في العلاقة السابقة مستقلة عن النسبة $\frac{D}{d}$.

أما بالنسبة لتأثير قوى اللزوجة في تشكل الدوامات السطحية ونمذجتها، أجريت عدة دراسات من قبل بعض الباحثين. الباحثان Daggett, Keulegan [3]، من خلال تجاربهم بينا أنه يمكن إهمال قوى اللزوجة في نمذجة هذه الظاهرة عندما يتحقق الشرط Intake Reynolds Number $\mathrm{Re}_d = \frac{u \cdot d}{\nu} \geq 3 \times 10^4$. ذكر الباحث Prosser [12] أنه يمكن إهمال قوى اللزوجة عندما $\mathrm{Re}_d \geq 2 \times 10^4$. أما الباحث Anwar [1] فقد بين أن تأثير اللزوجة يكون مهملاً عندما يكون Submergence Reynolds Number $\mathrm{Re}_s = \frac{Q}{\nu \cdot s} \geq 3 \times 10^4$. قام الباحثان Padmanabhan and Hecker [11] بدراسة مفصلة عن نمذجة الدوامات السطحية، حيث بينا أن قوى اللزوجة تكون مهملة عندما يتحقق الشرطان: $\mathrm{Re}_d \geq 7.7 \times 10^4, \mathrm{Re}_s \geq 1.5 \cdot 10^4$.

تم دراسة تأثير قوى الشد السطحي في ظاهرة الدوامات السطحية في العديد من البحوث. بيَّنَ الباحث Jain [5] أن قوى الشد السطحي تكون مهملة عندما $We_d = \frac{\rho \cdot u_d^2 \cdot d}{\sigma} \geq 120$. ويقترح كل من الباحثين Padmanabhan, Hecker شرط إهمال قوى اللزوجة $We_d \geq 600$. لم يلاحظ الباحث Odgaard [10] تأثيراً للشد السطحي عندما $We_d \geq 720$.

تم تغيير غزارة الجريان في أثناء التجارب (من ثَمَّ سرعة الجريان في أنبوب الامتصاص) وعمق الغمر. فإذا علمنا أن:

- غزارة وسرعة الجريان الدنيا: $Q_{\min} = 30 m^3/h \Rightarrow u_{d_{\min}} = 0.73 m/s$.
- غزارة وسرعة الجريان العظمى: $Q_{\max} = 130 m^3/h \Rightarrow u_{d_{\max}} = 3.18 m/s$.
- قطر أنبوب الامتصاص $d = 120mm$.
- عمق الغمر في الحجرة تراوح بين $s = (1-2)\cdot D = (0.18-0.36)m$.

وعليه يكون لدينا في النموذج:

$$We_{d_{\min}} = \frac{\rho \cdot u_{\min}^2 \cdot d}{\sigma} = \frac{1000 \cdot 0.73^2 \cdot 0.12}{0.072} = 888$$

$$\mathrm{Re}_{d_{\min}} = \frac{u_{\min} \cdot d}{\nu} = \frac{0.73 \cdot 0.12}{1.15 \times 10^{-6}} = 7.6 \times 10^4$$

$$\mathrm{Re}_{s_{\min}} = \frac{Q}{\nu \cdot s_{\max}} = \frac{30/3600}{1.15 \times 10^{-6} \cdot 0.36} = 2 \times 10^4$$

أي تم تحقيق شروط إهمال قوى اللزوجة والشد السطحي في تشكل الدوامات السطحية. ومن ثَمَّ أصبح تشكل الدوامة السطحية وشدتها تتعلق بـــ:

$$\xi = f\left(\frac{b}{D}, \frac{z}{D}, \frac{l}{D}, \frac{s}{D}, Fr\right)$$

4. منصة التجارب وطريقتها:

لا يمكن دراسة ظاهرة تشكل الدوامات السطحية كما ذكرنا سابقاً بشكل دقيق إلا بالمراقبة المباشرة بالعين المجردة. وقد استخدمت في التجارب المنصة المبينة في الشكل (2). حيث تسمح الجدارن الشفافة للحجرات المختبرة في مراقبة تشكل الدوامة بسهولة و من ثَمَّ تحديد نموذجها.

تم تغيير أبعاد الحجرة وعمق الغمر فيها وفق القيم الآتية:

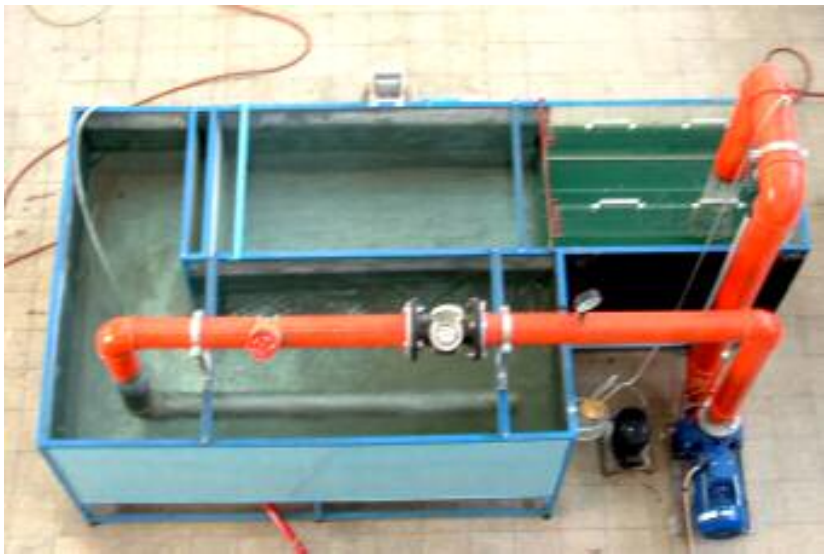
$$\frac{b}{D} = (1.50 - 2.00 - 2.50 - 3.00)$$

$$\frac{l}{D} = (0.50 - 0.75 - 1.00 - 1.25)$$

$$\frac{z}{D} = (0.25 - 0.50 - 0.75 - 1.00)$$

$$\frac{s}{D} = (1.00 - 1.25 - 1.50 - 1.75 - 2.00)$$

أي أن عدد الحجرات المختبرة بالأبعاد المختلفة كانت: $N = 4 \times 4 \times 4 \times 5 = 320$.



الشكل (2). صورة من الأعلى لمنصة التجارب المستخدمة في البحث– مخبر الهيدروليك – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق

لدراسة تأثير عدد فراود في تشكل الدوامات السطحية، تم اختبار نصف الحجرات تقريباً والتي بلغ عددها 155 من أجل سرع جريان متغيرة كما يأتي:

$$u_d = (0.74 - 0.98 - 1.23 - 1.47 - 1.72 - 1.96 - 2.21 - 2.45 - 2.70 - 2.94 - 3.19) m/s$$

توافق الغزارات الآتية:

$$Q = (30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 - 90 - 100 - 110 - 120 - 130) m^3/h$$

وهذه الحجرات هي:

– من أجل كل قيمة لـــ $\frac{z}{D}$ وفق المجال:

$\frac{z}{D}=1.00,\frac{z}{D}=0.75,\frac{z}{D}=0.50,\frac{z}{D}=0.25$، تم تغيير البعد الخلفي وعرض الحجرة كما يأتي:

$$\frac{l}{D}=1.00,\frac{b}{D}=1.50-2.00-2.50-3.00$$

$$\frac{b}{D}=2.00,\frac{l}{D}=0.50-0.75-1.00-1.25$$

– من أجل قيمة واحدة لـــ $\frac{z}{D}=0.25$ وعند $\frac{l}{D}=1.25$ تم تغيير عرض الحجرة كالسابق.

تم اختيار كل حجرة من الحجرات السابقة من أجل أعماق الغمر وسرع الجريان المذكورة سابقاً. أي أن عدد التجارب للحجرات التي تم تغيير سرعة الجريان فيها كان: $155\times 11=1705$.

ولاختبار تأثير أبعاد الحجرة في تشكل ظاهرة الدوامات السطحية و من ثَمَّ اختيار الحجرة الأفضل تم اختبار باقي الحجرات والبالغ عددها 165 من أجل سرعة جريان واحدة. وقد اختيرت سرعة الجريان كما يأتي: يبلغ قطر أنبوب الامتصاص في النموذج المختبر $d=120mm$، بفرض أن مقياس النموذج المختبر $\frac{1}{10}$ وأن سرعة الجريان في أنبوب الامتصاص في النموذج الأصلي هو $(4-6)m/s$ (وهذه هي القيم المنطقية العملية حسب الشركات المنتجة للمضخات المحورية والمختلطة). هذا يعني أن سرعة الجريان في أنبوب الامتصاص في النموذج حسب قانون فراود هي:

$$u_d=\frac{(4-6)}{\sqrt{10}}=(1.26-1.90)m/s$$

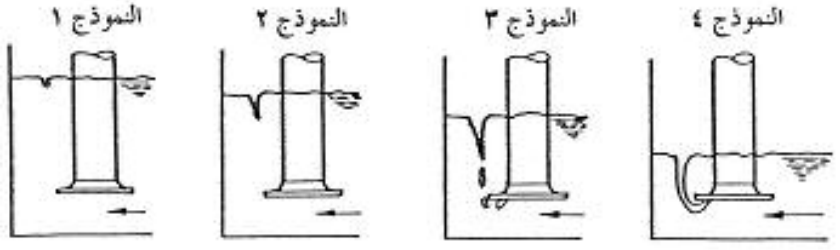
وقد تم اختيار غزارة جريان في النموذج: $Q = 70m^3/s$، تحقق سرعة جريان في أنبوب الامتصاص $u_d = 1.71m/s$. وفي المحصلة كان عدد التجارب: $1870 = 165 + 1705$.

إن ظاهرة تشكل الدوامات عملية عشوائية ولكن لها صفة أقرب إلى الدورية، بمعنى تتشكل الدوامة ثم تختفي ثم تتشكل من جديد. لمراقبة تشكل الدوامة وضمان دقة الاختبار وسلامته كانت تستمر التجربة أي رصد الدوامة ومراقبتها لمدة عشر دقائق متواصلة على الأكثر، وخلال هذه الفترة كان يرصد نموذج الدوامة المتشكل.

5. التجارب

5-1. نماذج الدوامات المتشكلة

من خلال التجارب التي أجريت على الحجرات المختبرة تم تصنيف الدوامات السطحية المتشكلة من قبل الباحث إلى أربعة نماذج، كما هو مبين في الشكل (3):



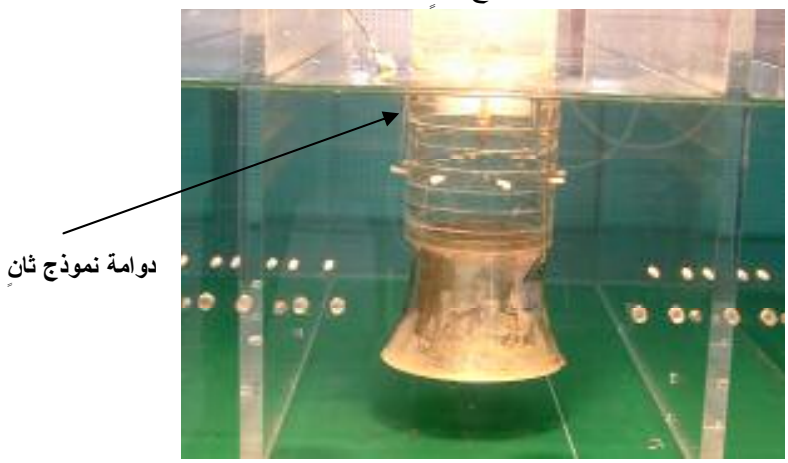
الشكل (3). مخطط توضيحي يمثل نماذج الدوامات السطحية المتشكلة في حجرات الامتصاص المختبرة

<u>النموذج 1</u>

على سطح الماء تتشكل حركة دوامية مع ظهور غماز صغير في مركز الدوامة بعمق لا يتجاوز $5mm$. هذه النموذج من الدوامات لا يؤثر في عمل المضخة لأنه لا يقوم بسحب الهواء وإدخاله إليها.

النموذج 2

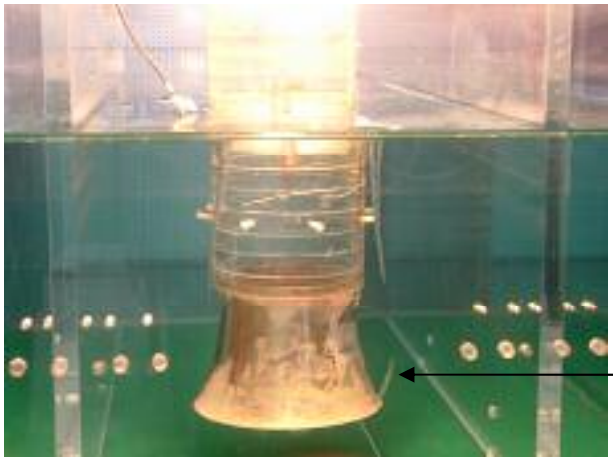
تتشكل حركة دوامية على سطح الماء أشد من النموذج الأول، بحيث يتشكل للدوامة ذنب قصير أو متوسط شاقولي ضيق يمتد من سطح الماء إلى داخل كتلة الماء في الحجرة لمسافة قد تصل حتى عدة سنتمترات دون حصول أي انفصال للفقاعات الهوائية. أيضاً من حيث المبدأ هذا النموذج من الدوامات لا يؤثر في عمل المضخة كونه لا يسحب كمية من الهواء، ولكنه يعطي انطباعاً عن العمل غير السليم للحجرة. يبين الشكل (4) صورة أخذت في أثناء التجارب لإحدى الحجرات المختبرة حيث يشاهد فيها تشكل دوامة سطحية نموذج ثانٍ.



الشكل (4). صورة أخذت في أثناء التجارب لإحدى الحجرات– تتشكل فيها دوامة نموذج ثانٍ.

النموذج 3

يصبح ذنب الدوامة أعمق وأعرض، وتبدأ فقاعات الهواء بالانفصال من أسفل الذنب ويتم امتصاصها إلى داخل المضخة. في هذا النموذج يدخل الهواء إلى المضخة، لذلك لا يسمح له بالتشكل لأنه سيؤثر سلباً في عمل المضخة. يبين الشكل (5) صورة لإحدى الحجرات المختبرة، حيث يظهر تشكل دوامة نموذج ثالث مع ظهور واضح لحصول انفصال هوائي من أسفل ذنب الدوامة ودخوله إلى أنبوب الامتصاص.



الشكل (5). صورة لإحدى الحجرات– تتشكل فيها دوامة نموذج ثالث – يلاحظ انفصال الهواء.

النموذج 4

تصبح الدوامة أشدُّ وأقوى، ويحصل انفتاح كامل لها بحيث يتشكل خيط هوائي مفتوح ممتد من سطح الماء في الحجرة إلى داخل قمع الامتصاص، يقوم بسحب الهواء إلى داخل المضخة. يرافق هذا النموذج صوت ضجيج ناتج عن شفط الهواء. هذا النموذج غير مسموح أن يتشكل أبداً لأنه يؤثر بشكل سلبي جداً في عمل المضخة، وخلال التجارب كان يلاحظ بشكل واضح في أثناء تشكل النموذج الرابع تغير في صوت المضخة وحصول انخفاض في ضاغطها من خلال هبوط مؤشر مقياس الضغط الموجود على أنبوب الدفع. يبين الشكل (6) صورة أخذت لدوامة نموذج رابع حيث يلاحظ بشكل واضح الانفتاح الكامل للدوامة بين سطح الماء وفتحة أنبوب الامتصاص، كما يبين الشكل (7) صورة يلاحظ تشكل دوامتين نموذج رابع بآن واحد في الحجرة.

الشكل (6). صورة لإحدى الحجرات المختبرة – تتشكل فيها دوامة واحدة نموذج رابع.

الشكل (7). صورة لإحدى الحجرات المختبرة – تتشكل فيها دوامتان بآن واحد نموذج رابع.

5-2. معيار شدة الدوامة السطحية

لا توجد طريقة مستخدمة لتقييم شدة الدوامة المتشكلة إلا من خلال المشاهدة والمراقبة. فالدوامة التي صنفت في البحث على أنها نموذج أول تكون ضعيفة جداً لدرجة أنها لا تسبب إلا دوراناً قليلاً مع غماز صغير كما ذكرنا، أما تشكل النموذج الرابع فيدل على دوامة قوية شديدة تحدث انفتاحاً كاملاً وتسحب الهواء إلى داخل المضخة.

في هذا البحث سيتم التعبير عن شدة الدوامة بحسب نموذجها المتشكل، وللتعامل مع معيار يعبر عن شدةها وقوتها نقترح طريقة بسيطة ومعبرة وهي إعطاء الرقم 4

للدوامة ذات النموذج الرابع ورقم 3 للثالث ورقم 2 للثاني ورقم 1 للأول والرقم 0 عندما لا تتشكل دوامة نهائياً. وعند حساب معيار شدة الدوامات السطحية ξ المتشكلة في حجرة معينة بنماذج مختلفة (من أجل أعماق غمر أو غزارات مختلفة) عندها يتم توسيط الأرقام المعبرة عن نماذج الدوامات. عندما يكون هذا المتوسط أكبر فهذا يعطي مؤشراً أن الدوامات أقوى وأشد والعكس صحيح.

6. التجارب وتحليل النتائج

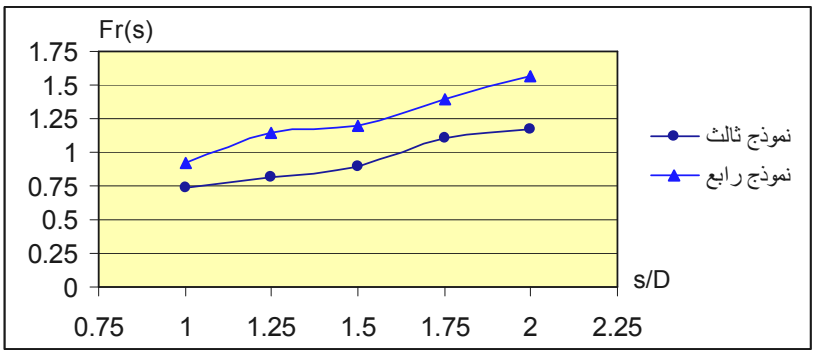
للحصول على نتائج عامة يمكن الاستفادة منها أنجزت تجارب كثيرة جداً في البحث، حيث تم تغيير الأبعاد الأساسية للحجرة وعمق الغمر وغزارة المضخة. التجربة الأولى تمت على حجرة لها الأبعاد الآتية:

$z/D = 0.25, l/D = 1.00, b/D = 2.50$، وقد تم تغيير عمق الغمر وفق القيم: $s/D = 1.00 - 1.25 - 1.50 - 1.75 - 2.00$، ومن أجل كل عمق غمر تم تغيير سرعة الجريان في أنبوب الامتصاص كما يأتي:

$u_d = (0.73 - 0.98 - 1.22 - 1.47 - 1.71 - 1.96 - 2.21 - 2.45 - 2.70 - 2.94 - 3.19) m/s$

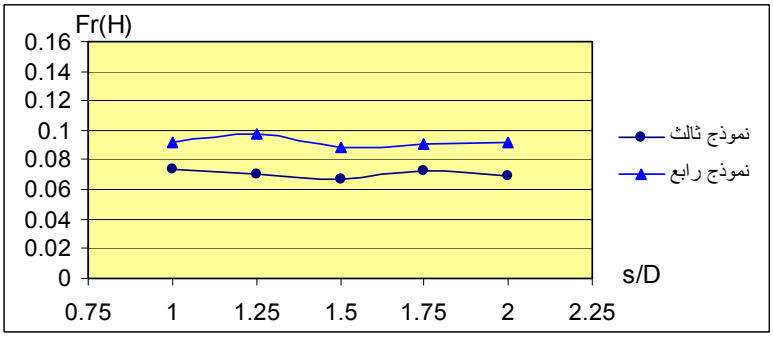
وكانت الغاية من التجربة دراسة تأثير عمق الغمر وغزارة الجريان وعدد فراود في تشكل الدوامات السطحية وشدتها. من أجل كل حالة اختبار كان يتم رصد نموذج الدوامة المتشكلة وتسجيله، ولقد نظمت النتائج في جداول. يظهر الجدول (1) النتائج بالنسبة للحجرة $z/D = 0.25, l/D = 1.00$، ومن ضمن هذه النتائج تظهر نتائج الحجرة ذات العرض $b/D = 2.50$. وقد تم حساب عدد فراود منسوباً لعمق الغمر $Fr_s = \frac{u_d}{\sqrt{g \cdot s}}$ لكل حالة مختبرة، وأظهرت النتائج أنه لا يوجد ارتباط بين نموذج الدوامة المتشكلة وعدد فراود منسوباً لعمق الغمر Fr_s كما هو مبين في الجدول (1) والشكل (8)، حيث عند عمق الغمر $s = 2 \cdot D$ تشكل النموذج الرابع عند $Fr_s = 1.56$ وعند عمق الغمر $s = D$ تشكل النموذج الرابع عند $Fr_s = 0.92$.

هذه النتيجة لا تتفق مع نتائج عدة باحثين[1,11]، حيث ذكر هؤلاء أن ظاهرة الدوامات السطحية تتعلق بـــ Fr_s، وأن نمذجتها يجب أن تتم وفق قانون فراود بالنسبة لعمق الغمر Fr_s. ولكن من خلال تحليل النتائج لوحظ وجود علاقة وثيقة بين نماذج الدوامات المتشكلة وقيمة عدد فراود في الحجرة $Fr_H = \frac{u_H}{\sqrt{g \cdot H}}$، حيث إنَّ: $u_H = \frac{Q}{b \cdot H}, H = s + z$.



الشكل (8). العلاقة بين Fr_s عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و عمق الغمر s/D في الحجرة ذات الأبعاد $z/D = 0.25, l/D = 1.00, b/D = 2.50$.

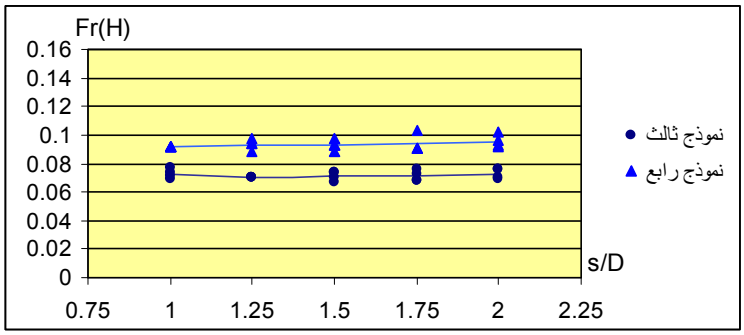
يبين الشكل (9) العلاقة التي تربط بين عمق الغمر وعدد فراود Fr_H عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع للدوامات في الحجرة $z/D = 0.25, l/D = 1.00, b/D = 2.50$، حيث يلاحظ بوضوح أن عدد فراود في الحجرة Fr_H عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع لا يتغير بشكل ملحوظ مع تغير عمق الغمر، وأن كل نموذج للدوامات المتشكلة يتعلق بعدد فراود في الحجرة Fr_H بغض النظر عن عمق الغمر فيها.



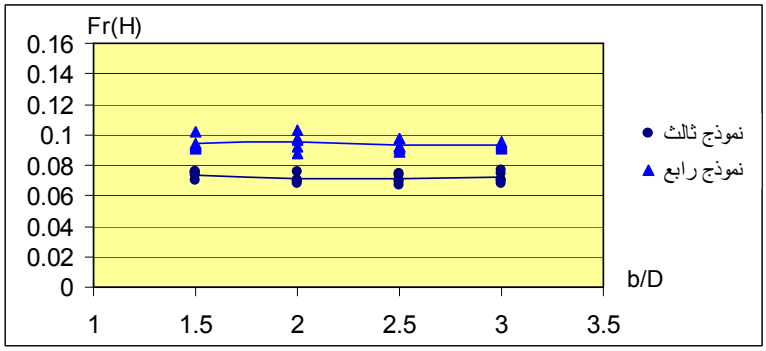
الشكل (9). العلاقة بين Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و عمق الغمر s/D في الحجرة ذات الأبعاد $z/D=0.25, l/D=1.00, b/D=2.50$.

لتأكيد النتيجة السابقة تم تغيير عرض الحجرة وأجريت تجارب لرصد نماذج الدوامات المتشكلة للحجرات ذات العروض $b/D=1.50-2.00-3.00$ على التسلسل، وتمّت المحافظة على قيم بعد الجدار الخلفي نفسها وارتفاع القمع عن أرضية الحجرة: $z/D=0.25, l/D=1.00$ ، وعند كل عرض تم تغيير عمق الغمر والغزارة كما سبق. فتأكد صحة النتيجة السابقة، حيث كان يتشكل كل نموذج من الدوامات عند القيمة نفسها تقريباً لـــ Fr_H بغض النظر عن عمق الغمر. كما بينت التجارب أيضاً نتيجة مهمة هي أنه عند جميع العروض كان نموذج الدوامة يتشكل عند القيمة نفسها تقريباً لعدد فراود Fr_H (الجدول 1). يبين الشكل (10) العلاقة التي تربط بين عمق الغمر s/D وعدد فراود Fr_H عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع للحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ وفق عروض مختلفة:

$b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$. كما يبين الشكل (11) العلاقة التي تربط بين عرض الحجرة وعدد فراود Fr_H عند بداية تشكل من كل النموذجين الثالث والرابع عند $z/D=0.25, l/D=1.00$ ، حيث يلاحظ أن عدد فراود Fr_H لا يتغير تقريباً مع تغير عرض الحجرة .



الشكل(10). العلاقة بين Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و s/D . في الحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ من أجل عدة عروض $b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$.

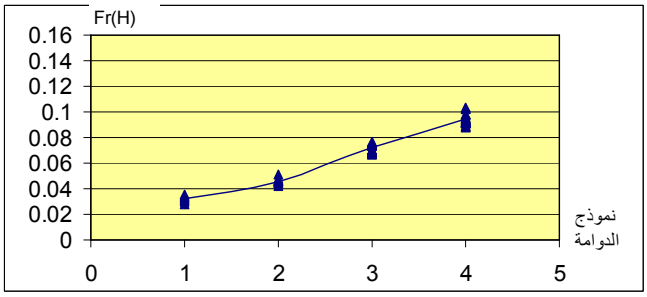


الشكل (11). العلاقة بين Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و b/D في الحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ من أجل عدة أعماق غمر $s/D=1.00-1.25-1.50-1.75-2.00$.

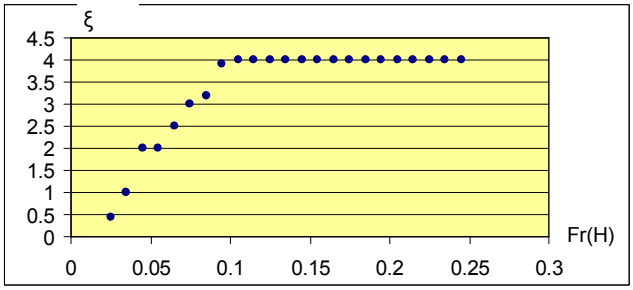
ويمكن التوصل إلى نتيجة جديدة مهمة جداً، وهي أن نموذج الدوامة المتشكلة في حجرة الامتصاص عند قيم معينة لبعد الجدار الخلفي l/D ولارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن أرض الحجرة z/D يتعلق بعدد فراود في الحجرة Fr_H ، ولا تأثير لعرض الحجرة ولعمق الغمر فيها على نموذج الدوامة المتشكلة إلا من خلال تأثيرهما في قيمة Fr_H . لتعميم صحة النتيجة السابقة تم تغيير بعد الجدار الخلفي، وأجريت

عدة تجارب على الحجرة $z/D=0.25, l/D=1.25$ عند عدة عروض $b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$ فتأكدت صحة النتيجة حيث يتعلق نموذج الدوامة المتشكلة بعدد فراود بغض النظر عن العرض وعمق الغمر. ولكن قيم عدد فراود Fr_H اختلفت عن قيم الحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ مما يعطي إشارة أن بعد الجدار الخلفي يؤدي دوراً في نموذج الدوامة السطحية المتشكلة.

كذلك يستنتج من التجارب في جميع الحالات أن شدة الدوامة واحتمال تشكلها يزداد بزيادة عدد فراود Fr_H. يبين الشكل (12) العلاقة التي تربط بين كل نموذج من الدوامات المتشكلة وعدد فراود Fr_H عند بداية تشكل هذا النموذج للحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ ولجميع العروض $b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$ وأعماق الغمر لها، حيث يلاحظ بشكل واضح أن نموذج الدوامة يتطور مع زيادة عدد فراود Fr_H. كما يبين الشكل (13) العلاقة التي تربط بين عدد فراود Fr_H ومعيار شدة الدوامة السطحية ξ (مأخود كقيم وسطية)، وذلك للحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ من أجل جميع العروض $b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$ وأعماق الغمر $s/D=1.00-1.25-1.50-1.75-2.00$ ، حيث يلاحظ أن شدة الدوامة تزداد مع زيادة عدد فراود Fr_H، ثم عندما يتجاوز Fr_H قيمة معينة يكون النموذج الرابع هو النموذج المتشكل والمسيطر دوماً.

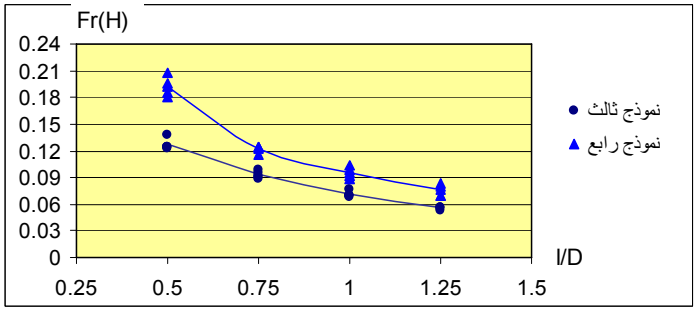


الشكل (12). العلاقة بين نموذج الدوامة المتشكلة و Fr_H عند بداية تشكله في الحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ من أجل جميع العروض وأعماق الغمر لها.



الشكل (13). العلاقة بين Fr_H ومعيار شدة الداومة السطحية ξ في الحجرة من أجل جميع العروض وأعماق الغمر لها. $z/D=0.25, l/D=1.00$

لدراسة تأثير بعد الجدار الخلفي l/D في شدة الدوامة أجريت تجارب على الحجرة $z/D=0.25, b/D=2.00$، وتم تغيير البعد الخلفي للحجرة وفق أربع قيم $l/D=0.50-0.75-1.00-1.25$، ومن أجل كل بعد l/D تم اختبار الحجرة وفق جميع أعماق الغمر والغزارات المذكورة في الحالات السابقة، فتبين أن عدد فراود Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع يتناقص مع زيادة البعد l/D. يبين الشكل (14) العلاقة التي تربط بين عدد فراود Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع وبعد الجدار الخلفي l/D للحجرة ذات الأبعاد $z/D=0.25, b/D=2.00$، حيث نلاحظ أن قيمة Fr_H تتناقص مع زيادة بعد الجدار الخلفي. ويستنتج من ذلك أن واحتمال تشكل الدوامة شدتها يزداد بزيادة بعد الجدار الخلفي للحجرة، لأنه بتكبير l/D تتشكل الدوامة عند عدد فراود أقل.

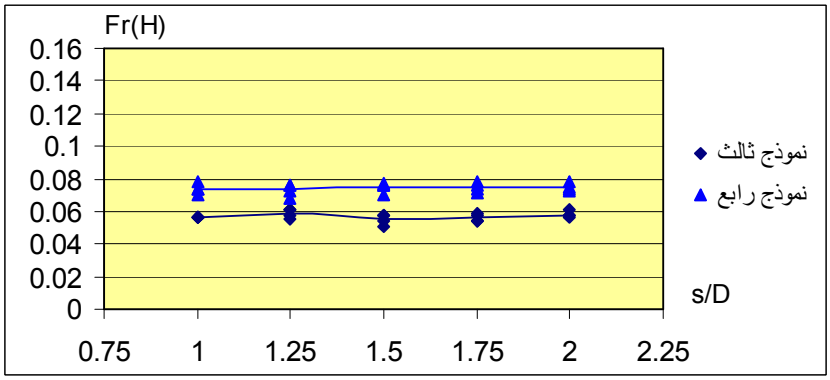


الشكل (14). العلاقة Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع و بعد الجدار الخلفي l/D في الحجرة من أجل جميع أعماق الغمر لها. $z/D=0.25, b/D=2.00$

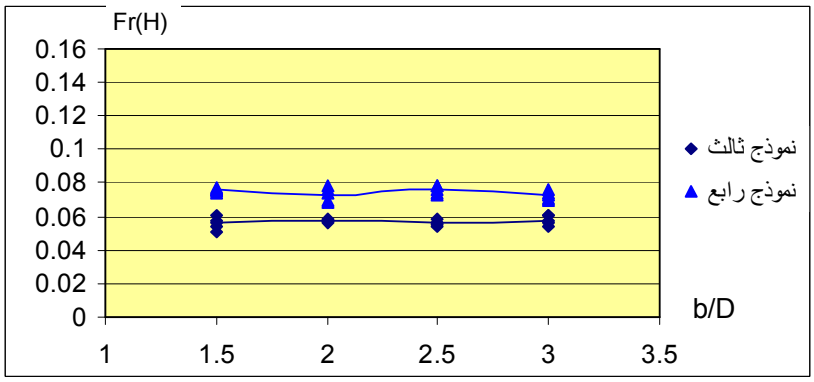
تم تغيير قيمة ارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن أرض الحجرة z/D وفق القيم $z/D = 0.25 - 0.50 - 0.750 - 1.00$، ومن أجل كل ارتفاع وعند $l/D = 1.00$ تم تغيير عرض الحجرة أربع مرات $b/D = 1.50 - 2.00 - 2.50 - 3.00$، وفي كل حجرة مختبرة تم تغيير عمق الغمر وغزارة الجريان كما سبق. كان الهدف من تغيير قيمة z/D تعميم النتائج التي تم الحصول عليها للحجرة $z/D = 0.25$، وكذلك دراسة تأثير قيمة z/D في تشكل الدوامات السطحية. بعد تحليل النتائج للحجرات المختلفة ذات القيم $z/D = 0.50 - 0.750 - 1.00$ تم التوصل إلى النتائج نفسها التي تم التوصل إليها في الحجرة $z/D = 0.25$، أي:

- هناك علاقة مباشرة بين نموذج الدوامة المتشكلة وعدد فراود في الحجرة Fr_H، وأنه من أجل ارتفاع z/D وبعد l/D معينين فإن كل نموذج من الدوامات يبدأ بالتشكل دوماً عند القيم نفسها لـــ Fr_H تقريباً بغض النظر عن عرض الحجرة وعمق الغمر فيها.
- يتناقص عدد فراود Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع مع زيادة البعد l/D.
- تزداد شدة الدوامة واحتمال تشكلها بزيادة عدد فراود Fr_H.

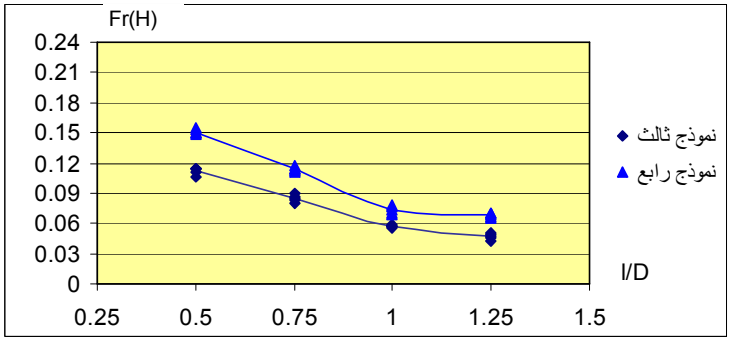
وتظهر الأشكال (18,17,16,15) النتائج التحليلية للحجرة $z/D = 0.75, l/D = 1.00$ عند القيم المختلفة للعروض وأعماق الغمر، حيث تلاحظ النتائج نفسها التي حصلنا عليها عند دراسة الحجرة $z/D = 0.25, l/D = 1.00$ مع حصول انخفاض بسيط في قيمة عدد فراود في الحجرة Fr_H عما كان عليه في الحجرة $z/D = 0.25$.



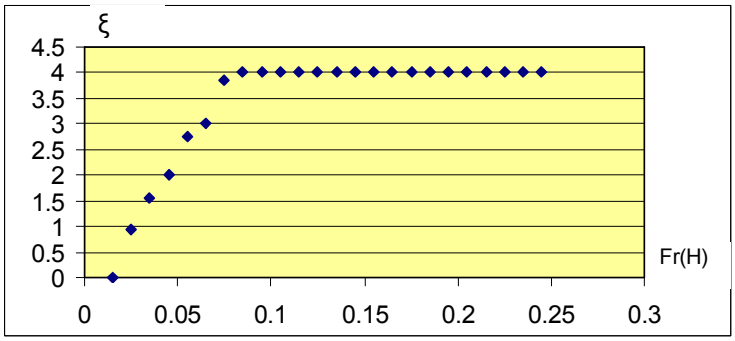
الشكل (15). العلاقة بين Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و s/D . في الحجرة $z/D=0.75, l/D=1.00$ من أجل عدة عروض $b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$.



الشكل (16). العلاقة بين Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و b/D في الحجرة $z/D=0.75, l/D=1.00$ من أجل عدة أعماق غمر $s/D=1.00-1.25-1.50-1.75-2.0$.



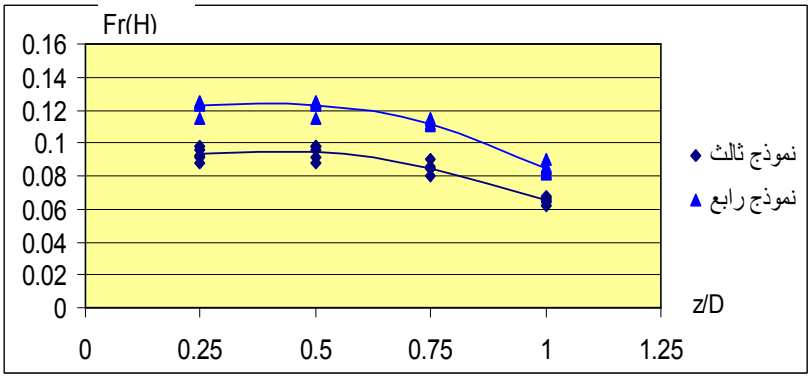
الشكل (17). العلاقة بين Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و بعد الجدار الخلفي لها l/D في الحجرة $z/D=0.75, b/D=2.00$ من أجل جميع أعماق الغمر لها.



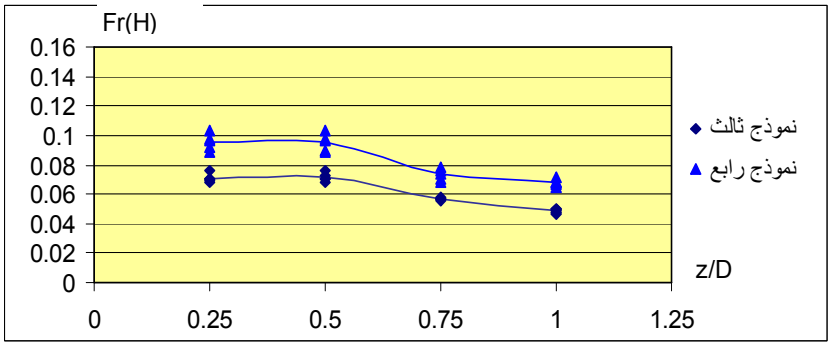
الشكل (18). العلاقة بين Fr_H ومعيار شدة الداومة السطحية في الحجرة $z/D=0.75, l/D=1.00$ من أجل جميع العروض وأعماق الغمر لها.

كما يستنتج أيضاً من تحليل النتائج أنه مع زيادة قيمة z/D من $z/D=0.25$ إلى $z/D=0.50$ لا تتغير تقريباً قيمة عدد فراود Fr_H عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع، ولكن مع تكبير قيمة z/D إلى $z/D=0.75$ ثم إلى $z/D=1.00$ تتناقص قيمة عدد فراود Fr_H إلى حد ما. توضح الأشكال (22,21,20,19) العلاقة التي تربط بين قيمة وعدد فراود Fr_H عند بداية تشكل كل

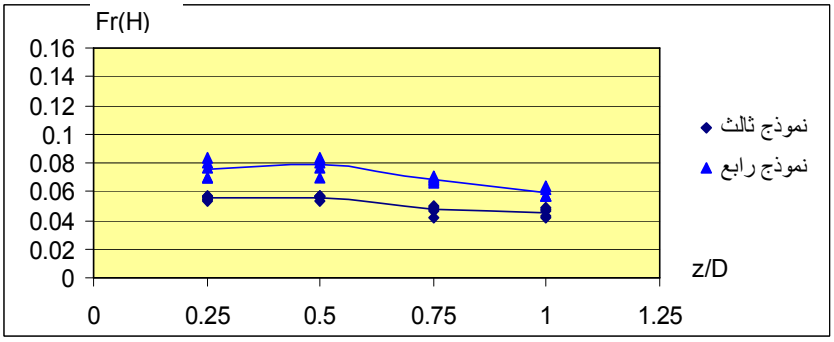
من النموذجين الثالث والرابع و z/D في حجرات مختلفة، حيث يظهر بشكل واضح أنه لا يتغير عدد فراود Fr_H بين $z/D = 0.25 - 0.50$ ولكن يتناقص إلى حد ما مع زيادة ارتفاع القمع إلى $z/D = 0.75 - 1.00$.



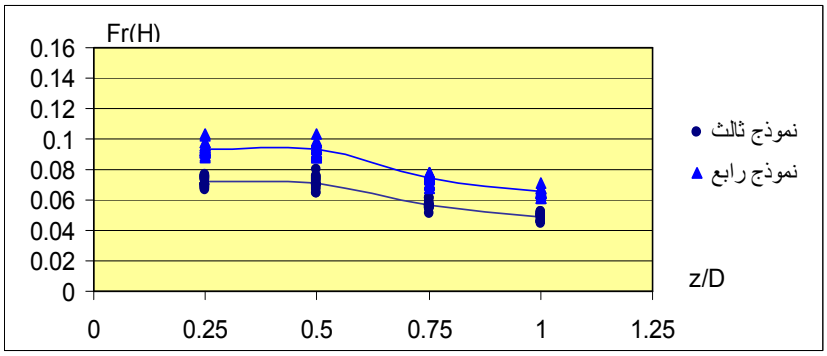
الشكل (19). العلاقة Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و ارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن الأرضية z/D في الحجرة $l/D = 0.75, b/D = 2.00$ من أجل جميع أعماق الغمر لها.



الشكل (20). العلاقة Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات و ارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن الأرضية z/D في الحجرة $l/D = 1.00, b/D = 2.00$ من أجل جميع أعماق الغمر لها.



الشكل (21). العلاقة Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات وارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن الأرضية z/D في الحجرة $b/D=2.00$ من أجل $l/D=1.25$ جميع أعماق الغمر لها.



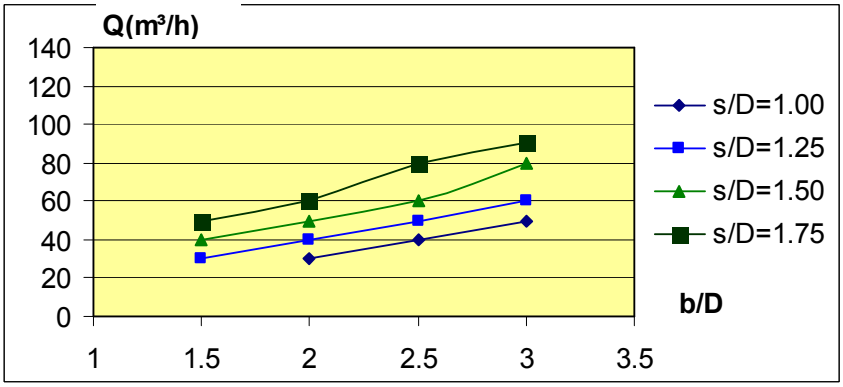
الشكل (22). العلاقة Fr_H عند بداية تشكل النموذجين الثالث والرابع من الدوامات السطحية و z/D في الحجرة $l/D=1.00$ من أجل جميع العروض $b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$ وأعماق الغمر لها .

تأثير أبعاد الحجرة

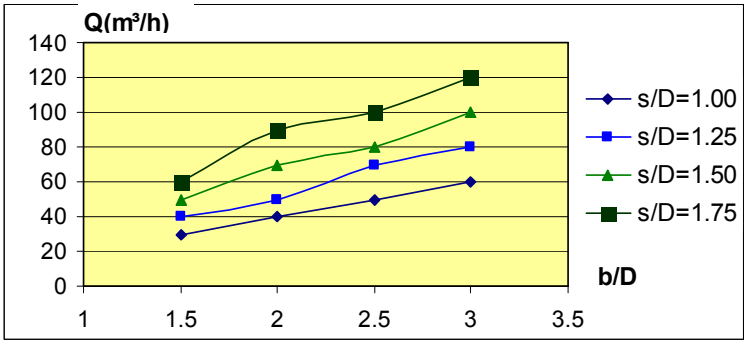
استطعنا من خلال تحليل النتائج السابقة دراسة تأثير عدد فراود Fr_H في نماذج الدوامات السطحية وشدتها. صحيح أن تشكل الدوامات مرتبط بشكل كبير بعدد فراود Fr_H، ولكن لا ننسى أن عدد فراود $Fr_H = \dfrac{Q}{b \cdot H \cdot \sqrt{g \cdot H}}$ مرتبط بارتفاع الماء

في الحجرة وبعرضها. لذلك لدراسة تأثير كل بعد من أبعاد الحجرة في تشكل الدوامات السطحية تم تغيير بعد واحد وتثبيت باقي الأبعاد الأخرى، ومن ثم رسم منحني العلاقة بين هذا البعد وغزارة الجريان عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع للدوامات.

تبين الأشكال (24،23) العلاقة التي تربط بين عرض الحجرة b/D وغزارة الجريان Q عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع في الحجرة بأعماق غمر مختلفة. ويظهر بوضوح أنه مع زيادة عرض الحجرة تزداد الغزارة اللازمة لتشكل كل نموذج من الدوامات، أي مع ثبات باقي المتغيرات الأخرى يقل احتمال تشكل الدوامات السطحية في الحجرة مع زيادة عرضها. $z/D = 0.25, l/D = 1.00$

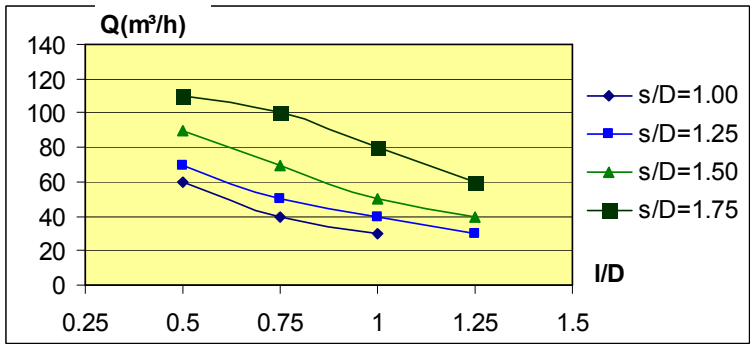


الشكل (23). العلاقة بين العرض b/D والغزارة Q عند بداية تشكل النموذج الثالث من الدوامات عند أعماق غمر مختلفة من أجل $z/D = 0.25, l/D = 1.00$.

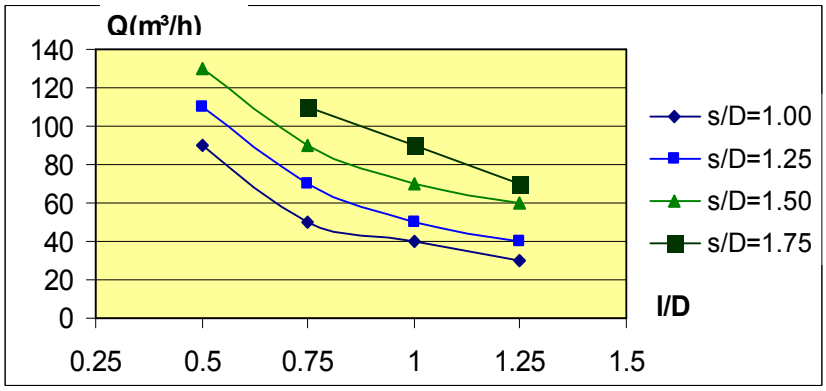


الشكل (24). العلاقة بين العرض b/D والغزارة Q عند بداية تشكل النموذج الرابع من الدوامات عند أعماق غمر مختلفة من أجل $z/D=0.25, l/D=1.00$.

تظهر الأشكال (26,25) العلاقة التي تربط بين البعد الخلفي لجدار الحجرة l/D وغزارة الجريان Q عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع في الحجرة $z/D=0.25, b/D=2.00$ بأعماق غمر مختلفة. ويظهر من هذه الأشكال بوضوح أنه مع زيادة بعد الجدار الخلفي تقل الغزارة اللازمة لتشكل كل نموذج من الدوامات، أي يزداد احتمال تشكل الدوامات السطحية مع زيادة البعد الخلفي للحجرة l/D.



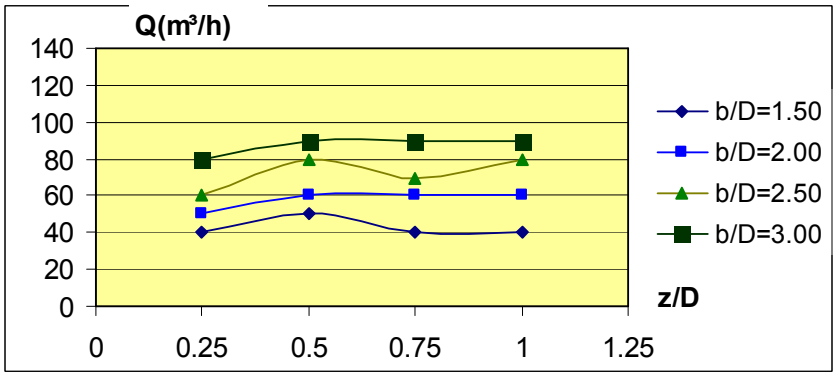
الشكل (25). العلاقة بين l/D والغزارة Q عند بداية تشكل النموذج الثالث من الدوامات عند أعماق غمر مختلفة من أجل $z/D=0.25, b/D=2.00$.



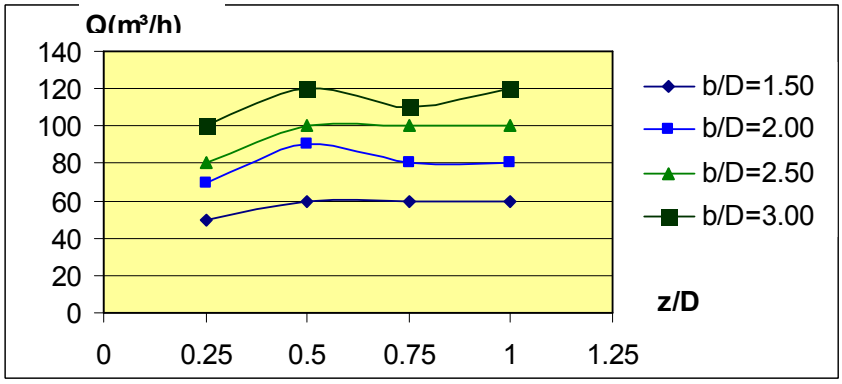
الشكل (26). العلاقة بين l/D والغزارة Q عند بداية تشكل النموذج الرابع من الدوامات عند أعماق غمر مختلفة من أجل $z/D=0.25, b/D=2.00$.

كما تبين الأشكال (28,27) العلاقة التي تربط بين ارتفاع قمع الامتصاص عن أرضية الحجرة z/D وغزارة الجريان Q عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع في الحجرة $s/D=1.50, l/D=1.00$ بعروض مختلفة. ويظهر من هذه الأشكال أنه مع زيادة قيمة z/D من $z/D=0.25$ إلى $z/D=0.50$ تزداد بشكل قليل الغزارة اللازمة لتشكل كل نموذج من الدوامات، ثم مع تكبير الارتفاع إلى قيم أكبر لم يلاحظ تأثير واضح في الغزارة. أي يمكن الاستنتاج أنه عند زيادة ارتفاع القمع من $z/D=0.25$ إلى $z/D=0.50$ يقل احتمال تشكل الدوامات، ثم لا يوجد تأثير واضح في احتمال تشكلها مع زيادة z/D إلى قيم أكبر من $z/D=0.50$.

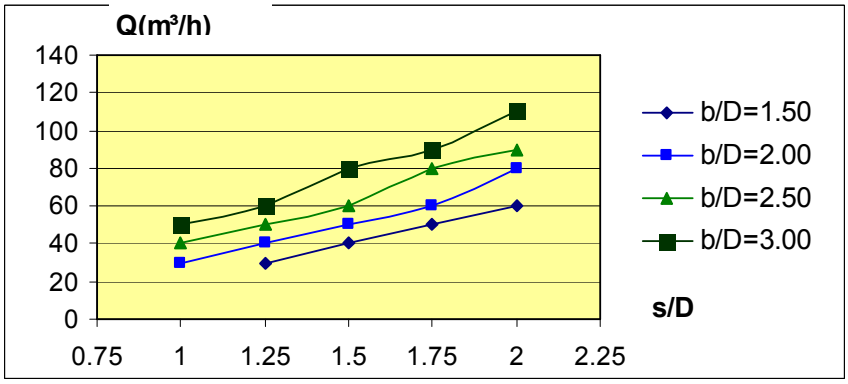
وتظهر الأشكال (30,29) العلاقة التي تربط بين عمق الغمر s/D وغزارة الجريان Q عند بداية تشكل كل من النموذجين الثالث والرابع في الحجرة $z/D=0.25, l/D=1.00$ بعروض مختلفة. ويظهر بشكل واضح أنه مع زيادة عمق الغمر تزداد الغزارة اللازمة لتشكل كل نموذج من الدوامات، أي يقل احتمال تشكل الدوامات السطحية مع زيادة عمق الغمر للحجرة s/D .



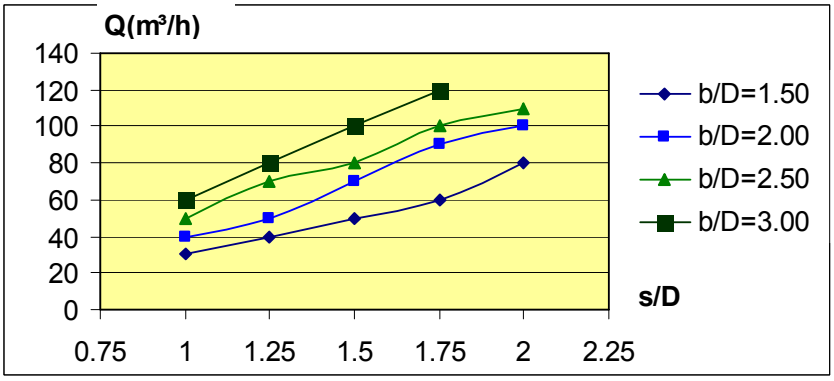
الشكل (27). العلاقة بين z/D والغزارة عند بداية تشكل النموذج الثالث من الدوامات عندعروض مختلفة من أجل $s/D=1.50, l/D=1.00$.



الشكل (28). العلاقة بين z/D والغزارة عند بداية تشكل النموذج الرابع من الدوامات عندعروض مختلفة من أجل $s/D=1.50, l/D=1.00$.



الشكل (29). العلاقة بين s/D والغزارة عند بداية تشكل النموذج الثالث من الدوامات عندعروض مختلفة من أجل $z/D=0.25, l/D=1.00$.

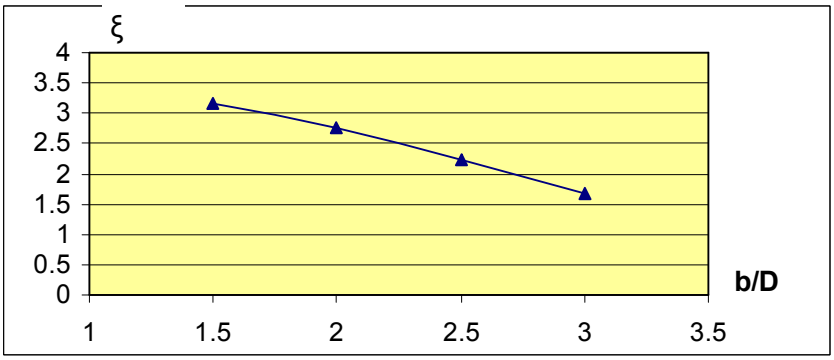


الشكل (30). العلاقة بين s/D والغزارة عند بداية تشكل النموذج الرابع من الدوامات عندعروض مختلفة من أجل $z/D=0.25, l/D=1.00$.

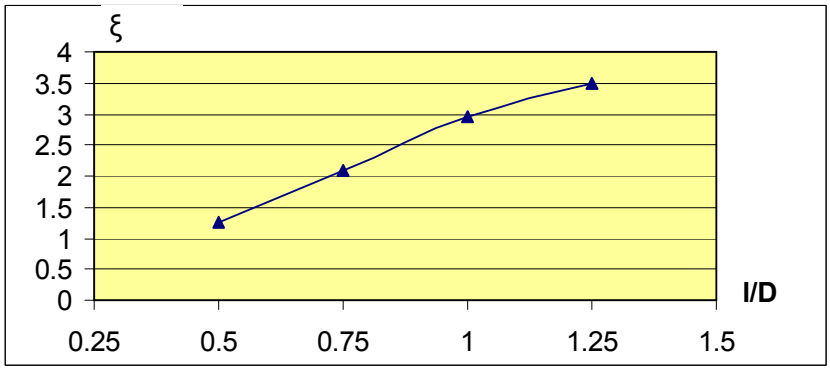
لدراسة تأثير أبعاد الحجرة في تشكل الدوامات السطحية ومن ثم اختيار الحجرات الأفضل، تم تغيير أبعاد الحجرة عند أربع قيم لارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص $z/D=0.25-0.50-0.750-1.00$ وعند كل قيمة لـ z/D تم تغيير البعد الخلفي للحجرة وفق القيم $l/D=0.50-0.75-1.00-1.25$ ثم عند كل قيمة لـ l/D تم تغيير عرض الحجرة وفق أربع قيم $b/D=1.50-2.00-2.50-3.00$

وعند كل قيمة لـــ b/D تم تغيير غمق الغمر وفق القيم $s/D = 1.00 - 1.25 - 1.50 - 1.75 - 2.00$ أما غزارة الجريان فقد تم تثبيتها عند القيمة $Q = 70m^3/s$، تحقق سرعة جريان في أنبوب الامتصاص $u = 1.71m/s$. وقد نظمت النتائج في الجدول (2). حيث وضع نموذج كل دوامة متشكلة وفقاً للحالة المختبرة. تظهر الأشكال (33,32,31) العلاقة بين معيار شدة الدوامة (مأخوذ كقيمة وسطية) وبين كل بعد من أبعاد الحجرة. فمثلاً عند حساب معيار شدة الدوامة السطحية ξ عند عرض معين تم توسيط جميع نماذج الدوامات المتشكلة لجميع قيم عمق الغمر وارتفاع القمع وبعد الجدار الخلفي عند ذلك العرض، وكذلك الأمر بالنسبة للأبعاد الأخرى. ويظهر من الأشكال أن شدة الدوامات السطحية عند سرعة جريان معينة ثابتة تزداد عند إنقاص عرض الحجرة b/D وزيادة البعد الخلفي l/D لها، أما بالنسبة لتأثير ارتفاع القمع عن أرضية الحجرة فلوحظ انخفاض قليل في شدة الدوامة عند زيادة z/D من $z/D = 0.25$ إلى $z/D = 0.50$ ولم يلاحظ تأثير يذكر في شدة الداومة عند زيادة الارتفاع إلى $z/D = 0.75 - 1.00$. حسب رأينا، في أثناء الاستثمار لا يجوز أن يتشكل في الحجرة أي من النموذجين الثالث والرابع من الدوامات لأن ذلك يؤثر بشكل سلبي في عمل المضخة، ولا يفضل أن يتشكل النموذج الثاني، ويمكن السماح بتشكل النموذج الأول دون أي مشكلة. بناء على ذلك ومن خلال نظرة عامة للنتائج التي تم الحصول عليها والجدول (2). يلاحظ أن زيادة ارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن أرضية الحجرة أكثر من $z/D = 0.50$ لم يخفف بشكل ملحوظ من احتمال تشكل الدوامات، لذلك لا داعي لاستخدام ارتفاع أكبر من $z/D = 0.50$ لأن ذلك سوف يزيد من الارتفاع الكلي للماء في الحجرة وهذا غير اقتصادي لأنه سيؤدي إلى زيادة عمق التأسيس لمحطة الضخ، لذلك ينصح عند التصميم اعتماد $z/D = 0.50$. كما يلاحظ أن زيادة بعد الجدار الخلفي للحجرة يزيد احتمال تشكل الدوامات السطحية وخاصة عند

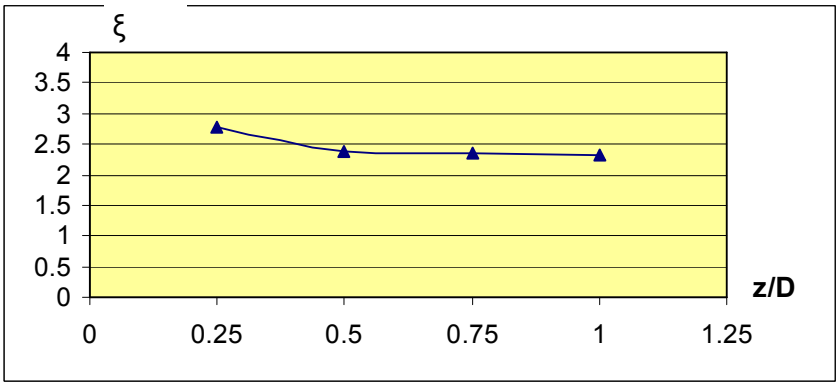
$l/D = 1.00 - 1.25$ ، و ينصح باستخدام $l/D = 0.50 - 0.75$. كذلك إن تقليل عرض الحجرة يزيد من احتمال تشكل الدوامات ، ولذلك استخدام عرض الحجرة $b/D = 2.50 - 3.00$ هو الأفضل لتخفيف احتمال تشكل الدوامات، والأفضل اقتصادياً استخدام العرض $b/D = 2.50$ لأن ذلك سيخفف من العرض الكلي لحوض الامتصاص. وباعتماد القيم السابقة لأبعاد الحجرة $z/D = 0.50, l/D = 0.50 - 0.75, b/D = 2.5$ ينصح أن لا يقل عمق الغمر فيها عن $s/D = 1.50$ دون أن يتشكل أي من النموذج الرابع والثالث وحتى الثاني من الدوامات،ويمكن في بعض الحالات السماح بتخفيض عمق الغمر إلى $s/D = 1.25$ عندها يتشكل النموذج الثاني. عند عدم توافر مكان واسع لتنفيذ حوض الامتصاص يمكننا من إنقاص عرض الحجرة حتى $b/D = 2.00$ ولكن عندها لا بد من زيادة عمق الغمر إلى $s/D = 1.75$ وبذلك نضمن حتى عدم تشكل النموذج الثاني من الدوامات، ويمكن السماح بتخفيف غمق الغمر في بعض الحالات إلى $s/D = 1.50$ عندها يتشكل النموذج الثاني.



الشكل (31). العلاقة بين عرض الحجرة b/D ومعيار شدة الدوامة السطحية ξ في حجر الامتصاص مأخوذاً كقيمة وسطية لجميع قيم $l/D, z/D, s/D$ من أجل غزارة جريان $Q = 70m^3/h$.



الشكل (32). العلاقة بين بعد الجدار الجانبي l/D ومعيار شدة الدوامة السطحية ξ في حجر الامتصاص مأخوذاً كقيمة وسطية لجميع قيم $b/D, z/D, s/D$ من أجل غزارة جريان $Q = 70m^3/h$.



الشكل (33). العلاقة بين ارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص z/D ومعيار شدة الدوامة السطحية ξ في حجر الامتصاص مأخوذاً كقيمة وسطية لجميع قيم $l/D, z/D, s/D$ من أجل غزارة جريان $Q = 70m^3/h$.

7. النتائج العامة والتوصيات

تم التوصل في هذا البحث إلى النتائج الآتية:

1– من خلال تحليل التجارب لم يلاحظ أن نموذج الدوامة المتشكلة وشدتها يتعلقان بعدد فراود منسوباً لعمق الغمر $Fr_s = \frac{u_d}{\sqrt{g \cdot s}}$، ولكن وجد بشكل واضح أن نموذج الدوامة المتشكلة يتعلق بعدد فراود في الحجرة $Fr_H = \frac{u_H}{\sqrt{g \cdot H}}$. ويمكن الاعتماد على هذا القانون في نمذجة تشكل الدوامات في الحجرات.

2– تبين أن نموذج الدوامة المتشكلة يتعلق فقط بعدد فراود في الحجرة Fr_H وببعد الجدار للحجرة l/D وبدرجة أقل بارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن الأرضية z/D، ولم يلاحظ تأثير مباشر لعرض الحجرة b/D ولعمق الغمر s/D في نموذج الدوامة المتشكلة إلا من خلال تأثيرهما في عدد فراود Fr_H. أي توجد العلاقة الآتية: $\xi = f\left(\frac{l}{D}, \frac{z}{D}, Fr_H\right)$.

3– يزداد احتمال تشكل الدوامة السطحية ويتطور نموذجها مع زيادة عدد فراود في الحجرة Fr_H، ولكن مع تجاوز عدد فراود قيمة معينة يتشكل النموذج الرابع من الدوامات دوماً.

4– في المجال المختبر وعند غزارة ثابتة وبدراسة كل بعد للحجرة في تشكل الدوامات السطحية على حدة مع تثبيت باقي الأبعاد، لوحظ ما يأتي: يزداد احتمال تشكل الدوامة السطحية وشدتها بشكل واضح مع إنقاص عرض الحجرة b/D وزيادة البعد الخلفي لها l/D وتقليل عمق الغمر فيها s/D وزيادة ارتفاع الفتحة من $z/D = 0.25$ إلى $z/D = 0.50$، أما عند $z/D > 0.50$ فقد لوحظ انخفاض قليل في احتمال تشكل الدوامات.

5- عند تصميم حجرات الامتصاص ولتفادي تشكل الدوامات السطحية يمكن اعتماد الأبعاد الآتية: $z/D = 0.50, l/D = 0.50 - 0.75, l/D = 2.5$ مع عمق غمر لا يقل عن $s/D = 1.50$ دون تشكل النموذج الثاني من الدوامات. ويمكن في حالات معينة إنقاص عمق الغمر حتى $s/D = 1.25$ مع السماح بتشكل النموذج الثاني. كما يمكن إنقاص عرض الحجرة إلى $b/D = 2.00$ ولكن عندها يجب زيادة عمق الغمر إلى $s/D = 1.75$ دون تشكل النموذج الثاني من الدوامات.

الرموز والمصطلحات

- b: عرض الحجرة .
- D: قطر فتحة أنبوب الامتصاص .
- d: قطر أنبوب الامتصاص .
- $Fr_s = \frac{u_d}{\sqrt{g \cdot s}}$: عدد فراود بالنسبة لعمق الغمر.
- $Fr_H = \frac{u_H}{\sqrt{g \cdot H}}$: عدد فراود في مقطع الحجرة.
- g: تسارع الجاذبية الأرضي.
- $H = s + z$: الارتفاع الكلي للماء في الحجرة.
- l: بعد الجدار الخلفي للحجرة عن محور أنبوب الامتصاص.
- s: عمق الغمر.
- Q: غزارة الجريان.
- $\mathrm{Re}_d = \frac{u_d \cdot d}{\nu}$: عدد رينولدز في أنبوب الامتصاص.
- $\mathrm{Re}_s = \frac{Q}{\nu \cdot s}$: عدد رينولدز لعمق الغمر.

- u : سرعة الجريان.
- u_d: سرعة الجريان في أنبوب الامتصاص.
- $u_H = \frac{Q}{b \cdot H}$: سرعة الجريان في مقطع الحجرة.
- ν: اللزوجة الحركية.
- $We_d = \frac{\rho \cdot u_d^2 \cdot d}{\sigma}$: عدد فيبر.
- z: ارتفاع فتحة أنبوب الامتصاص عن أرض الحجرة.
- ρ: الكتلة النوعية.
- μ: اللزوجة التحريكية .
- σ: التوتر السطحي.
- ξ: رقم لا بعدي يدل على شدة الدوامة.

الجدول(1). نماذج الدوامات المتشكلة في إحدى الحجرات بعروض وأعماق وغرارات متغيرة من أجل z/D=0.25, l/D=1.00.

z/D=0.25															
h/D=1.50 l/D=1.00															
s/D	2			1.75			1.5			1.25			1		
Q(m³/h)	نوع	Fr_H	Fr_s	نوع	Fr_H	Fr_s	نوع	Fr_H	Fr_s	نوع	Fr_H	Fr_s	نوع	Fr_H	Fr_s
30	1	0.038	0.39	2	0.046	0.42	2	0.056	0.45	3	0.070	0.49	4	0.092	0.55
40	2	0.051	0.52	2	0.061	0.56	3	0.074	0.60	4	0.094	0.66	4	0.123	0.74
50	2	0.064	0.65	3	0.076	0.70	4	0.093	0.75	4	0.117	0.82	4	0.154	0.92
60	3	0.076	0.78	4	0.091	0.84	4	0.112	0.90	4	0.140	0.99	4	0.185	1.11
70	3	0.089	0.91	4	0.106	0.98	4	0.130	1.05	4	0.164	1.15	4	0.215	1.29
80	4	0.102	1.04	4	0.122	1.11	4	0.149	1.20	4	0.187	1.32	4	0.246	1.47
90	4	0.115	1.17	4	0.137	1.25	4	0.167	1.35	4	0.211	1.48	4	0.277	1.66
100	4	0.127	1.30	4	0.152	1.39	4	0.186	1.51	4	0.234	1.65	4	0.308	1.84
110	4	0.140	1.43	4	0.167	1.53	4	0.205	1.66	4	0.257	1.81	4	0.339	2.03
120	4	0.153	1.56	4	0.182	1.67	4	0.223	1.81	4	0.281	1.98	4	0.369	2.21
130	4	0.166	1.69	4	0.198	1.81	4	0.242	1.96	4	0.304	2.14	3	0.400	2.40
	h/D=2.00 l/D=1.00														
30	1	0.029	0.39	1	0.034	0.42	2	0.042	0.45	2	0.053	0.49	3	0.069	0.55
40	1	0.038	0.52	2	0.046	0.56	2	0.056	0.60	3	0.070	0.66	4	0.092	0.74
50	2	0.048	0.65	2	0.057	0.70	3	0.070	0.75	4	0.088	0.82	4	0.115	0.92
60	2	0.057	0.78	3	0.068	0.84	3	0.084	0.90	4	0.105	0.99	4	0.138	1.11
70	2	0.067	0.91	3	0.080	0.98	4	0.098	1.05	4	0.123	1.15	4	0.162	1.29
80	3	0.076	1.04	3	0.091	1.11	4	0.111	1.20	4	0.140	1.32	4	0.185	1.47
90	3	0.086	1.17	4	0.103	1.25	4	0.125	1.35	4	0.158	1.48	4	0.208	1.66
100	4	0.096	1.30	4	0.114	1.39	4	0.139	1.51	4	0.176	1.65	4	0.231	1.84
110	4	0.105	1.43	4	0.125	1.53	4	0.153	1.66	4	0.193	1.81	4	0.254	2.03
120	4	0.115	1.56	4	0.137	1.67	4	0.167	1.81	4	0.210	1.98	4	0.277	2.21
130	4	0.124	1.69	4	0.148	1.81	4	0.181	1.96	4	0.053	2.14	4	0.300	2.40
	h/D=2.50 l/D=1.00														
30	0	0.023	0.39	1	0.027	0.42	1	0.033	0.45	2	0.042	0.49	2	0.055	0.55
40	1	0.031	0.52	1	0.036	0.56	2	0.045	0.60	2	0.056	0.66	3	0.074	0.74
50	1	0.038	0.65	2	0.046	0.70	2	0.056	0.75	3	0.070	0.82	4	0.092	0.92
60	2	0.046	0.78	2	0.055	0.84	3	0.067	0.90	3	0.084	0.99	4	0.111	1.11
70	2	0.054	0.91	2	0.064	0.98	3	0.078	1.05	4	0.098	1.15	4	0.129	1.29
80	2	0.061	1.04	3	0.073	1.11	4	0.089	1.20	4	0.112	1.32	4	0.148	1.47
90	3	0.069	1.17	3	0.082	1.25	4	0.100	1.35	4	0.126	1.48	4	0.166	1.66
100	3	0.077	1.30	4	0.091	1.39	4	0.112	1.51	4	0.140	1.65	4	0.185	1.84
110	3	0.084	1.43	4	0.100	1.53	4	0.123	1.66	4	0.155	1.81	4	0.203	2.03
120	4	0.092	1.56	4	0.109	1.67	4	0.134	1.81	4	0.169	1.98	4	0.222	2.21
130	4	0.099	1.69	4	0.119	1.81	4	0.145	1.96	4	0.183	2.14	4	0.240	2.40
	h/D=3.00 l/D=1.00														
30	0	0.019	0.39	0	0.023	0.42	1	0.028	0.45	1	0.035	0.49	2	0.046	0.55
40	0	0.025	0.52	1	0.030	0.56	1	0.037	0.60	2	0.047	0.66	2	0.062	0.74
50	1	0.032	0.65	1	0.038	0.70	2	0.047	0.75	2	0.059	0.82	3	0.077	0.92
60	1	0.038	0.78	2	0.046	0.84	2	0.056	0.90	3	0.070	0.99	4	0.092	1.11
70	2	0.045	0.91	2	0.053	0.98	2	0.065	1.05	3	0.082	1.15	4	0.108	1.29
80	2	0.051	1.04	2	0.061	1.11	3	0.074	1.20	4	0.094	1.32	4	0.123	1.47
90	2	0.057	1.17	3	0.068	1.25	3	0.084	1.35	4	0.105	1.48	4	0.139	1.66
100	2	0.064	1.30	3	0.076	1.39	4	0.093	1.51	4	0.117	1.65	4	0.154	1.84
110	3	0.070	1.43	3	0.084	1.53	4	0.102	1.66	4	0.129	1.81	4	0.169	2.03
120	3	0.076	1.56	4	0.091	1.67	4	0.111	1.81	4	0.140	1.98	4	0.185	2.21
130	3	0.083	1.69	4	0.099	1.81	4	0.121	1.96	4	0.152	2.14	4	0.200	2.40

الجدول (2). نماذج الدوامات السطحية المتشكلة في حجرات الامتصاص المختبرة من أجل غزارة

$$Q = 70m^3 / h$$

		Z= 0.25 D				Z= 0.50 D			
	s/D	b/D=1.5	b/D=2	b/D=2.5	b/D=3	b/D=1.5	b/D=2	b/D=2.5	b/D=3
l/D=0.5	1	3	3	2	1	3	3	2	1
	1.25	3	3	2	1	3	2	1	1
	1.5	2	2	1	1	2	2	1	0
	1.75	1	1	1	0	1	1	0	0
	2	1	1	0	0	1	1	0	0
l/D=0.75	1	4	4	4	4	4	4	3	2
	1.25	4	4	3	3	4	3	2	2
	1.5	4	3	2	2	3	2	1	1
	1.75	3	2	2	1	2	1	1	0
	2	2	1	1	1	2	1	0	0
l/D=1.0	1	4	4	4	4	4	4	4	3
	1.25	4	4	4	3	4	4	3	2
	1.5	4	4	3	2	4	3	2	2
	1.75	4	3	2	2	4	3	2	2
	2	3	2	2	2	3	2	2	1
l/D=1.25	1	4	4	4	4	4	4	4	4
	1.25	4	4	4	4	4	4	4	4
	1.5	4	4	4	4	4	4	4	3
	1.75	4	4	3	3	4	3	3	2
	2	4	3	3	3	3	3	2	2
		Z= 0.75 D				Z= 1.00 D			
	s/D	b/D=1.5	b/D=2	b/D=2.5	b/D=3	b/D=1.5	b/D=2	b/D=2.5	b/D=3
l/D=0.5	1	3	2	2	1	3	3	2	1
	1.25	3	2	2	1	2	2	2	1
	1.5	2	1	1	0	2	2	1	0
	1.75	1	1	0	0	1	1	0	0
	2	1	1	0	0	1	1	0	0
l/D=0.75	i	4	3	3	2	4	3	3	2
	1.25	4	3	2	1	3	3	2	1
	1.5	3	2	2	1	3	2	1	1
	1.75	2	2	1	0	2	2	1	0
	2	2	1	0	0	2	1	0	0
l/D=1.0	1	4	4	4	3	4	4	4	3
	1.25	4	4	3	2	4	4	3	2
	1.5	4	3	3	2	4	3	2	2
	1.75	4	3	2	1	4	3	2	1
	2	3	2	2	1	3	2	2	1
l/D=1.25	1	4	4	4	4	4	4	4	4
	1.25	4	4	4	4	4	4	4	4
	1.5	4	4	4	3	4	4	3	3
	1.75	4	3	3	2	4	3	3	2
	2	3	3	2	1	3	3	2	1

References

[1]. Anwar, H., Amhlett, M. Vortices at verticall inverced Intake. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 18, No. 2, 1980.
[2] Bauer, D., Nakato, T., and Ansar, M. Vortex Superssion in Miltiple-Pump Sumps. Proceedings of the 27 the IAHR Congress, San Francisco, California, 1998.
[3] Daggett, L., Keulegan, G. Similitude Conditions in Free-Surface Vortes Formation. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 100, No. 11, 1974.
[4] Levi , E. Vortices in hydraulics. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 117, No. 4, 1991.
[5] Jain, A., and Others. Vortex Formation at vertical Pipe Intake. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 100, No. 10, 1978.
[6]. John, E., and Others. Velocity of Air-Core Vortices at Hydraulic Intake. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 120, No. 4, 1994.
[7] Modeling of Pump Sumps with CFD Codes. Project of Delft hydraulics, 2002.
[8] Nakato, T., Ansar, M. Numerical Simulations of Inviscid Flows at Single Pump Intakes. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 40, No. 4, 2002.
[9] Nagaraja , S. Model Studies for Pumping Station Branch Canal of Narmada Project. 1997
[10] Odgaard,J. Free-Surface Air core Vortex. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 112, No. 7,1986.
[11]. Padmanabhan,M., Hecker,G. Scale Effects in Pump Sump. Journal of the Hydraulic Research, ASCE. Vol. 110, No. 11, 1984.
[12] Prosser , M. The Hydraulic design of Pump Sumps and Intakes. BHRA Fluid Engineering/CIRIA, 1977.
[14]. Stempniewski , M. Pompy. WNT. 1985.
[14] Wijdieks, J. Practice and Criteria of Pump Sump Model Investigation. Delft Hydraulic, No. 342, 1985
[15] Zeno, A., Issa, A. Hydraulic Studies in Pump Sumps of Mixed and Axial Flow Pumps. Journal of Damascus University, 2004.

تاريخ ورودالبحث إلى جامعة دمشق2004/11/21.