مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الهندسية المجلد (22) العدد (9) 2000
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (22) No (9) 2000

حساب الصدمة الهيدروليكية عند توقف مفاجئ لعمل المضخات في شبكات المياه

الدكتور سامي قدسية*

(قبل للنشر في 2000/4/29)

□ الملخّص □

يتضمن البحث تقديم طريقة حسابية للصدمة الهيدروليكية في محطة الضخ، عند انقطاع التيار الكهربائي عن محرك المضخة، تساعد في التوصل إلى طريقة لإنشاء منحني تغير الضاغط، أثناء حدوث الصدمة الهيدروليكية، مع بيان الشروط الضرورية، وتقديم الحلول البيانية اللازمة لمعرفة كيفية حدوث الصدمة، وتشكل فقاعات، وانفصال عمود الماء داخل أنبوب الضخ، لتزويد محطة الضخ بوسائل الحماية المناسبة.

*أستاذ في قسم هندسة القوى الميكانيكية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (22) العدد (9) 2000
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (22) No (9) 2000

CALCULATION OF THE WATER HAMMER AT WHEN STATION PUMPS SUDDENLY STOP

Dr. Sami KOUDSIE*

(Accepted 29/4/2000)

❐ ABSTRACT ❐

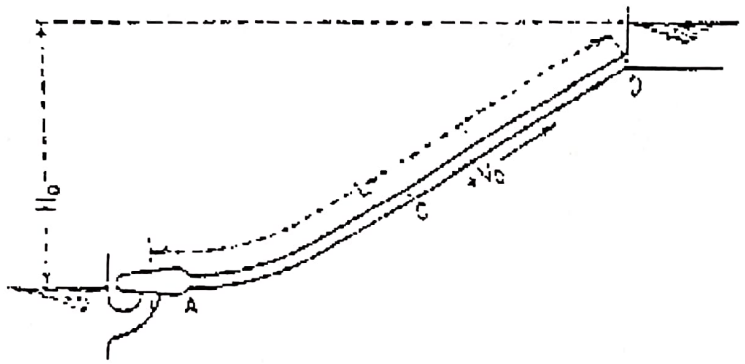
This work presents an arithmetic method for the water hammer in the pumping station in the case of electric – current cut-off. It helps in finding a curve between the pressure change during the water hammer and the necessary conditions. This also will help to find a solution for providing that pumping station with the suitable conditions and to avoid the bubble formation and the water column separation effect inside the pipe network.

* Professor at the Department of Mechanical Power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

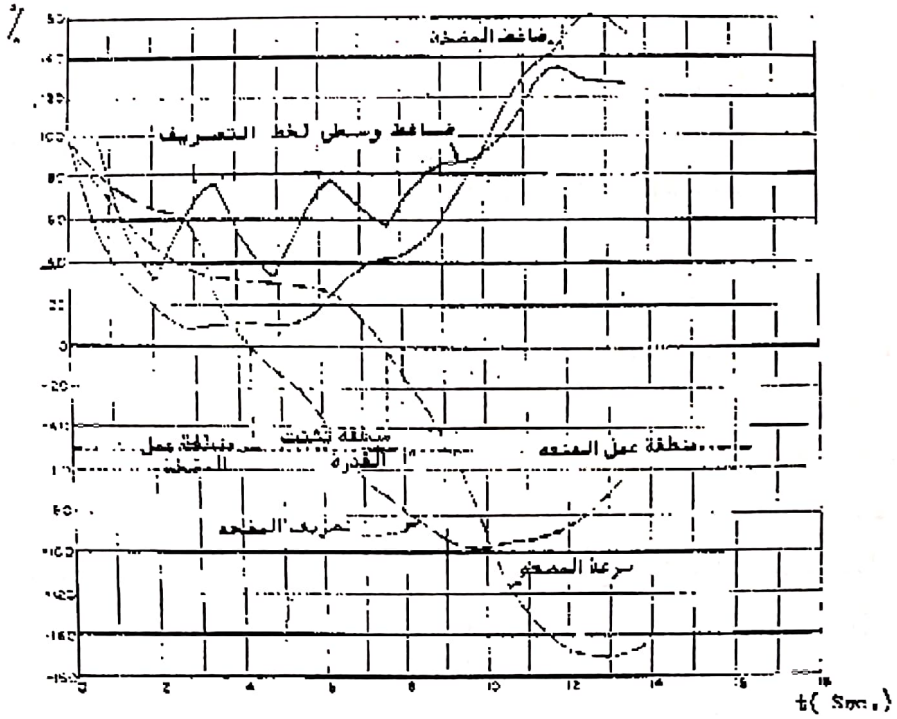
تعتبر الصدمة الهيدروليكية من المشكلات الكبيرة التي تتعرض لها محطات الضخ، وهي تظهر نتيجة للتغير المفاجئ في سرعة حركة الماء، مما يؤدي إلى تغير كبير في الضغط داخل خطوط الضخ (شبكة الأنابيب). وهذا يمكن أن يحدث عند انقطاع التيار الكهربائي عن محرك المضخة ليتسبب في إبطاء سريع لعمل المضخة.

عندما ينقطع التيار الكهربائي فجأة عن محرك المضخة، فإن الطاقة الوحيدة التي تبقى لتشغيل المضخة في الاتجاه الإيجابي، هي: الطاقة الحركية للعناصر الدوارة للمحرك، والمضخة، والماء المحبوس في المضخة، وباعتبار أن الطاقة المتبقية صغيرة عادة إذا ما قورنت بالطاقة الضرورية لتأمين الجريان ضد ضاغط التصريف، فإن سرعة المضخة تتباطأ بسرعة كبيرة، ومع تناقص سرعة المضخة يقل تدفق الماء في خط الضخ أيضاً مما يؤدي إلى حدوث موجات صدم مائية ذات ضغط غير عادي، في خط الضخ عند المضخة. تتحرك هذه الموجات بسرعة -صعوداً- حتى مخرج خط الضخ، حيث يحدث ارتداد لها، وفوراً يصل انخفاض السرعة إلى المضخة، لدرجة عدم إمكانية دفع الماء ضد الضاغط الموجود (شكل 1).



شكل (1): يبين محطة الضخ مع أنبوب الضخ والضاغط.

في حال عدم وجود صمام عدم رجوع (صمام تحكمي) عند المضخة، فإن الجريان خلال المضخة ينعكس، بالرغم من أن المضخة يمكن أن تكون لا تزال شغالة بالاتجاه الإيجابي للضخ، مما يزيد في خفض السرعة إلى الصفر. بعد فترة ستعمل المضخة كعنفة تصل سرعتها إلى سرعة الإقلاع بالاتجاه المعاكس، وعند الوصول مباشرة إلى هذه السرعة، فإن الجريان العكسي عبر المضخة يقل بسرعة، وهذا الانخفاض في سرعة الجريان يؤدي إلى ارتفاع الضغط عند المضخة، وعلى طول خط الضخ (شكل 2).



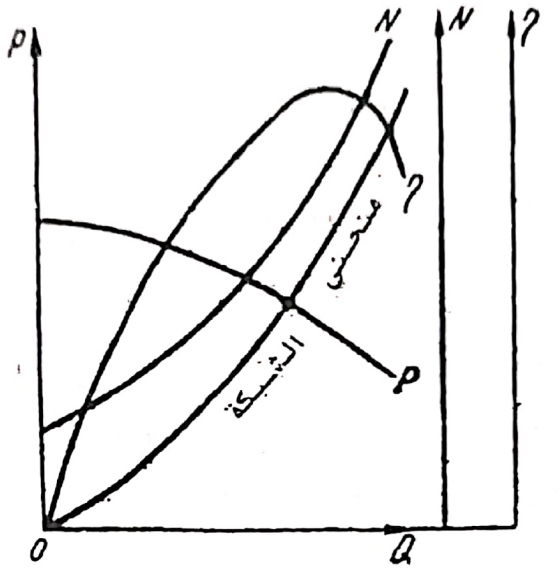
شكل (2): يبين تغير نظام عمل محطة الضخ عند انقطاع التيار الكهربائي.

توجد ثلاثة عوامل يجب الأخذ بها لدى تحديد الشروط الهيدروليكية الانتقالية عند المضخة وفي خط الضخ (الشبكة) بسبب انقطاع التيار الكهربائي وهي:

1) المضخة وعطالة المحرك،
2) مميزات المضخة،
3) ظاهرة الصدمة الهيدروليكية في خط الضخ.

نحصل على تأثير –العامل الأول– المضخة وعطالة المحرك، من معادلة العطالة التي تحدد العلاقة بين سرعة المضخة وعزم الفتل عند أي زمن، بدلالة الطاقة الحركية للعناصر الدوارة.

يمكن الحصول على مميزات المضخة وأثرها –العامل الثاني– من مخططات الخطوط المميزة الكاملة[1] لها (شكل 3)، التي تساعد في تحديد تغير السرعة، وعزم الفتل، مع تغير الضاغط والتصريف خلال كامل فترة تشغيل المضخة والعنفة، أما تأثير الصدمة الهيدروليكية –العامل الثالث– فيتحدد من معادلات الصدمة الهيدروليكية[2]، التي تبين العلاقة بين الضاغط والجريان في خط الضخ، خلال الشروط الانتقالية للتدفق تحت تأثير موجات الصدمة الهيدروليكية.



شكل (3): يبين المنحنيات المميزة الكاملة للمضخة مع الشبكة.

من أجل تحديد قيمة الضغط كأساس لحساب الصدمة الهيدروليكية، وحساب شروط عمل شبكة أنابيب الضخ، يلجأ إلى النظرية المقترحة من قبل جوكوفسكي، الذي لاحظ أن تغير الضاغط ΔH مرتبط بتغير سرعة حركة الماء ΔV في أنابيب الشبكة، التي يتم حسابها بالمعادلة التالية:

$$\Delta H = -a.\Delta V / g \qquad (1)$$

حيث: g: تسارع الجاذبية الأرضية.

a: سرعة انتشار موجة الضغط عند جريان الماء في الأنابيب.

في حالة عدم وجود مقاومات (معيقات) عند أماكن وصل أنابيب الشبكة، يمكن حساب سرعة انتشار الموجة a بالعلاقة التالية:

$$a = \sqrt{\frac{E_\ell}{\rho}.\left[\frac{1+C.D.E_\ell}{\delta.E_T}\right]} \qquad (2)$$

حيث: E_ℓ: عامل مرونة الماء.

E_T: عامل مرونة مادة جدار الأنبوب المستعمل.

ρ: كثافة الماء.

C: عامل طريقة وصل الأنابيب.

D: القطر الداخلي لأنبوب الضخ.

δ: سماكة جدار أنبوب الضخ.

من المعروف أنه عند حدوث الصدمة الهيدروليكية، يحدث انتشار لأمواج تغير الضغط، يرافقه تغير في سرعة حركة الماء، وهذا يؤدي إلى ظهور تأثير مشوش ينطلق في المنبع (الخزان) بسرعة a يدعى بالتأثير المشوش المباشر، لذلك عند اقتراب الموجات المباشرة من الخزان أو أماكن سحب المياه، فإن هذه الموجات تنتشر بالاتجاه المعاكس لحركة الأمواج المباشرة، لتصل بعد فترة زمنية إلى نفس مكان نشوء الأمواج المباشرة (الصمام أو المضخة)[3].

يدعى الزمن الذي تستغرقه الموجة المنعكسة إلى مصدر التشويش، على شكل موجة منعكسة، بمرحلة، أو طور الصدمة، ويرمز له t_ϕ، ويحسب كالتالي:

$$t_\phi = 2L/a \qquad (3)$$

حيث L: طول أنبوب الضخ.

أما الصدمة الهيدروليكية الحاصلة عند عدم توافر إمكانية وصول الموجة المنعكسة إلى المضخة قبل لحظة توقفها، فتدعى بالصدمة المباشرة، عندما:

$$t_\phi \rangle T_z \qquad (4)$$

حيث T_z: زمن الإغلاق الكامل للصمام.

لإيجاد العلاقة بين المؤشرات المتعلقة بحساب الصدمة الهيدروليكية، عند انقطاع التيار الكهربائي عن محرك المضخة، يلجأ إلى الصفة Q-H عند عدد دورات مختلف، فإذا تم التعبير عن ضاغط المضخة بالمعادلة التالية:

$$H = \beta^2 . h_n - S_\rho . Q^2 \qquad (5)$$

حيث β: عدد الدورات النسبية n/n_0 في اللحظة الزمنية المعتبرة.

S_ρ , h_n: قيم عوامل مقاومة المضخات ذات نماذج تصميمية مختلفة.

فإن قيم الإحداثيات العينية للصفة Q-H، عند عدد دورات $n > n_0$، تصبح أقل من قيم الإحداثيات العينية للصفة Q-H_0 عند عدد الدورات n_0، وبالتالي التغير في قيمة الضاغط، تعطى بالمعادلة التالية:

$$\Delta H = h_n\left(1-\beta^2\right) \qquad (6)$$

يمكن التعبير عن العلاقة بين تغير الضاغط ΔH وتغير غزارة المضخة ΔQ بالمعادلة التالية:

$$\Delta H = a.m.\Delta Q/(g.K.W) \qquad (7)$$

حيث m: عدد المضخات العاملة في آن واحد.

K: عدد الأنابيب المتصلة بالمضخات.

W: مساحة مقطع أنبوب الضخ.

لحساب عدد الدورات الحاصلة في المضخة، منذ لحظة إيقافها حتى وصول الموجة المنعكسة إلى المضخة[4] نلجأ إلى المعادلة التالية:

$$t/T_a = \frac{1+c}{\sqrt{c}}\left[arctg\sqrt{N_m/c} - arctg\left(\beta/\sqrt{c}\right)\right] \qquad (8)$$

حيث t: الزمن الجاري منذ لحظة وقوف المضخة.

T_a: زمن تسارع المجموعة المائية (مضخة + محرك).

c: القيمة الوسطية لنسبة العزم المصروف للتغلب على المقاومات في المضخة، إلى العزم اللازم لتشغيل المجموعة المائية عند عدد دورات موافق لشروط عمل طبيعية وتؤخذ c = 0.01-0.02.

N_m: نسبة استطاعة المضخة عند عدد دورات n_0، إلى الاستطاعة عند نقطة التشغيل المناسبة لعمل المضخة.

لإيجاد زمن تسارع عمل المجموعة المائية يلجأ إلى المعادلة التالية:

$$Ta = \pi.GD^2.n_0/(120.g.M_0)$$
$$\approx 2.75.10^{-6}.GD^2.n_0^2/N_0 \quad (9)$$

حيث N_0: استطاعة المضخة عند نقطة تشغيلها.

GD^2: العزم الموازن للمجموعة المائية وفق قيم مسموح بها، تساوي العزم الموازن للمحرك الكهربائي $(N.m^2)$.

M_0: عزم المضخة عند شروط عمل طبيعية.

أما قيمة عزم الفتل على العناصر الدوارة المرتبط بفتل المضخة عند انقطاع التيار الكهربائي، فيحسب من معادلة العطالة التالية:

$$M = \pi.GD^2/60.g(n_1 - n_2).\Delta t \quad (10)$$

حيث $\Delta t=t_2-t_1$: مرحلة زمنية قصيرة.

n_1 , n_2: عدد الدورات عند اللحظات t_1 , t_2.

لأخذ قيم β ضمن المجال المطلوب 0.05–1 وبالدقة الكافية، يفضل عوضاً عن استخدام المعادلة (8) استخدام المعادلة التالية:

$$\beta = Ta/(Ta + N_m.t) \quad (11)$$

ومنه:

$$t/Ta = (1-\beta)/(\beta.N_m) \quad (12)$$

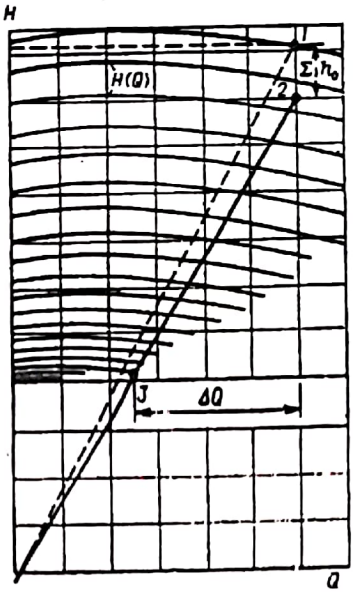
فإذا انتقلت نقطة تشغيل المضخة نتيجة لحصول الصدمة الهيدروليكية وفق منحني تناسبي، فإن قيمة N تصبح مساوية الواحد، أي $N=1$.

في حالة أن $Ta<0.5\Delta t$ فإن دولاب المضخة خلال الفترة الزمنية Δt يتوقف عن الدوران، مع إمكانية دوران دوارة المضخة بالاتجاه المعاكس.

يمكن حساب تغيرات الضاغط بالنسبة للزمن خلال المرحلة الأولى للصدمة الهيدروليكية (قبل وصول الموجة المنعكسة وتغير الضغط)، وفق التتابع التالي[5]:

1- يلجأ لإنشاء المنحني المميز للصفة Q-H للمضخة عند عدد دورات مختلفة، ومن ثم يعمل على تحديد نقطة تشغيل المضخة على المنحني، فتكون إحداثياتها Q_0 , H_0.

2- يتم حساب قيم فواقد الضاغط h_0 في الأنبوب، والتي تحدث بشكل شرطي عند جهاز قياس الضغط، الذي يركب عند بداية الأنبوب، والذي بواسطته تتحدد النقطة 2 المعبرة عن قيمة الضاغط الستاتيكي H_{st} (الشكل 4).



الشكل (4): يبين حساب انخفاض الضاغط نتيجة لانخفاض عدد دورات المضخة.

إن مكان وجود النقطة 2 يكون –عادة– أسفل نقطة تشغيل المضخة بمقدار $h_0 = H_0 - H_{st}$.

3– يلجأ إلى تحديد النقطة 3 الموافقة للغزارة Q_3 وفق محور السينات من الصفة Q-H للمضخة، والتي تتحدد بالمعادلة التالية:

$$Q = Q_0 - g.K.W.H_{st}/a.m \qquad (13)$$

حيث قيمة الضاغط عند النقطة 3 أخفض من قيمتها وفق المعادلة (7).

4– يلجأ إلى حساب قيمة فاقد الضاغط h_1 في الأنبوب عند غزارة أقل من Q_0 وفق المعادلة:

$$h_1 = (1 - \Delta Q/Q_0)^2 . h_0 \qquad (14)$$

بعد ذلك يلجأ إلى إنشاء منحني تغير ضاغط المضخة (الخط المنقط في الشكل 4). تقاطع منحني تغير ضاغط المضخة مع المنحني المميز للمضخة Q-H، يحدد نقطة تشغيل المضخة عند عدد دورات مختلف.

عوضاً عن اللجوء إلى طريقة إنشاء المنحنيات وفق البنود 1–4، يمكن اللجوء إلى علاقة تغير الضاغط في الأنبوب بعدد دورات المضخة، التي يعبر عنها من خلال شروط المعادلة (5) بالمعادلة التالية:

$$h_n.\beta^2 = H_{st} + S.Q^2 - \frac{a.m}{g.K.W}(Q_0 - Q) \approx$$

$$\approx H - S_H\left[Q_3 + \frac{a.m}{g.K.W}\cdot\left(\frac{H_{st}.H}{H_{st}+h_0}\right)^2\right] \qquad (15)$$

حيث يمكن اعتبار $S = S_H + S_B$

S_B: معامل مقاومة الأنبوب.

5– يمكن وفق المعادلة (12) تحديد زمن انخفاض عدد دورات المضخة، حتى القيمة الموافقة للضاغط عند بداية الأنبوب، وعلى هذا الأساس يتم إنشاء منحني تغير الضاغط المتزايد مع الزمن[6].

انطلاقاً من معطيات المنحني المنشأ وفق طول الأنبوب، يلجأ إلى إنشاء منحني الضواغط الدنيا، الذي يحدد قيمة الضاغط في كل نقطة، منذ لحظة وصول موجات الضغط المرتفع المنعكسة، حيث وصول هذه الموجة يتم في اللحظة:

$$t = (2L - X)/a \qquad (16)$$

حيث X: المسافة من محطة الضخ حتى النقطة المدروسة.

لتحديد القيم الدنيا للضغوط الانتقالية عند مختلف نقاط خط الضخ، وتحديد مثيلاتها، لفصل عمود الماء، يفضل اللجوء إلى الخطوط المميزة للمضخة التي تعطي منطقة التشغيل لعمل المضخة، والتي تكون صالحة للاستعمال عند انقطاع التيار عن محرك المضخة[6]. أضف إلى ذلك تلزمنا معرفة ميزات إضافية للمضخة، وبالأخص بعد انعكاس الجريان خلالها، وذلك لمنطقة تشتت الطاقة، حيث تعمل المضخة في الاتجاه المباشر مع الجريان، وخلال المضخة، بصورة معاكسة، إضافة إلى معلومات إضافية لمنطقة عمل العنفة، التي يكون فيها الجريان خلال المضخة ودورانها بالاتجاه المعاكس.

في حالة انخفاض الضغط الأصغري عند أية نقطة من أنبوب الضخ، إلى قيمة ضغط بخار الماء (ضغط التبخر)، فإن عمود الماء السائل داخل الأنبوب سيحتوي على فقاعات هوائية يمكن أن يشكل مجموعها حجيرات تؤدي –أحياناً– إلى انفصال عمود الماء، خلال موجات الصدمة الهيدروليكية السالبة عند النقاط المرتفعة لخط الضخ، لذلك إذا لم تؤخذ عطالة مجموعة الضخ، فإن احتمالية انقطاع استمرارية جريان السائل يمكن تحديدها بمقارنة قيم الضاغط التخلخلي h_v الحاصلة في أعلى نقطة من الأنبوب، أثناء دخول الماء فيه تحت تأثير الضغط الجوي، عند قيمة حدية أعظمية للضاغط التخلخلي $h_{v.cr}$[7] (عند شروط عمل طبيعية وفق درجة حرارة الماء 20-30°C تكون $h_{v.cr} = 8\text{-}9\ m.w$)، وبالتالي يمكن حساب h_v من المعادلة التالية:

$$h_v = Z_B + S_{0-b}[Q_0 - (H_c + Z_c)g.W/a] \qquad (17)$$

حيث Q_0: غزارة الماء عند السرعة V_0 في أنبوب مساحة مقطعه W قبل حصول الصدمة.

H_c: ارتفاع الخزان فوق محور الأنبوب المتصل به.

Z_c: ارتفاع محور الأنبوب عند وصله بالخزان عن مستوى سطح الماء في الخزان.

Z_B: ارتفاع أعلى نقطة من الأنبوب فوق مستوى السطح الحر للماء في الخزان.

$S_{0\text{-}b}$: معامل مقاومة المضخة والأنبوب من المنبع حتى النقطة المدروسة.

معامل مقاومة المضخة عند دوران دوارة المضخة S_H يمكن أخذه من[8]. يجب الإشارة هنا إلى أنه عند حركة معاكسة للماء، من خلال المضخة أو عند توقف دوارة المضخة S_T، يكون معامل مقاومة المضخة للحالة الأخيرة أكبر بثلاث مرات من S_T، لذلك إذا كانت $h_v (h_{v.cr}$ فإن خطورة انفصال عمود الماء تنعدم.

عند التوقف المفاجئ للمضخات، يلاحظ وجود ضواغط أعظمية في المرحلة الثانية للصدمة الهيدروليكية، حيث ف.م. بابين أوضح أن الصدمة الهيدروليكية يمكن حدوثها في الأنابيب الأفقية، عند تمتع المضخات العاملة بعطالة صغيرة لكتلها المتحركة، كذلك احتواء خط الضخ على نقاط ارتفاعها مكافئ لارتفاع الماء في الخزان، أو أكبر منها، يتطلب اللجوء إلى حساب إضافي للضاغط عند $t_\phi = 2L_1/a$ حيث: L_1: المسافة بين المضخة وقمة النقطة المرتفعة المدروسة.

للحصول على حل بياني لصدمة هيدروليكية في محطة ضخ، نتيجة لانقطاع التيار الكهربائي، يفضل استعمال عاملين مستقلين مع المخططات المميزة الكاملة للمضخة، وهما (e ثابت الخط، والعامل

$K_1(2L_1/a)$، وهو ثابت يتضمن تأثير عطالة المضخة، والمحـرك[9]، وزمـن رحلـة موجـة الصـدمة الهيدروليكية لخط الضخ.

النتائج:

- إن البحث ساعد في إيجاد طريقة لحساب الصدمة الهيدروليكية الناتجة من انقطاع التيار عن محطـة الضخ.
- تم التوصل إلى إنشاء منحني تغير قيم الضاغط عند حدوث الصدمة الهيدروليكية، للمساعدة في إيجاد أفضل طريقة لتحديد وسائل الحماية من الصدمة.
- إن موجات الضغط في خط الضخ يمكن حسابها بدقة، إذا عرفت المميزات الكاملة للمضـخة، ممـا يسمح بتحديد دقيق لآثار الصدمة الهيدروليكية حتى نقطة انعكاس الجريان عبـر المضـخة، وعنـد اللزوم يمكن حساب مميزات المضخة بدقة كافية لمناطق تشتت الطاقة، ولمنطقـة تشـغيل العنفـة، لمعرفة آثار الصدمة الهيدروليكية عند التوقف المفاجئ لعمل المضخة.

REFERENCES المراجع

[1]- ف.يا. كاريلين وغيره. "المضخات ومحطات الضخ" موسكو – دار البناء – 1986.

[2]- V L. Streeter "Water hammer analysis of pipelines Journal of thydraulies division. Proc. Of the ASCE Vol. 90 HY4 – July 1964.

[3]- J. Parmakian "Water hammer analysis. Prentice – Hall. Inc. New York, 1955.

[4]- أ.م. كورغانوف "مدخل في الدراسات العلمية – لينينغراد – دار البناء – 1984.

[5]- أ.م. كورغانوف "الحسابات الهيدروليكية لشبكات الري والتغذية. لينينغراد – دار البناء – 1986.

[6]- ي.أ. بريغر "تصميم شبكات أنابيب المياه ومحطات الضخ – لينينغراد – 1979.

[7]- J.A. Fox – Hydraulic analysis of unsteady flew in pipe networks. The Macmillan Press Lts, London and Basing stoke 1977.

[8]- أ.ي. بيلان وغيره "تصميم وحساب معدات أنابيب جر المياه" كييف – 1981.

[9]- د. جوني تقلا – "اختيار طريقة الحماية من المطرقة المائية في محطات الضخ" – مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – مجلد 13 العدد 3 – 1991.