

## التنبؤ بقيم الضغوط الأعظمية في الجزء الأول من خط الجر الثاني في ريف طرطوس أثناء حدوث الصدمة الهيدروليكية باستخدام حزمة برامج watercad

الدكتور غطفان عمار\*  
الدكتور عباس عبد الرحمن\*\*  
جميله محمد سلمان\*\*\*

(تاريخ الإيداع 25 / 6 / 2012. قُبل للنشر في 17 / 6 / 2012)

### □ ملخص □

تقع منطقة البحث في مدينة طرطوس، حيث يمتد الجزء الأول من خط الجر الثاني من محطة أوبين حتى محطة بارمايا بطول 3844m. يهدف هذا البحث إلى نمذجة هذا الخط بحالته المستقرة باستخدام برنامج WaterCAD V8 XM Edition، وكذلك تحديد قيم الضغوط الأعظمية الناجمة عن الصدمة الهيدروليكية عند حدوث فشل في المضخة باستخدام برنامج Bentley HAMMER V8 XM Edition، واقتراح وسائل الحماية المناسبة.

أثبتت نتائج هذه الدراسة أن الضغوط في الحالة الطبيعية مقبولة، ولا يوجد خطر على هذا الخط، إذ إن أنابيب الفونت المستخدمة تتحمل ضغط 40 بار، بينما حصلنا على أكبر ضغط عند المضخة ومقداره 26.2 بار. عند حدوث الصدمة الهيدروليكية، تصل قيمة الضغط عند صمام عدم الرجوع 47.8 بار، وهي أكبر من قدرة تحمل الأنابيب، وبالتالي يمكن أن يحدث تحطم الأنابيب والتجهيزات، الأمر الذي يترتب عليه تكاليف صيانة باهظة. لذلك يجب اتخاذ الإجراءات الكفيلة بحماية الأنابيب والتجهيزات من الأضرار التي يمكن أن تصيبها.

**الكلمات المفتاحية:** الصدمة الهيدروليكية - فشل المضخة - الضغوط الأعظمية.

\* أستاذ- قسم الهندسة المانية والري- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.  
\*\* مدرس- قسم الهندسة المانية والري- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.  
\*\*\* طالبة دراسات عليا (ماجستير)- قسم الهندسة المانية والري- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية

## Prediction Of Maximun Pressures Values In The First Part Of Second Pipe Line In Tartous Rural During Water Hammer Occurrence Using Watercad Software

Dr. Ghatn AMMAR\*  
Dr. Abbas Abdalrahman\*\*  
Jamelah Selman\*\*\*

(Received 25 / 6 / 2012. Accepted 17 / 6 / 2012)

### □ ABSTRACT □

The research area is located in Tartous City, the first part of the second pipeline starts from Aubeen station to Barmaia station. This research aims to model this line at its steady state by Bentley watercad program, and determine the maximum pressures values resulting from water hammer when pump failure happens, using Bentley water hammer program, and suggesting suitable protection equipments.

The results of the research verify that pressures at steady state are acceptable, and there is no risk to the line, where the used ductile iron pipes have pressure equal to 40 bar while the largest value of pressures we obtained is near the pump and equals 26.2 bar.

When water hammer occurs, the largest pressure value at the check valve and equals 47.8 bar, and it is larger than pipes pressure, thus pipes and equipments may collapse, and high maintenance costs may result from. So we have to take suitable procedures to protect pipes and equipments from risks they may face.

**Keywords:** Water Hammer, Pump Failure, Maximum Pressures.

---

\*Professor, Department of Water Engineering and Irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Assistant professor, Department of Water Engineering and Irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*\*Postgraduate student, Water Engineering and Irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

الصدمة الهيدروليكية هي حادثة تنجم عن التوقف المفاجئ لجريان سائل في أنبوب مضغوط، هذا التوقف المفاجئ يؤدي إلى تغير كبير في الضغط المسيطر في الأنبوب، وخاصةً في نقطة التوقف المفاجئ (سكر إغلاق أو عدم رجوع). يؤدي هذا التوقف المفاجئ أيضاً إلى تغير جهة الجريان، وتتعلق شدة الصدمة الناتجة بـ: (قطر الأنبوب - سرعة الجريان النظامي في الأنبوب - المواد العالقة في الماء - طول الأنبوب - درجة حرارة الماء - الغازات المنحلة في الماء - مرونة جدران الأنبوب ..... [1]).

وقد يكون تغير الضغط كبيراً فيسبب أضراراً كبيرةً في شبكات المياه، ومنها (انفجار الأنابيب - تسريب الوصلات - اهتزاز وضوضاء في الأنابيب - تضرر الصمامات والأنابيب - الإضرار بتدعيم الأنابيب .... إلخ). هذا وتعتبر دراسة هذه الظاهرة، والأسباب التي تؤدي إلى حدوثها، ذات أهمية بالغة بالنسبة للمهندسين المدنيين، نظراً لما تسببه من أضرار جسيمة على الناقل والمعدات، إذا تجاوزت قيم الضغوط الصغرى والعظمى الناتجة القيم التي يمكن للناقل وملحقاته تحملها [2]. ومن المعروف أن إصلاح أيٍّ من المشاكل السابقة هو أكثر كلفة من التصميم الصحيح منذ البداية، الشكل (1).



(الشكل 1) صورة تظهر حدوث تصدعات كبيرة وتحطم لصمام عدم الرجوع وذلك بسبب الضغوط الكبيرة

هذا وقد شغلت هذه الظاهرة اهتمام الباحثين منذ زمن بعيد، فدرس Jaeger ظاهرة الصدمة الهيدروليكية وآلية حدوثها، كما أنه وضع المعادلات الأساسية لها، وشرح بشكل مفصل بعض وسائل الحماية [3]. كما درس الباحثان Streeter and Wylie الجريان العابر (fluid transient)، أو ما يسمى بالصدمة الهيدروليكية بشكل مفصل، فأوضحا مفهوم هذه الظاهرة، ووضعوا المعادلات الأساسية لها، كما وقد شرحا طرائق الحل المختلفة ومنها طريقة المميزات [4]. أما Zaruba فقد تطرق إلى ظاهرة الصدمة الهيدروليكية في شبكات الأنابيب، فأوضح المفهوم الفيزيائي لها وشرح تأثير البارامترات المختلفة عليها، وعرض، كسابقيه، طرائق حسابها [5].

وفي دراسة قام بها مكتب مهندسي الجيش الأمريكي (US Army Corps of Engineering) باستخدام برنامج WHAMO 3.0، وذلك لمحطة ضخ بحيرة كلينتون. توصل الباحثون إلى تحديد قيمة الضغط الأعظمي المتوقع ومكان حدوثه، وكذلك الضغط الأصغري المتوقع ومكان حدوثه. كما أثبتت هذه الدراسة أن أنظمة توزيع السوائل، ومحطات الضخ وتوليد الطاقة يمكن أن تتخرب بشدة بواسطة الصدمة الهيدروليكية، وما ينجم عنها من ضربات واهتزازات وصددمات عنيفة نتيجة التغير المفاجئ في الضغط ضمن النظام. كما أظهرت أنه يمكن التخفيف من مشكلة الصدمة الهيدروليكية من خلال تصميم وإدارة هذه الأنظمة، إذ نقلت من التغير المفاجئ في سرعة الماء، التي تعتبر المسؤولة أو السبب في مشكلة الصدمة الهيدروليكية [6].

كذلك فقد بين كل من Karner and Simpson أهمية صمام عدم الرجوع أثناء حدوث الصدمة الهيدروليكية، وقد توصلوا إلى أن إمكانية استخدام صمام عدم الرجوع يعتمد على العديد من العوامل؛ منها التدفق البدائي في الشبكة، طول وقطر الأنبوب، المقطع الطولي للأنبوب..... إلخ، واستنتجوا أن استخدام صمام عدم الرجوع في حال توفر الشروط المناسبة لاستخدامه يكون فعالاً من الناحية الهيدروليكية والاقتصادية في السيطرة على الصدمة الهيدروليكية في خط الأنابيب [7].

كما درس كل من Begrant and Tijsseling ظاهرة الصدمة الهيدروليكية نتيجة انفصال عمود السائل في خط الأنابيب المملوء كلياً بالماء (ظاهرة التكهف)، وهذا الأمر يحدث عندما ينخفض ضغط السائل إلى ما دون ضغط التبخر، وهذا يصاحبه في بعض الأماكن المعينة كالتجاويف المغلقة، النقاط المرتفعة وأماكن تغير الميول [8].

هذا وقد قام كل من EMADI and SOLEMANI بدراسة ظاهرة الصدمة الهيدروليكية في محطة Kührang في إيران، وخط الضخ الذي ينقل المياه إلى Cheshme Morvarid لري الأراضي الزراعية فيها. تمّ نمذجة الشبكة باستخدام برنامج hammer، وأوضحوا أن موجات الضغط أو المطرقة المائية يمكن أن تحدث عند فتح، أو إغلاق الصمامات بشكل مفاجئ، أو عند الفشل المفاجئ وغير المتوقع للمضخة، وقد توصلوا من خلال هذه الدراسة إلى أن البارامترات المتنوعة كقطر الأنبوب، سماكة الأنبوب، درجة الحرارة، عزم عطالة المضخة تؤثر على ضغوط الصدمة الهيدروليكية الأعظمية [9].

### أهمية البحث وأهدافه:

تعتبر ظاهرة الصدمة الهيدروليكية من أخطر المشاكل التي تتعرض لها شبكات المياه، وخطوط الضخ، لما لها من آثار سلبية قد تكون في بعض الأحيان مدمرة، الأمر الذي يترتب عليه تكاليف صيانة باهظة. وبالرغم من كل ذلك لم يتم حتى الآن إجراء دراسة تفصيلية لظاهرة الصدمة الهيدروليكية في خطوط الجر المنفذة في محافظة طرطوس، وإنما اقتصر الأمر على استخدام بعض وسائل الحماية البسيطة، وعوامل أمان إضافية. وبالتالي فإن الهدف من البحث هو نمذجة الجزء الأول من خط الجر الثاني بحالته المستقرة، وتحديد قيم الضغوط في هذه الحالة باستخدام برنامج WaterCAD V8 XM Edition، وكذلك تحديد قيم الضغوط الناجمة عن فشل المضخة باستخدام برنامج Bentley HAMMER V8 XM Edition، واقتراح الحلول المناسبة أثناء التصميم لتفادي هذا الخطر.

## موقع منطقة البحث

تقع منطقة الدراسة في محافظة طرطوس، بين خطي العرض "35°98'87" و "36°02'24" شمال خط الاستواء، وبين خطي الطول "34°89'40" و "34°90'48" شرق خط غرينتش. يمتد خط الجر الثاني من بانياس وحتى القدموس، والغاية منه جر المياه من آبار بانياس حتى خزان القدموس الأرضي لدعم نصيب الفرد من المياه في مدينة القدموس وكافة القرى والبلدات التابعة لها، أما الجزء الذي سوف نقوم بدراسته فيمتد من محطة أوبين حتى محطة بارمايا بطول 3844 m، الشكل(2).

يمتد خط الجر الثاني من بانياس وحتى القدموس، والغاية منه جر المياه من آبار بانياس حتى خزان القدموس الأرضي، لدعم نصيب الفرد من المياه في مدينة القدموس وكافة القرى والبلدات التابعة لها. أما الجزء الذي سوف نقوم بدراسته فيمتد من محطة أوبين حتى محطة بارمايا بطول 3844 m، الشكل(2).



الشكل (2) خارطة الموقع العام لمنطقة البحث

كما يبين الشكل(3)، خارطة لمنطقة الدراسة موضحاً عليها خطوط التسوية في تلك المنطقة.





$$c_p = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \frac{d * k}{s}}} \dots \dots \dots (1)$$

تسمى هذه العلاقة علاقة أوليفي إذ:

$C_p$ : سرعة انتشار موجة الضغط (m/s).

$d$ : قطر الأنبوب (m).

$S$ : سماكة الأنبوب (m).

$K$ : عامل متغير حسب مادة الأنبوب.

كما يمكن أن تعطى سرعة موجة الضغط بدلالة مرونة الماء وكثافته بالشكل:

$$c_p = \sqrt{\frac{E_w}{\rho}} \dots \dots \dots (2)$$

إذ إن:

$E_w$ : عامل مرونة الماء ويقدر بـ  $2.07 * 10^8 \text{ kg/m.s}^2$ .

$\rho$ : الكثلة النوعية للماء بـ  $\text{kg/m}^3$  وتؤخذ تقريباً  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

$g$ : هوثابت الجاذبية ويساوي  $9.805 \text{ m/s}^2$ .

وعند الأخذ بعين الاعتبار مرونة جدار الأنبوب تصبح علاقة سرعة موجة الضغط بالشكل:

$$c_p = \frac{\sqrt{\frac{E_w}{\rho}}}{\sqrt{\frac{E_w * d}{E_R * S} + 1}} \dots \dots \dots (3)$$

$\rho$ : الكثلة النوعية للماء بـ  $\text{kg/m}^3$  وتؤخذ تقريباً  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

$E_R$ : عامل مرونة جدار الأنبوب بـ  $\text{kg/m}^3$ .

$d$ : قطر الأنبوب (m).

$S$ : سماكة الأنبوب (m).

كما يمكن حساب الضغط الأعظمي الناجم عن الصدمة الهيدروليكية من خلال علاقة جيكوفسكي [11]:

$$\Delta H = \frac{-c_p}{g * \Delta v} \dots \dots \dots (4)$$

$C_p$ : سرعة انتشار موجة الضغط (m/sec).

$\Delta v$ : التغير في سرعة الجريان ( m/sec).

$\Delta H$ : مقدار التغير في الضاغط (m).

رسمنا الجزء الأول من خط الجر الثاني على الحاسب في برنامج الرسم الهندسي (Autocad)، بمساعدة البيانات الموجودة على المخططات الورقية (أطوال الأنابيب، الأقطار، المناسيب الطبوغرافية للعقد، مناسيب الخزانات). ثم صدرنا هذه البيانات إلى بيئة (Watercad)، وهو برنامج حساب الشبكات المضغوطة الشهير الذي أنتجته شركة BENTLEY، وبعد إدخال جميع المعطيات الخاصة (بالأنابيب، العقد، المضخات، الخزانات)، وإجراء عملية حساب للشبكة، تم مقارنة السرعة والضيعات في الأنابيب، وكذلك قيم الضغوط في العقد التي حصلنا عليها من البرنامج مع تلك المحسوبة يدوياً فكانت النتائج متطابقة، وهذا يبرهن صحة عملية النمذجة الهيدروليكية .

واستخدم جهاز GPS لأخذ مناسيب العديد من النقاط التي لم نجدها على المقطع الطولي لخط الأنابيب، من أجل الحصول على أفضل محاكاة للواقع، وذلك من خلال زيارة الموقع ومتابعة الجزء الأول من خط الجر الثاني بشكل ميداني من محطة أوبين إلى محطة بارمايا. هذا بالإضافة إلى أهمية المناسيب في نمذجة الصدمة الهيدروليكية، لأن الميل يحدد السرعة التي سوف يتسارع، أو يتباطئ بها عمود الماء عند حدوث أي تغير في شروط الجريان، وبالتالي يعتبر تحديد المقطع الطولي لخط الأنابيب متطلباً مفصلاً أولاً من أجل تحضير وتجهيز أي تحليل للصدمة الهيدروليكية باستخدام Bentley hammer edition.

بعد ذلك تم تصدير ملف هذا المشروع من برنامج WaterCAD V8 XM Edition إلى برنامج Bentley HAMMER V8 XM Edition ، وهو برنامج قوي وفعال في مجال نمذجة الجريانات العابرة في شبكات المياه وخطوط الأنابيب. إذ يُمكن هذا البرنامج من إجراء نمذجة لحالات حدوث الصدمة الهيدروليكية في مأخذ الضخ والخطوط الرئيسية، كما يُمكن من اختيار ونمذجة أنواع مختلفة من تجهيزات الحماية، وذلك بحيث نتحكم ونسيطر على ضغط الصدمة الهيدروليكية، بالإضافة إلى إمكانية عرض النتائج بشكل جداول ومخططات. ومن أهم ميزات هذا البرنامج إمكانية تبادل البيانات مع العديد من البرامج الأخرى watercad, hammer7, gis.

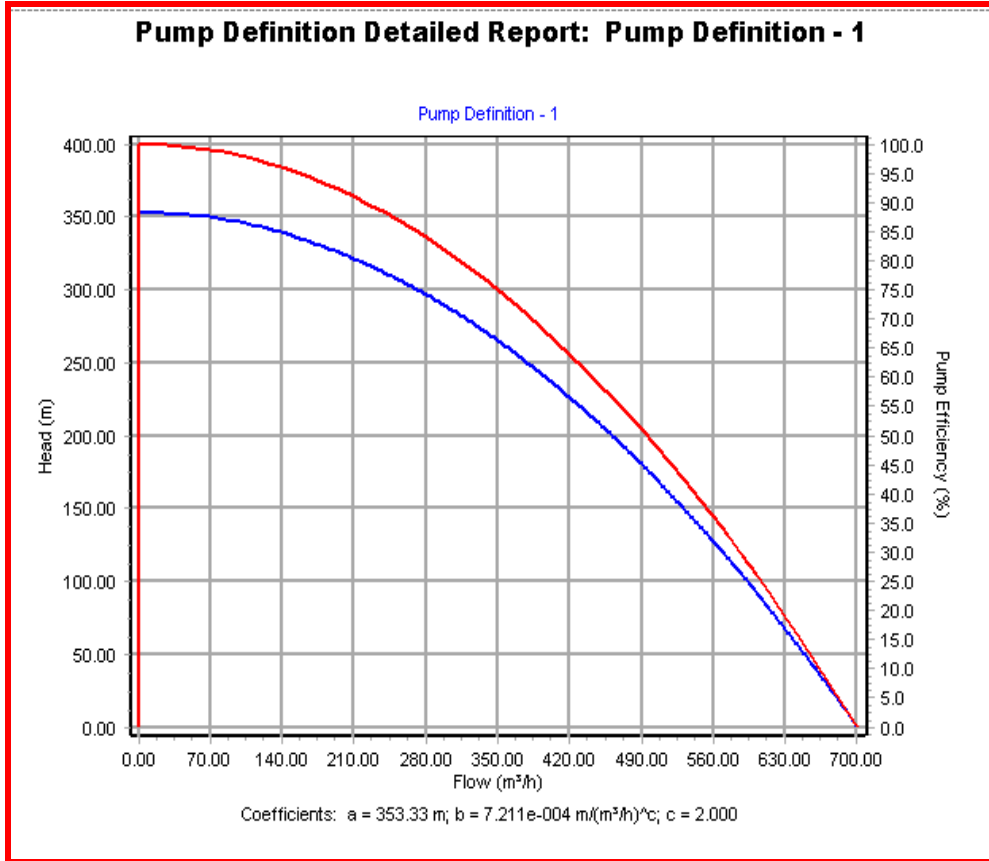
بالإضافة إلى اعتماده على طريقة المميزات، وكذلك إمكانية وضع العديد من السيناريوهات لحالات حدوث الصدمة الهيدروليكية، والعديد من سيناريوهات الحلول، الأمر الذي يوفر على العاملين في هذا المجال الكثير من الوقت والجهد. بالإضافة إلى دقة النتائج، وسهولة إدخال المعطيات، وكذلك الحصول عليها على شكل جداول أو مخططات.

#### نمذجة الخط باستخدام

حتى يستطيع هذا البرنامج أن يقوم بعملية النمذجة، يجب إدخال جميع مواصفات الأنابيب والتجهيزات. يبلغ طول هذا الخط 3844m، والأنابيب المستخدمة من الفونت المرن، قطر 300 mm ، ضغط 40 بار، منسوب محور المضخة 111.15m، فرق المنسوب بين الخزان العلوي والسفلي 230.64 m والمضخة المستخدمة ذات سرعة دوران 3000 rpm وبضاغط 265M من أجل غزارة ضخ  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ ، الشكل (4).

نقوم أيضاً بإدخال مناسيب العقد، الغزارات، ومواصفات السكورة، ثم نقوم بعملية حساب لهذا السيناريو الذي يوضح آلية عمل هذا الخط بحالته الطبيعية.





الشكل (4) المنحني المميز للمضخة

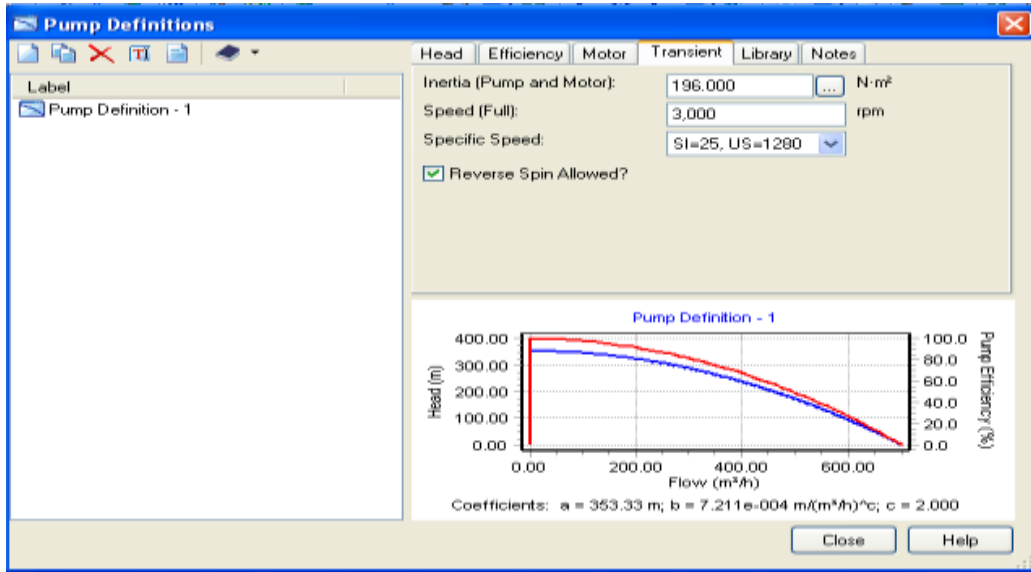
#### نمذجة الخط باستخدام

نطلق تعبير فشل المضخة (pump failure) على توقفها الطارئ عن العمل، بشكل غير المقصود، ودون وجود فرصة لتعديل وضعية إغلاق سكر تصريف المضخة، وهي الحالة التي تحدث عند انقطاع التيار الكهربائي عن محركها، أو نتيجة خطأ بشري من قبل المشغل. تكون عادة الصدمة الهيدروليكية الناجمة عن فشل المضخة شديدة، ومن أجل ذلك يجب تصميم خط الضخ ليقاوم الضغوط السالبة والموجبة الناتجة عنها [12]. من أجل نمذجة هذه الحالة باستخدام برنامج Bentley water hammer، نقوم بحساب سرعة انتشار موجة الضغط في أنابيب الفونت المرن من خلال العلاقة التالية:

$$C = \sqrt{\frac{E_L / \rho}{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E_L}{E_T}}} = \sqrt{\frac{2.07 * 10^9 / 10^3}{1 + \frac{0.3}{0.01} * 0.012}} = 1413 \text{ m/s}$$

معامل مرونة الماء  $E = 2.07 * 10^9 \text{ N/M}^2$

كما قمنا بإدخال المعطيات المتعلقة بالمضخة، الشكل (5).

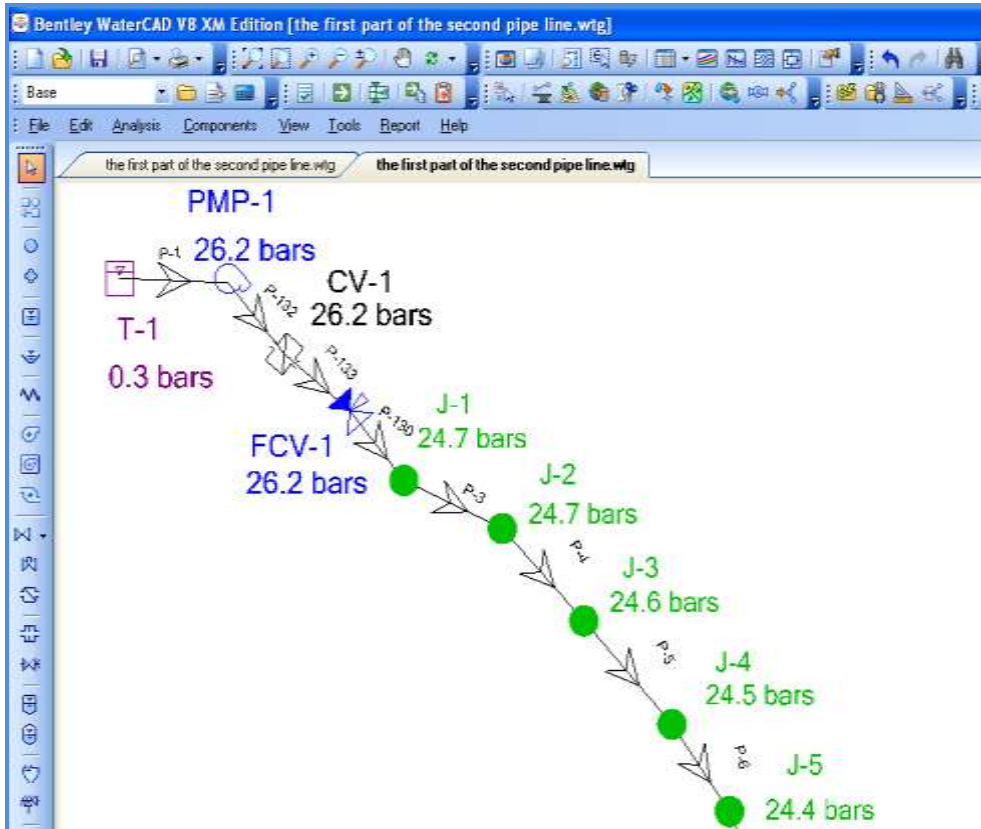


الشكل (5) البيانات اللازمة من أجل نمذجة فشل المضخة

وبفرض أن الزمن اللازم لإغلاق السكر هو 5 seconds، وحدث انقطاع مفاجئ للتيار الكهربائي؛ أي نضع valve Time for to close = 0، وبأخذ الفترة الزمنية Duration=140 seconds وأجريت حسابات لهذا السيناريو وفق هذه المعطيات.

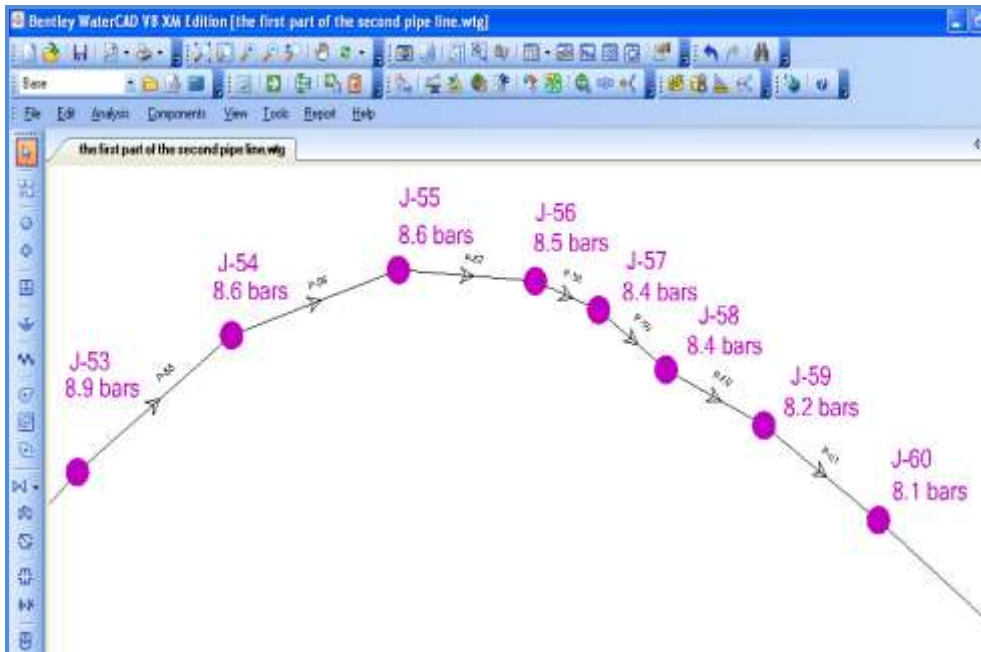
### النتائج والمناقشة:

بعد إجراء نمذجة خط الضخ باستخدام Bentley watercad من أجل الجريان المستقر، ومن أجل غزارة مقدارها  $350 \text{ m}^3/\text{h}$  وقطر 300mm ومن أجل سرعة مقداره 1.3m/sec، حصلنا على قيم الضغوط في الحالة الطبيعية لعمل خط الضخ (steady state). إذ يبين الشكل (6) قيم هذه الضغوط للجزء القريب من المضخة وكما نلاحظ، فإن أكبر قيمة هي عند المضخة وتساوي 26.2 بار ثم تتناقص كلما ابتعدنا عنها.

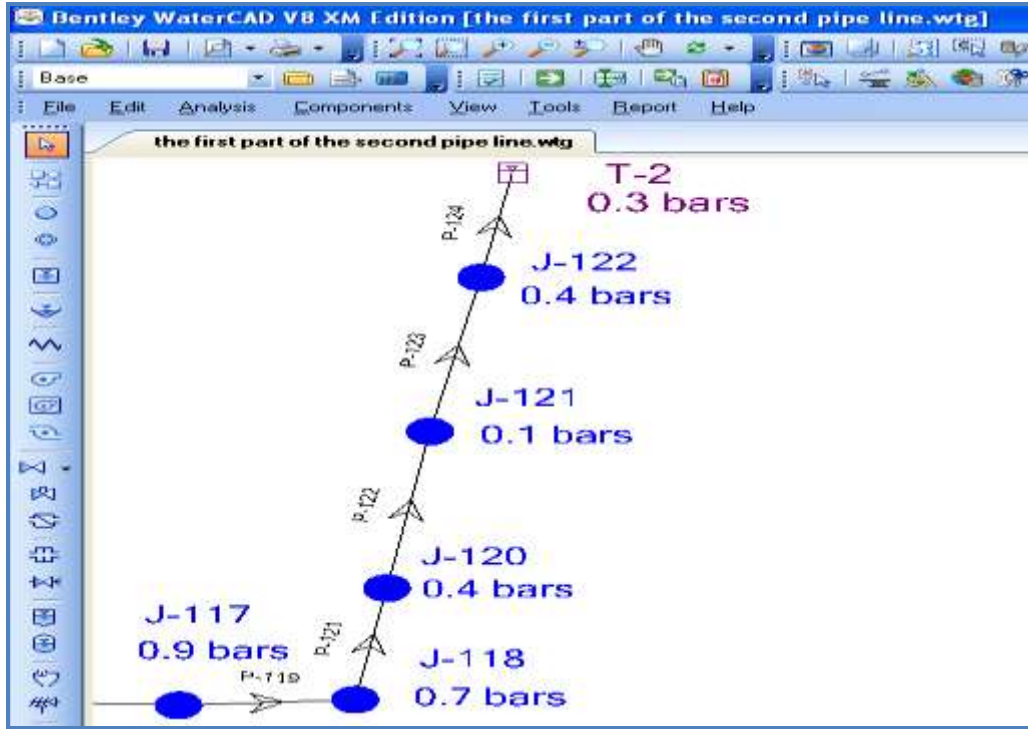


الشكل (6) تغير الضغط في خط الضخ من الخزان السفلي وحتى العقدة z-5

أما الشكل (7) فيمثل تغير الضغط في خط الضخ من العقدة z-53 وحتى العقدة z-60، إذ نلاحظ أيضاً تناقص قيم الضغط، كذلك الأمر بالنسبة للشكل (8) نلاحظ تناقص قيم الضغط ليكون أدنى قيمة له 0.3 بار في الخزان العلوي.



الشكل (7) تغير الضغط في خط الضخ من العقدة z-53 وحتى العقدة z-60

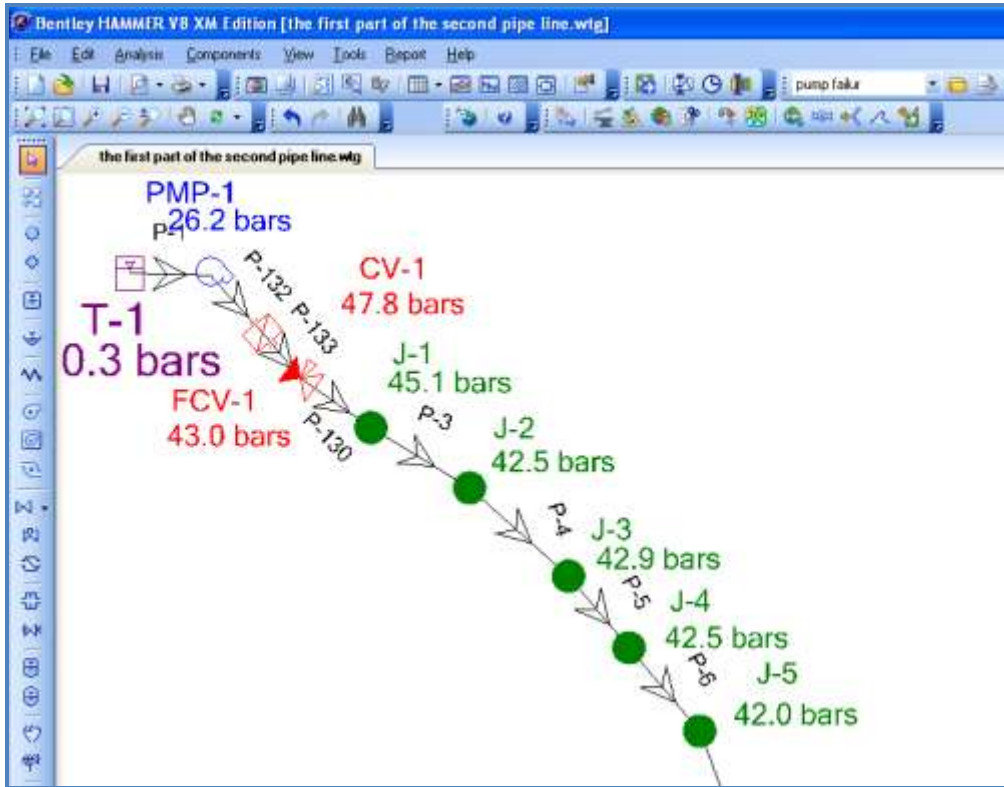


الشكل (8) تغير الضغط في خط الضخ من العقدة J-117 وحتى الخزان العلوي

نستنتج من ذلك أن هذه الضغوط مقبولة، ولا يوجد خطر على الخط، وأن أنابيب الفونت المستخدمة تتحمل ضغط 40 بار، وكما رأينا، فإن أكبر ضغط في الحالة المستقرة هو 26.2 بار.

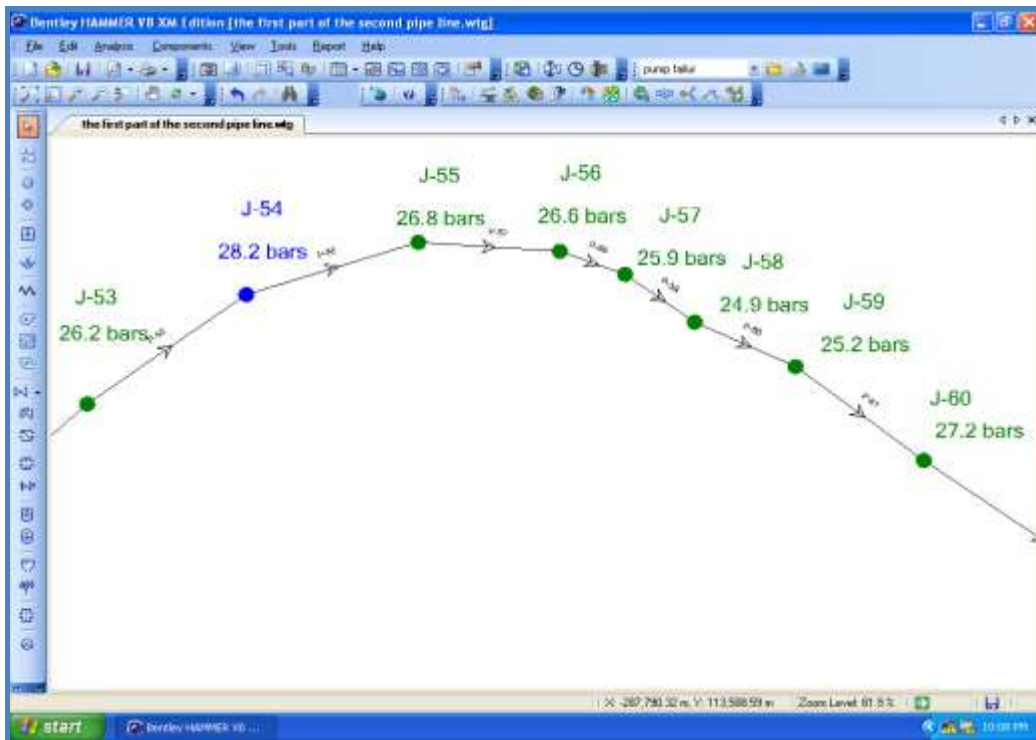
يظهر (الشكل-9) قيم الضغوط الناجمة عن الصدمة الهيدروليكية عند حدوث فشل كهربائي في المضخة وذلك، للجزء القريب من المضخة إذ نلاحظ أن أكبر قيمة للضغط هي 47.8 بار عند صمام عدم الرجوع، أما قيمة الضغط عند المضخة فبقي محافظاً على قيمته في الحالة المستقرة وهي 26.2 بار. وهذا طبيعي لأن صمام عدم الرجوع يسمح للماء بالمرور باتجاهه، ويمنعه من المرور بالاتجاه المعاكس أي نحو المضخة [13].

وبالتالي نلاحظ أن صمام عدم الرجوع حافظ على ضغط المضخة، ولكنه معرض لخطر التخطم كون قدرة تحمله 40 بار هو و جميع الأنابيب القريبة منه، والتي تزيد الضغوط الناجمة عن الصدمة عن 40 بار أي هذا الجزء بأكمله معرض للخطر.

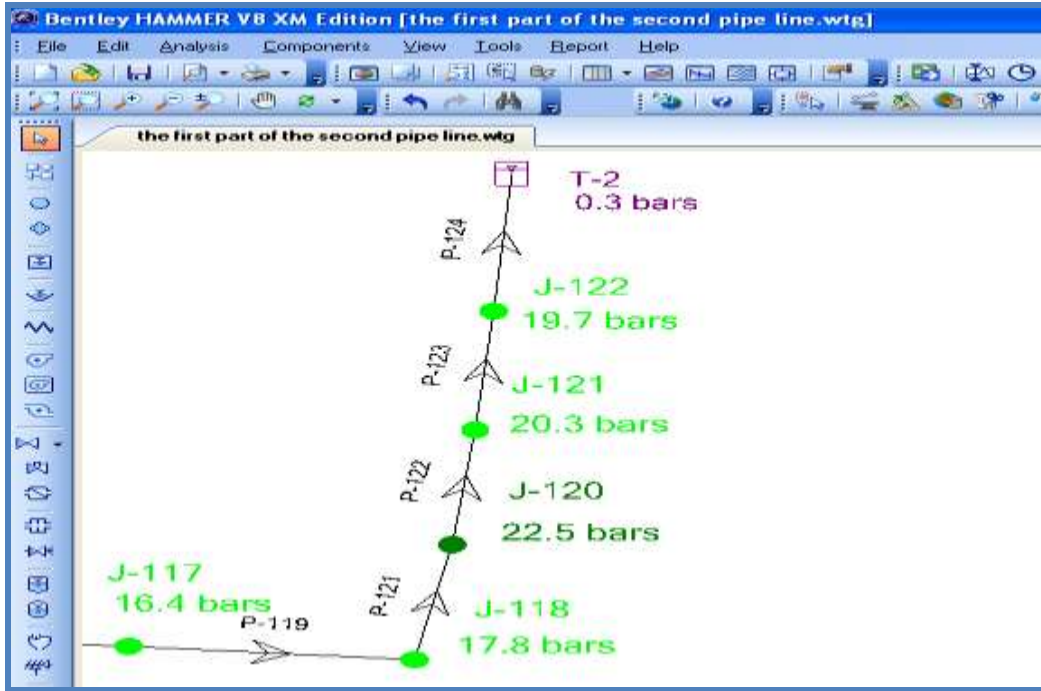


الشكل (9) تغير الضغط في خط الضخ من الخزان السفلي وحتى العقدة 5-ز

أما الشكل (10) فيظهر عليه تغير قيم الضغوط الأعظمية لجزء من خط الضخ من العقدة 53-ز وحتى العقدة 60 إذ نلاحظ هنا أن قيم الضغوط أقل من قدرة تحمل الأنابيب، وبالتالي لا يوجد خطر على هذا الجزء. وكذلك الأمر بالنسبة للشكل (11).

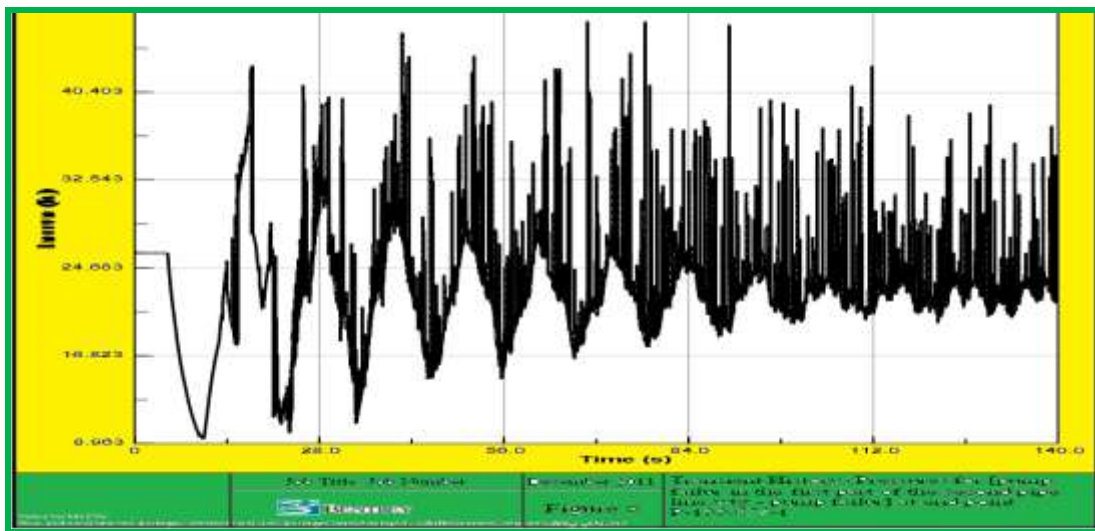


الشكل (10) تغير الضغط في خط الضخ من العقدة 53-ز وحتى العقدة 6-ز



الشكل (11) تغير الضغط في خط الضخ من العقدة J-117 وحتى الخزان العلوي

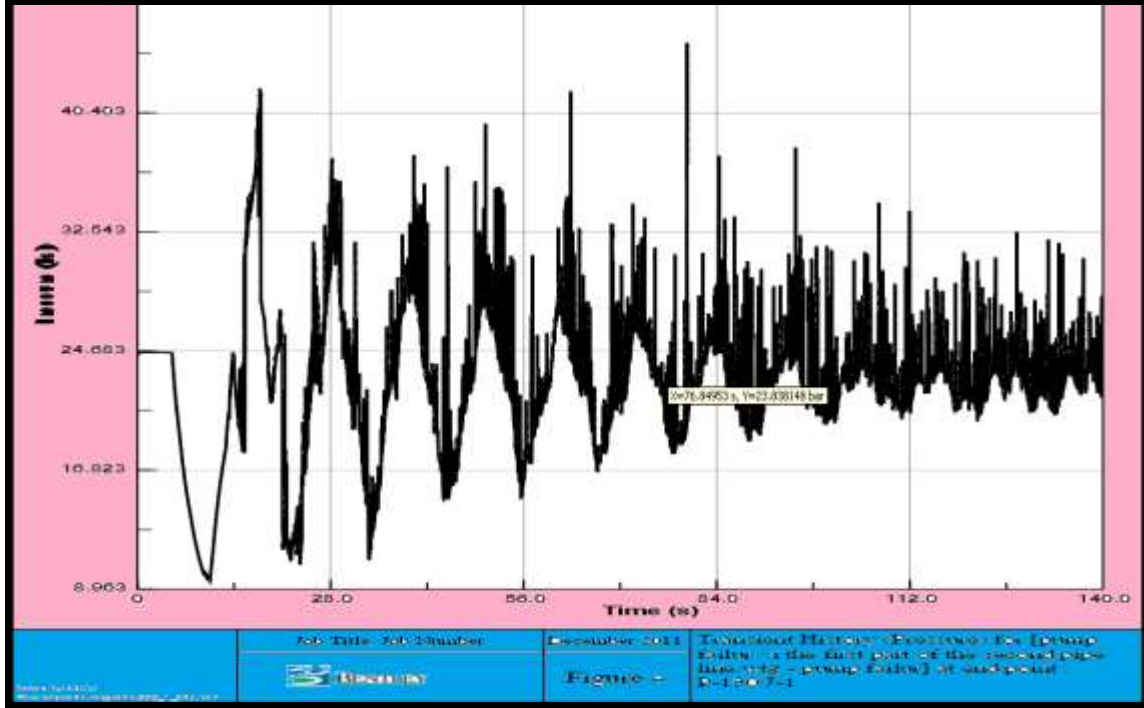
نلاحظ من الشكل (12) الذي يمثل تغيرات الضغط في صمام عدم الرجوع، عند حدوث الصدمة الهيدروليكية وذلك خلال 140 ثانية. بما أن (time delay until shutdown=5sec) ، أي حدث انقطاع في الطاقة بعد 5 ثواني، وبالتالي فخلال هذه الفترة سيكون الضغط محافظاً على قيمته في الحالة المستقرة وهي 26.2 بار، كما هو واضح في الشكل، وبعد 4 ثواني تقريباً ينخفض الضغط إلى القيمة 9.65 بار، ثم نلاحظ ارتفاع قيمته إلى 43 بار تقريباً، وهكذا نلاحظ توالي عدد كبير من موجات الضغط السالبة والموجبة خلال هذه الفترة الزمنية ليكون أعظمها هو القيمة 47.8 بار، والذي يحدث بعد 70 ثانية من فشل المضخة. وكما ذكرنا فإن هذه القيمة كبيرة، وبالتالي هناك خطر على صمام عدم الرجوع، إضافة إلى أن تناوب هذه الموجات يمكن أن يسبب الإعياء لمادة الأنبوب مع الزمن.



الشكل (12) تغيرات الضغط في صمام عدم الرجوع خلال 140 ثانية



الأمر نفسه نجده في الشكل (13) الذي يمثل تغيرات الضغط في العقدة 1-ج خلال 140 ثانية، إذ إنه خلال الخمسة ثواني الأولى يبقى الضغط مساوياً لقيمته في الحالة المستقرة وهو 24.7 بار، ثم تتوالى بعد ذلك موجات الضغط السالبة والموجبة. كما أننا نلاحظ من هذا الشكل أنه بعد حوالي 81 ثانية من فشل المضخة يصل الضغط إلى قيمته الأعظمية 45.1 بار، وهي أكبر من قدرة تحمل الأنابيب .



الشكل (13) تغيرات الضغط في العقدة 1-ج خلال 140 ثانية

### الاستنتاجات والتوصيات

- بينت نتائج نمذجة هذا الخط باستخدام برنامج WATERCAD، أن جميع الضغوط مقبولة ولا يوجد خطر على المعدات والتجهيزات في الحالة المستقرة، إذ إن أكبر ضغط عند المضخة 26.2 بار، وهو أقل من قدرة تحمل التجهيزات والأنابيب.
- حدوث فشل في المضخة المستخدمة في الجزء الأول من خط الجر الثاني، يسبب ضغوطاً عالية لا يمكن للخط تحملها، أي تزيد عن قدرة تحمل التجهيزات والأنابيب.
- إن الخطر الأكبر للصدمة الهيدروليكية سيكون عند صمام عدم الرجوع، إذ إن أكبر قيمة للضغط هي 47.8 بار وهو أكبر من القيمة التي يمكن أن يتحملها.
- واعتماداً على نتائج البحث يمكن وضع التوصيات الآتية:
- ضرورة وضع عدة سيناريوهات لعدة وسائل حماية من الصدمة الهيدروليكية (خزان الهواء المضغوط- خزان التغذية- الدوالب المعدل، تغيير نوع الأنابيب..... إلخ)، واختيار الأفضل منها باستخدام برنامج Bentley water hammer .
- ضرورة إجراء دراسة تفصيلية لظاهرة الصدمة الهيدروليكية قبل البدء بتصميم أي خط ضخ أو شبكة مياه.
- التوسع في إدخال البرمجيات الحاسوبية في مجال دراسة شبكات المياه لما توفره من الوقت والجهد.



**المراجع :**

1. حسن، عز الدين؛ فويتي، فاطمة. الآلات المائية ومحطاته. منشورات جامعة تشرين، سوريا، 2002، 324.
2. معلا، وائل. الجريان غير المستقر في الأنابيب. منشورات جامعة دمشق، سوريا، 1993، 208.
3. JAEGER, C. Fluid transients. First published, Glasgow: Blackie @ Son, London, 1977, 413.
4. STREETER, V.L.; WYLIE, E.B. Fluid transients. McGraw-Hill Inc, United States, 1978, 379.
5. ZARUBA, J. Water hammer in pipe line systems. Library of Congress Cataloging-in-Amsterdam, Publication Data, 1993, 361.
6. US Army Corps of Engineers. Water Hammer and Mass Oscillation (WHAMO) 3.0 User's Manual. 1998, 258 pages.
7. KARNEY, B; SIMPSON, A. In-line check valves for water hammer control. Journal of Hydraulic Research. Vol. 45, No. 4 , 2007, pp. 547–554.
8. Bergant, A; Tijsseling, A.S. Water hammer with column separation: A historical review. Journal of Fluids and Structures, Volume 22, Issue 2, February 2006, Pages 135-171, 10 Sept .2010. << [http://www.sciencedirect.com/science\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_Artia](http://www.sciencedirect.com/science_ob=ArticleListURL&_method=list&_Artia)>>
9. EMADI, J ; SOLEMANI, A. Maximum Water Hammer Sensitivity Analysis. World of Science, Engineering and Technology, .Vol.73, No.72 ,2011, pp 416-419.
10. MARTIN, C. Hydraulic transient design for pipeline systems. McGraw-Hill companies, New York, 1999, Chapter 12, 32.
11. JOSEPH, B; ROBERT, L. fluid mechanics with engineering application, eighth Edition, 1986, 456-463.
12. CHAUDHRY, M.H. Applied hydraulic transient. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1979, 503.
13. SHARP, B. B; SHARP, D. B. WATER HAMMER: PRACTICAL SOLUTIONS. First published 1996, Transferred to digital printing 2003, Burnell Research Laboratory, Victoria, Australia, 1996, 168.