

أهم العوامل المسببة لظاهرة التكيف في المضخات الطاردة المركزية وطرق الحد منها

أحمد محمد الجدل¹، أحمد العجيلي علي²، علي محمد التهامي³

^{1,2,3} قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية التقنية الهندسية - جنزور، طرابلس - ليبيا

الملخص:

يتناول هذا البحث ظاهرة التكيف التي تحدث في المضخات الطاردة المركزية وكيفية حدوثها وإيضاح المكان الذي يحدث فيه التكيف، وأهم العوامل المسببة لحدوث هذه الظاهرة في المضخات الطاردة المركزية وما يترتب عنها من مشاكل ومخاطر، وذلك من خلال إجراء بعض التجارب المعملية بمعمل ميكانيكا الموائع بكلية التقنية الهندسية - جنزور، وبواسطة استخدام جهاز "فينشوري" الذي تحاكي قراءته قراءات المضخة الطاردة المركزية عند نفس الظروف التشغيلية، ومن ثم تقديم التوصيات اللازمة للحد من هذه العوامل المسببة لهذه الظاهرة.

الكلمات المفتاحية: المضخة الطاردة المركزية، التكيف، جهاز فينشوري، عمود الضغط، عمود السرعة.

1- المقدمة:

إن ازدياد سرعة المضخة بأعلى من المسموح بها، سيؤدي إلى حدوث ظاهرة التكيف التي تحدث عندما لا يملأ السائل الفراغ المخصص له في المضخة بشكل كامل، فيؤدي إلى تشكيل فجوات هوائية أو بخارية في السائل في منطقة الضغط المنخفض عند فتحة السحب، ومن ثم انفجارها في منطقة الضغط المرتفع عند فتحة الطرد، والتي من شأنها التسبب في تآكل دقاعة المضخة واهتزازها، ومن ثم تأثيرها سلباً على كراسي التحميل التي تعمل ضمن مجال سرعات قصوى مسموح بها ومصممة عليها، وكذلك على عمود الدوران وجلب عمود الدوران وصندوق الحشو أو مانع التسرب الميكانيكي والقارن الذي يقوم بإدارة المضخة.

إن مجموع عاملي السرعة العالية للسائل والخنق بين الخزان ومدخل المضخة يتسبب بانخفاض ضغط السائل الداخل عند فتحة السحب، وعندما ينخفض ضغط السائل إلى القيمة التي يتبخّر فيها عند درجة حرارة الجو المحيط (وهو ما يُعرّف بضغط التبخر)، يبدأ السائل في تكوين فقاعات من البخار، ما تلبث هذه الفقاعات أن تتفجر في منطقة الضغط المرتفع القريبة من فتحة الطرد، مؤدية إلى تخریب أجزاء المضخة الداخلية و من ثم الخارجية تبعاً، كما سلف ذكره [1,2].

2 - العوامل المؤثرة على حدوث التكهف في المضخات الطاردة المركزية [1,3,4]:

1.2- عامل التكهف (Cavitation Factor):

يعرف عامل التكهف على انه النسبة بين عمود الدخول للمضخة فوق ضغط البخار إلى العمود المنجز من قبل المضخة.

$$\sigma = \left(\frac{\text{pump total inlet head above vapor pressure}}{\text{head developed by pump}} \right)$$

$$\sigma = \frac{((p_i/\rho g) + (v_i^2/2g) - (p_{vap}/\rho g))}{H} \quad (1)$$

حيث إن جميع الضغوط في المعادلة هي ضغوط مطلقة.

البسط في المعادلة يسمى عمود السحب (Suction Head) ويسمى أيضاً صافي عمود السحب الموجب (N.P.S.H) (Net Positive Suction Head).

ويُعرف بأنه مقدار الضغط الذي يجب أن يضاف إلى عمود ضغط بخار السائل في مدخل المضخة، لكي ينسحب السائل (g) $\cdot (p_{vap} / \rho$

2.2- انخفاض الضغط الديناميكي (Dynamic Pressure Drop):

انخفاض الضغط الديناميكي ناشئ من ازدياد سرعة المائع على الوجه الخلفي للريشة، فعلى الوجه الخلفي للريشة يظل الضغط ينخفض نتيجة للعجلة التي اكتسبتها جسيمات المائع ثم يبدأ الضغط في الارتفاع كلما تقدم الجسم داخل المروحة نتيجة لما يكتسبه من طاقة خارجية، وهي الطاقة الميكانيكية المنقولة إليه عن طريق عمود المضخة. أما على الوجه الأمامي للريشة فيستمر الضغط في الارتفاع ويظل الضغط يتزايد كلما تقدم الجسم داخل المروحة نتيجة لما يكتسبه من طاقة خارجية.

3.2- صافي الضغط الموجب للسحب (NPSH):

وهو أقل ضغط سحب يمكن للمضخة أن تعمل عنده لتعطي الضغط والتصريف المطلوبين دون التعرض لظاهرة التكهف.

4.2- تأثير درجة الحرارة (Temperature Effect):

يتأثر السائل المدفوع عبر المضخة بازدياد درجة حرارته نظراً لما ينتج عن ارتفاع درجة الحرارة من إمكانية ظهور بخار للسائل عند هذا الضغط بعد الارتفاع في درجة الحرارة.

5.2- اللزوجة (Viscosity) :

كلما زادت لزوجة السائل قلت كفاءة المضخة المروحية، وفي هذه الحالة يمكن تسخين السائل قبل دخوله للمضخة، لتفادي هذا العيب.

6.2 - ارتفاع السحب الموجب الصافي على المضخة (NPSH Rise):

في المضخات الطاردة المركزية، يجب أن يكون الارتفاع المقابل للضغط المطلق في وعاء السحب مضافاً إليه ارتفاع السائل فوق محور المضخة أي ارتفاع السحب الكلي، كافيين للتغلب على الآتي:

- فواقد الاحتكاك بجميع صورها في خط السحب؛

$$(h_{fs} + h_i) \quad (2)$$

- الطاقة المفقودة نتيجة لسرعة السائل في خط السحب؛

$$(v_s^2 / 2g) = h_{vs} \quad (3)$$

- ضغط التبخر للسائل عند درجة حرارة السحب (p_v)، ويجب أن تكون جميع العناصر السابق ذكرها معبراً عنها على شكل ارتفاع ($head$) بالأقدام أو بالأمتار من السائل أي انه يجب أن يكون المقدار:

$$((p_s/\gamma + s_h) > (h_{fs} + h_i + h_{vs} + h_{ip} + (p_s/\gamma)) \quad (4)$$

$$((p_s/\gamma + s_h) - (h_{fs} + h_i + h_{vs} + h_{ip} + (p_v/\gamma)) > 0 \quad (5)$$

هذه القيمة الموجبة هي ما يطلق عليها ارتفاع السحب الموجب (N.P.S.H) وهذه القيمة يجب أن لا تقل عن الحد الأدنى المطلوب للمضخة لمنع حدوث التكهف، عند معدل التدفق المطلوب من المضخة، و بهذا يمكن القول إن:

$$(N.P.S.H) = ((p_s/\gamma + s_h) - (h_{fs} + h_i + h_{vs} + h_{ip} + (p_v/\gamma))$$

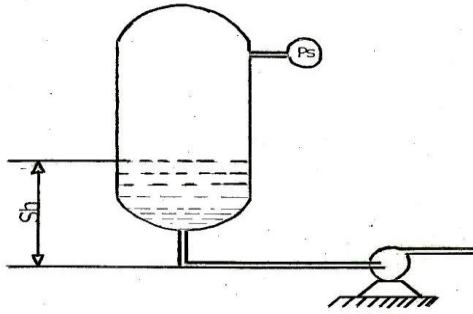
$$(N.P.S.H) = ((p_s - p_v)/\gamma) + s_h - (h_{fs} + h_i + h_{vs} + h_{ip}) \quad (6)$$

هذه المعادلة تمثل تحديداً في (N.P.S.H) للمضخات التي تسحب من مصدر مستوى السائل فيه أعلى من مستوى مركز المضخة. أما إذا كانت المضخة تسحب من مصدر مستوى السائل فيه دون مستوى مركز المضخة فان الإشارة تتغير إلى السالب وتسمى هنا بارتفاع سحب المضخة.

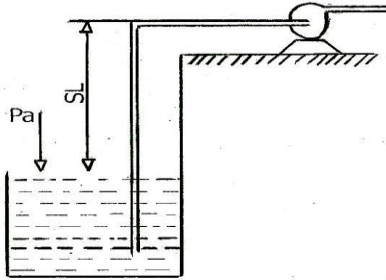
وإذا كان الضغط في خزان السحب مساويا للضغط الجوي فان المعادلة سوف تكون كما يلي:

$$(N.P.S.H) = ((p_a - p_v)/\gamma) - s_l - (h_{fs} + h_i + h_{vs} + h_{lp}) \quad (7)$$

و الشكل (1)، (2) يوضحان العلاقة بين ارتفاع سحب المضخة و الضغط الجوي:



الشكل (1)- العلاقة بين ارتفاع سحب المضخة والضغط الجوي



الشكل (2)- ارتفاع السحب الكلي فوق محور المضخة

هناك بعض الحالات الخاصة مثلا إذا كانت المضخة تسحب من وعاء مستوى السائل فيه فوق مستوى مركز المضخة وكان السائل في هذا الوعاء عند درجة الغليان.

فان المعادلة سوف تكون كما يلي:

$$p_s = p_v \quad (8)$$

في هذه الحالة تصبح المعادلة رقم (6):

$$(N.P.S.H) = S_h - (h_{fs} + h_i + h_{vs} + h_{lp}) \quad (9)$$

7.2 - ارتفاع السحب الموجب الصافي المطلوب والمتاح (*Required&Available NPSH*) :

ارتفاع السحب الموجب الصافي المطلوب هو المحدد من قبل الشركات المصنّعة للمضخات و الذي يتم تحديدها عادة في مختبرات الفحص الخاصة بهذه الشركات حسب إجراءات و خطواتٍ قياسيةٍ و عند ظروفٍ مختلفةٍ للتشغيل. حيث يجب أن تكون قيمة ارتفاع السحب الموجب الصافي المتاحة أعلى من قيمة ارتفاع السحب الموجب الصافي المطلوب أو مساوية لها حتى تضمن عدم حدوث التكيف في المضخة وتجنب الأخطار التي قد تنجم من حدوث ذلك.

8.2 - تأثير الارتفاع على الضغط الجوي (*Altitude Effect on Air Pressure*) :

وهذا ما يُعرفُ بالحد من ارتفاع السحب للمضخات التي تعمل عند ارتفاعات عالية بحيث لا يزيد عن قيم معينة تعتمد على مقدار الارتفاع فوق سطح البحر.

9.2 - تقليل فواقد خط السحب (*Minimizing of Suction Losess*) :

1.9.2 - الحد من طول خط السحب (*Limiting of Suction Line Length*) :

كلما كانت المضخة اقرب إلى وعاء السحب كلما كان خط السحب اقصر وكانت فواقد الاحتكاك فيه اقل وبالتالي فإن قيمة ارتفاع السحب الموجب الصافي المتاح تكون أعلى، بمعنى إن المضخة البعيدة عن وعاء السحب، إذا لم تكن قادرة على السحب يمكن إن يتحسن أداؤها وتصبح قادرة على السحب لو نقلت إلى موقعٍ أقرب إلى الوعاء، حيث فواقد الاحتكاك في خط السحب تتناسب طرديا مع طول الخط: $(h_{fs} \propto L)$.

2.9.2 - الحد من سرعة السريان في خط السحب (*Limiting of Flow velocity in Suction Pipe*) :

سبق وان ذكرنا أن الطاقة المفقودة في خط السحب نتيجة لسرعة السائل تعتمد على تدفق السائل في الخط وحيث:

$$h_{vs} = - (v_s^2 / 2g) \quad (10)$$

و حيث إن سرعة التدفق تعتمد على مساحة مقطع خط السحب أو بعبارة أخرى قطر خط السحب، حيث تتناسب السرعة مع مربع قطر الأنبوب عند ثبات معدل التدفق أي أن:

$$v_s \propto (1/d_s^2) \quad (11)$$

وبعبارة أخرى يمكن القول:

$$v_s^2 \propto (1/d_s^4) \quad (12)$$

وحيث إن $h_{vs} \propto (v_s^2)$ فان:

$$h_{vs} \propto (1/d_s^4) \quad (13)$$

وذلك مع ازدياد قطر خط السحب و ثبات طولته والعوامل الأخرى فإن :

$$h_{fs} \propto (1/d_s^5) \quad (14)$$

$$(h_{fs} 6'' / h_{fs} 4'') = (4^5/6^5) = 0.13$$

حيث يتضح مما ذكر أعلاه أن زيادة قطر خط السحب يقلل كثيراً من الفوائد في خط السحب، و بالتالي يرفع قيمة ارتفاع السحب الموجب الصافي المتاح.

10.2- زيادة الارتفاع الاستاتيكي (S_h) Static Suction Head Increase):

إن من أهم العوامل التي يجب أن تؤخذ في الاعتبار في ظاهرة التكهف، هو الارتفاع الاستاتيكي للسائل فوق مستوى محور المضخة، فإذا كانت قيمته أقل من قيمة مجموع الفوائد في خط السحب فان قيمة ($N.P.S.H$) تصبح سالبة في هذه الحالة، وعليه إذا أردنا أن تعمل المضخة بشكل جيد على السعة ($Capacity$) المطلوبة فانه قد يتحتم علينا أن نقوم بتقريب مكان المضخة أو تخفيض مستواها كما ذكر آنفاً، حتى نحصل على القيمة المطلوبة لـ ($N.P.S.H$). ويمكن في بعض الحالات رفع مستوى السائل في وعاء السحب إلى منسوب أعلى إذا كان ذلك ممكناً عملياً وذلك لزيادة قيمة الارتفاع الاستاتيكي (S_h) إلى قيمة أعلى من مجموع الفوائد بالمقدار المطلوب لإبعاد المضخة عن حدوث التكهف. ولمنع حدوث التكهف يستخدم عامل التكهف كما يلي :

$$(N.P.S.H) = S_h - (h_{fs} + h_i + h_{vs} + h_{1p}) \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{h_a - h_v - h_s}{H} \quad (16)$$

11.2- تقليل الضغط البخاري للسائل (Liquid Vapor Pressure Reduction):

بما أن ارتفاع السحب الموجب الصافي هو في النهاية الارتفاع المقابل للفرق في الضغط بين ضغط السحب المطلق داخل المضخة والضغط البخاري للسائل لذا فانه يمكن رفع قيمة ارتفاع السحب الموجب الصافي المتاح ($Available N.P.S.H$) بواسطة تخفيض قيمة الضغط البخاري للسائل.

وحيث إن الضغط البخاري للسائل يتوقف على درجة حرارته لذا العمل على تخفيض درجة حرارة السائل الداخل إلى المضخة لتخفيض الضغط البخاري وبالتالي رفع قيمة (N.P.S.H).

12.2- تأثير نوع السائل ودرجة حرارته على ارتفاع السحب الموجب الصافي المطلوب [6,5] : (Effect of Liquid Type and Temperature on Required NPSH)

إن الحجم النوعي لبخار الماء يقل كثيرا مع ارتفاع درجة الحرارة (حوالي 75 l/gm عند درجة حرارة 15 °C درجة مئوية، ويقل إلى حوالي 1.6 l/gm عند درجة حرارة 100 °C)، وهذا يعني أنه كلما ارتفعت درجة حرارة الماء الذي تدفعه المضخة كلما كانت هذه الإخطار التي تنتج من حدوث التكيف أقل.

13.2 - اقل ضغط في المضخة (The Minimum Pressure in the Pump) [6,5]:

لقد وُجدت مناطق للتآكل في مراوح عملت تحت ظروف التكيف واقعة داخل مجاري المروحة نفسها مما يؤكد وجود ضغط سالب أكبر مما عليه عند شفة السحب داخل المروحة، وذلك نتيجة لزيادة السرعة النسبية عند مدخل الريشة على وجهها الخلفي عن السرعة النسبية قبل المروحة مباشرة حيث يقل الضغط عما هو موجود عليه عند المدخل.

14.2 - مقارنة أوضاع المضخات بالنسبة لسطح الخزان السفلي [4]:

(Comparison of Pumps Positions with the lower reservoir surface)

إن المضخات التي تدور بسرعة منخفضة يمكن أن توضع في مستوى أعلى بالنسبة لسطح الخزان السفلي من مثيلتها التي تدور بسرعة عالية.

3- التجربة العملية لظاهرة التكيف باستخدام مقياس فنشوري:

1.3 - وصف المعمل:

لقد تم اختيار معمل ميكانيكا الموائع المتواجد بكلية التقنية الهندسية - جنزور وذلك لإجراء التجارب العملية الخاصة باختبار ظاهرة التكيف في مقياس فنشوري الذي يحاكي نفس الظاهرة بالمضخات الطاردة المركزية. حيث تتوفر في المعمل مجموعة من المضخات الطاردة المركزية وأجهزة قياس ضغط الطرد وضغط السحب وأنباب مدرجة لقراءة كميات ومعدلات التدفق وعدادات لقراءة العزوم والسرعات وغيرها من الأجهزة الأخرى. انظر الشكلين 3،4



الشكل (3) - جهاز فنشوري



الشكل (4) - أنبوب فنشوري

2.3- نتائج التجارب العملية:

1.2.3 - نتائج التجربة عند درجة حرارة 17 °C في سائل الماء:

جدول (1) - ماء بارد فقط عند درجة حرارة 17 °C

Q (m^3/s) * 10^{-4}	P (Pa) * 10^4	t (s)	U (m^3)	$P/ρg$ (m)	V (m/s)	$h_{2,3}$ (m)
5.5	2.452	20	0.011	2.5	2.735	0.381
6.94	4.905	15	0.010	5	3.452	0.607
8.33	6.867	10	0.008	7	4.144	0.875
10	9.81	5	0.005	10	4.975	1.261
11	10.791	2	0.002	11	5.472	1.526

2.2.3- نتائج التجربة عند درجة حرارة 17 °C في محلول ملحي بتركيز 1 %:

جدول (2) - محلول ملحي بتركيز 1% عند درجة حرارة 17 °C

Q (m ³ /s)* 10 ⁻¹	P (Pa)* 10 ¹	t (s)	U (liter)	p/ρg (m)	V (m/s)	V ² /2g (m)
2.63	1	19	5	10.1	1.6567	0.1399
4.545	1.04	11	5	10.6	2.863	0.4178
5.56	1.11	9	5	11.3	3.5023	0.6252
6.002	1.28	8.33	5	12.72	3.7807	0.7285
6.25	1.4	8	5	14.029	3.937	0.79

3.2.3 - نتائج التجربة عند درجة حرارة 50 °C:

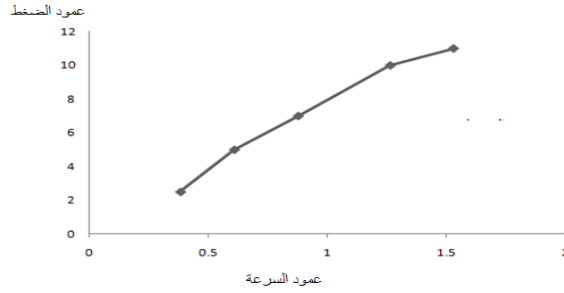
جدول (3) - ماء ساخن عند درجة حرارة 50 °C

Q (m ³ /s)* 10 ⁻¹	P (Pa)* 10 ¹	t (s)	U (m ³)	p/ρg (m)	V (m/s)	V ² /2g (m)
3.5	1	23	0.008	10.297	1.7407	0.1544
4.545	1.04	16	0.007	10.71	2.2604	0.2604
5.56	1.15	12	0.006	11.841	2.7653	0.3900
6.25	1.34	8	0.005	13.797	3.1085	0.4924
6.25	1.45	7	0.004	14.621	3.1085	0.4924

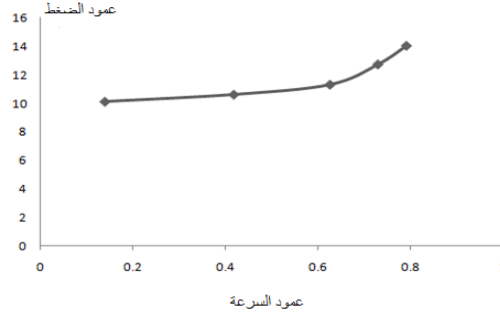
4.2.3- نتائج التجربة عند درجة حرارة 50 °C، في محلول ملحي بتركيز 1 %:

جدول (4) - محلول ملحي بتركيز 1% عند درجة حرارة 50 °C

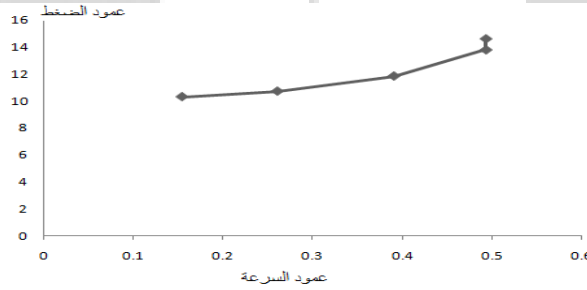
Q (m ³ /s)* 10 ⁻¹	P (Pa)* 10 ²	t (s)	U (liter)	p/ρg (m)	V (m/s)	V ² /2g (m)
2.27	1	22	5	10.194	1.4299	0.1042
4.413	1.04	11	5	10.602	2.7798	0.3938
5.263	1.17	9	5	11.927	3.3153	0.5602
6.25	1.32	8	5	13.456	3.937	0.79
6.67	1.44	7	5	14.679	4.2016	0.8997



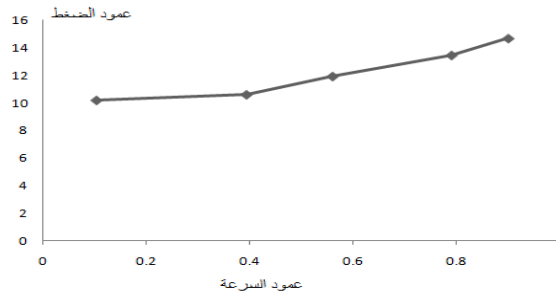
الشكل (5) - علاقة عمود الضغط وعمود السرعة عند بداية مقياس فنشوري للماء عند 17°C



الشكل (6) - علاقة عمود الضغط وعمود السرعة عند بداية مقياس فنشوري لمحلول ملحي عند 17°C



الشكل (7) - علاقة عمود الضغط وعمود السرعة عند بداية مقياس فنشوري للماء عند 50°C



الشكل (8) - علاقة عمود الضغط وعمود السرعة عند بداية مقياس فنشوري لمحلول ملحي عند درجة 50°C

4 - الخلاصة:

من خلال نتائج التجربة الموضحة في الجداول والأشكال السابقة، فإنه يمكن الوصول إلى الاستنتاجات التالية:

- 1- أن نوع السائل ودرجة حرارته يؤثران على إمكانية حدوث التكهف، حيث في درجات الحرارة العادية يكون تأثير التكهف أكبر من تأثيره في درجات الحرارة العالية على المضخة، كما أنه في حالة الماء تكون إمكانية حدوث التكهف أكبر من إمكانية حدوثه في أي سائل غير الماء. وهذا يعني أن الحجم النوعي لبخار الماء كبير جداً بالمقارنة مع السوائل الأخرى؛ إذ أن من المعروف أن الحجم النوعي للماء يقل كثيراً مع ارتفاع درجة الحرارة وهذا يعني أنه كلما ارتفعت درجة حرارة الماء الذي تدفعه المضخة كلما كانت الأخطار التي تنتج من حدوث التكهف أقل؛
- 2- إن ظاهرة التكهف ظاهرة خطيرة جداً وهي تحدث عندما لا يملأ السائل الفراغ المخصص له في المضخة بشكل كامل فيؤدي ذلك إلى تشكل فجوات هوائية في السائل وخطيرة جداً على الأجزاء الداخلية للمضخة؛
- 3- بسبب انخفاض الضغط والانتقال إلى حالة البخار للسائل وتكون الفقاعات ومن ثم انفجارها في منطقة الضغط المرتفع فإن هذا الانفجار يسبب في اهتزاز دفاعة المضخة وعدم توازنها وبالتالي تأثيرها سلباً على عمود الإدارة وكراسي التحميل وجلبة العمود، ومن ثم على القارنة؛
- 4- ظاهرة التكهف من الظواهر التي يصعب تقاديرها في الآلات الدوارة وذلك لأن ظروف التشغيل المطلوبة قد تتطلب سرعة سريان عالية في خطوط السريان أثناء فتح وغلق صمامات التحكم وعلى جانب السحب في المضخة؛
- 5- تسبب ظاهرة التكهف في حدوث انخفاض ملحوظ ومفاجئ في معدل التدفق للمضخة؛
- 6- إن حدوث التكهف يؤدي إلى حدوث تآكل كيميائي (Corrosion) للأجزاء الداخلية للمضخة بسبب تبخر السائل وما يخلفه من أملاح مترسبة على الجدار، هذا إلى جانب التآكل الميكانيكي (Erosion) في الأجزاء المذكورة آنفاً؛
- 7- ضغط السحب عند فتحة السحب للمضخة له دور كبير في حدوث ظاهرة التكهف.

5- التوصيات :

- 1- للحد من ظاهرة التكهف يجب المحافظة على ضغط السحب بحيث يكون أعلى من ضغط التشبع للسائل حتى لا يتبخر السائل عند درجة حرارة الجو المحيط مكونا الفقاعات المسببة لهذه الظاهرة وذلك بتقليل عدد التركيبات عند خط المدخل إلى الحد الأدنى، والحد من طول خط السحب، فكلما كانت المضخة أقرب إلى وعاء السحب كلما كانت فواقد الاحتكاك فيه أقل، واحتمالية انخفاض ضغط السحب عن ضغط التشبع؛
- 2- زيادة الارتفاع الاستاتيكي للسائل فوق محور مستوي المضخة؛
- 3- الحد من سرعة السريان في خط السحب وهذا يتم بزيادة قطر خط السحب مما يقلل كثيراً من الفواقد في خط السحب؛
- 4- من المستحسن تصنيع أجزاء المضخة المعرضة لآثار التكهف من مواد مقاومة للصدأ وللتآكل.

5- تجنب الانخفاض الكبير في درجة حرارة السائل المراد ضخه.

الرموز :

Q - معدل التدفق الحجمي للسائل (m^3/s).

P - ضغط السائل (Pa).

t - الزمن (s).

v - حجم السائل ($Liter$).

P - ضغط السائل (Pa).

V - سرعة سريان السائل (m/s).

V_s - سرعة سريان السائل في خط السحب (m/s).

g - عجلة الجاذبية الأرضية (m/s^2).

h_{lp} - الطاقة المفقودة داخل المضخة (W).

γ - الوزن النوعي للسائل (N/m^3).

d_s - القطر الداخلي لخط السحب (m).

h_s - السحب السفلي والذي يحتوي علي الاحتكاك (m).

$h_a - h_v$ - السحب الكلي (m).

المراجع :

مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

- (1)- كتاب تصميم مضخات الطرد المركزي، الدكتور عماد توما، دمشق، 2014.
- (2)- تكنولوجيا المضخات، الدكتور تحسين الهاشمي، 2015.
- (3)- المضخات وصمامات التحكم الهيدروليكية، الدكتور إبراهيم الناظر، دار الإيمان - دمشق 2000.
- (4)- هندسة المضخات، محمود ربيع الملط، كلية الهندسة - جامعة القاهرة، 2000.
- (5) - Fluid Power with Application, Anthony Esposito prentice - Hallk inc. New jersey .1994.
- (6)- Fluid Mechanics,3rd, Douglas.j.f., Gsiorek j.m. and Swasfield j.a. - longman ,U.K, 1998.