



جامعة دمشق

كلية الهندسة المدنية

قسم الهندسة المائية

دراسة ظاهرة المطرقة المائية المتشكلة في الأنابيب باستخدام النمذجة الرياضية

حالة دراسية: مجموعة آبار الرشيدة في السويداء

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية باختصاص

الهندسة المائية

إعداد المهندسة: هاجر عماد الشوفي

إشراف الدكتور المهندس: وسام نخلة

2015



جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة المائية

دراسة ظاهرة المطرقة المائية المتشكلة في الأنابيب
باستخدام النمذجة الرياضية
حالة دراسية: مجموعة آبار الرشيدة في السويداء
دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية باختصاص الهندسة المائية

إعداد المهندس: هاجر عماد الشوفي
إشراف الدكتور المهندس: وسام نخلة

لجنة الحكم السادة الأساتذة:

كلية الهندسة المدنية عضواً	الأستاذ المساعد في قسم الهندسة المدنية الاختصاص: منشآت مائية للري	د.م عدنان نحاس جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية عضواً	الدكتور المهندس في قسم الهندسة المدنية الاختصاص: محطات ضخ	د.م فتيبة السعدي جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية عضواً ومشرفاً	الدكتور المهندس في قسم الهندسة المدنية الاختصاص: محطات كهربائية	د.م وسام نخلة جامعة دمشق

العام الدراسي 2014-2015

تقدير

أتقدم بجزيل الشكر إلى الدكتور المهندس وسام نخلة، في كلية الهندسة المدنية قسم الهندسة المائية في جامعة دمشق، الذي أشرف على هذه الرسالة وقدم كل الإرشادات العلمية، والمراجع الهندسية اللازمة، والوقت الكافي لدراسة ومناقشة تفاصيل البحث، والصدر الرحب لاستدراك معوقات انجاز هذا البحث، كما أشكره جزيلاً على تشجيعه الدائم لي ودعمه للعلم والباحثين.

وأنتقدم بشكر عميق للجنة الحكم المؤلفة من الدكتور المهندس عدنان النحاس والدكتور المهندس قتيبة السعدي، الذين خصصا الوقت الكافي للاطلاع على مضمون البحث واستعراضه ومناقشته.

كما أتقدم بجزيل الشكر لأساتذة قسم الهندسة المائية الذين كان لمناقشتهم وآرائهم الأثر الكبير والمساعد في إخراج البحث إلى النور.

وأنتقدم بشكر خاص إلى الأستاذ المهندس جهاد سابا الذي ساهم بخبرته بشكل فعال في المساعدة العلمية، وخصص من وقته لمناقشة الأمثلة والنتائج وقدم المشورة لتجاوز المعوقات والصعوبات أثناء إنجاز البحث.

ولا أنسى مطلقاً مشاعل النور الكادر العامل في مؤسسة المياه في السويداء من مهندسين وخبراء، الذين وفروا وقدموا لي كافة المعطيات اللازمة للمشروع بمختلف النواحي.

والشكر الخاص والعميق للدكتور المهندس غسان العيد الذي لم يبخل بمساعدتي في مجال البرمجة وقدم البرنامج الذي صممه بشكل مجاني كما خصص من وقته الثمين لمناقشة واستعراض الحالة المدروسة وأفادني من خبرته في موضوع المطرقة المائية.

خلاصة البحث

خصص هذا البحث لدراسة ظاهرة المطرفة المائية في الأنابيب والمتشكلة نتيجة انقطاع التيار الكهربائي المفاجئ (انهيار المضخة) عن محرك المضخات العاملة في المجموعة البترية المدروسة، والذي يتسبب بانهيارات متكررة في الأنابيب نتيجة للقيم العالية للضاغط، إضافة إلى خصوصية الحالة المدروسة كون الأنابيب ضمن الآبار قائمة تماماً، ولا ننسى فرق الارتفاع بين مكان الضخ وخزان التجميع. وبالتالي هَدَفَ البحث إلى تقديم موديل رياضي يدرس الحالة بالاعتماد على EXCEL للتنبؤ بقيم الضواغط المتشكلة، إضافة إلى مدى تأثير طرق وصل مختلفة في الأنابيب على الضواغط المتشكلة و إبراز مدى إمكانية التخفيف من حدتها أو زيادتها على حد سواء، كما تناقش قابلية مساهمتها في التخفيف من القيم السالبة أو ظاهرة التكيف المتشكلة في منطقة رأس البئر عند انخفاض وانحسار الضخ.

تم تصميم هذا الموديل بناءً على استخدام طريقة المميزات (MOC) التي تعتمد في الأساس على معادلاتي الحركة والاستمرار للسائل.

مر النموذج خلال مراحل التدقيق اللازمة للتحقق من طريقة التحليل باستخدام البرامج الحاسوبية المصممة من قبل الشركات العالمية من أجل حل مشكلة المطرفة والتخفيف منها وقد تم الاعتماد على برنامجين أساسيين هما: (HAMMERBENTLY, WATERHAMME) وقد أظهرت النتائج مدى الفائدة من استخدام بعض طرق الوصل وذلك للتخفيف من الضواغط السالبة والموجبة على حد سواء.

محتويات البحث

يتناول البحث في **الفصل الأول** مقدمة عامة عن موضوع المطرقة المائية و أسباب تشكلها كما أشار إلى الحالة الدراسية التي أخذت بالاعتبار أثناء البحث ومن خلال وصفها وتحديد أثار إلى الفكرة الأساسية التي يتطرق إليها البحث وهدف العمل عليه، ثم فصل في موضوع الدراسات السابقة حول هذا الموضوع و بدايات أخذ ظاهرة المطرقة المائية بعين الاعتبار و معرفة مكتشفها ومطوري النظريات والحلول المستخدمة في حلها بشكل كافٍ.

يتطرق **الفصل الثاني** إلى ماهية المطرقة المائية وآلية تشكلها في الأنابيب حيث أن حالات عدم الاستقرار في الناقل متنوعة ابتداءً من إغلاق مفاجئ لسكر أو إقلاع مضخة وانتهاءً بحالات انقطاع التيار الكهربائي المفاجئة وغيرها من حالات اللاستقرار.

كما ويتضمن هذا الفصل التحليل الرياضي للظاهرة من خلال وصف مفصل للمعادلات التي تحكم الجريان غير المستقر بأنواعه كافةً. ومن ثم شرحت بشكل مفصل آلية الحل لهذه المعادلات الحاكمة حيث توجد العديد من الطرق منها العددية ومنها التخطيطية والتحليلية...إلخ. يتناول الفصل أيضاً ضمن هذه الطرق وآلية حلها إلى الشروط الحدية التي تحكم حالات المطرقة المائية المتنوعة مع مناقشة تفصيلية لكل منها. إضافة إلى دراسة سرعة انتشار موجة الضغط في الأنابيب ومناقشة حالة التكهف وتأثير قيم معامل المرونة في الناقل.

يتناول **الفصل الثالث** المذكرة الحسابية، حيث يشمل عملية بناء النموذج الحاسوبي ومناقشة حالات التحميل المختلفة للحالة المدروسة وإظهار وشرح نتائج كل منها بالتفصيل.

يناقش **الفصل الرابع** الطرق الممكنة كافةً لوسائل الحماية المستخدمة في هذا المجال بشكل تفصيلي ثم اقتراح أفضل وسيلة حماية تناسب المنظومة المدروسة، وأبرزها كما نعلم خزانات الحماية و سكورة إدخال الهواء، حيث تمت مناقشة آلية العمل باستخدام برنامج إكسل في حلها وتركيبها كما وردت في المراجع أما النتائج التفصيلية فقد أخذت باستخدام برنامج

.WaterHammer

الفصل الأول

1. مقدمة.

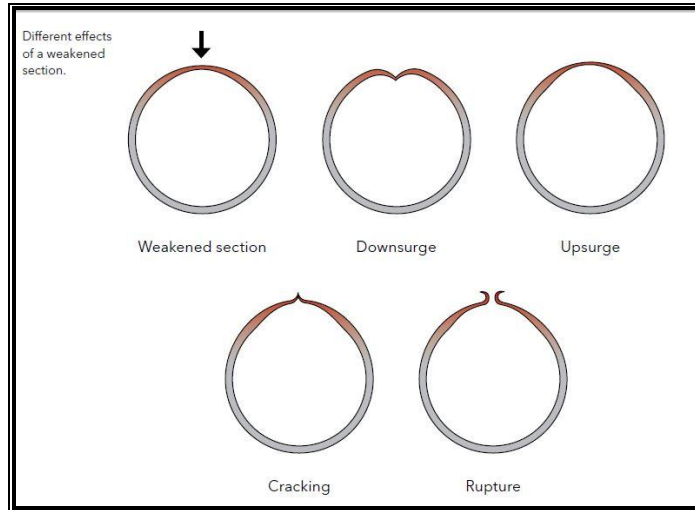
تعتبر ظاهرة المطرقة المائية من الظواهر الهيدروليكية الهامة التي نصادفها في شبكات الأنابيب وتظهر آثارها جلية بسبب الكوارث المدمرة التي قد تنشأ عنها إذا لم تتخذ إجراءات الوقاية منها بشكل ملائم.

تعرف هذه الظاهرة على أنها أي تغير مفاجئ في الضغط الهيدروديناميكي (زيادة أو نقصاناً) في مقطع ما من الجريان المضغوط في الأنابيب والنواتج عن التغير المفاجئ في معدل الجريان في هذا المقطع مع الزمن . تظهر هذه التغيرات على شكل أمواج ضغط تنتشر على طول الناقل تصل سرعتها في بعض الأحيان إلى سرعة انتشار الصوت في السائل حيث تنتقل هذه الأمواج من النقطة التي حدث عندها التغير وتنعكس عائدة إليها إلى أن تتخامد بشكل نهائي بفعل الاحتكاك في الناقل. المرجع [1].

ولهذا التغير أسباب متعددة كوننا نتحدث عن الجريان ضمن أنبوب (مضغوط) فقد نصادف إغلاقاً مفاجئاً في سكر معين أو فتحاً مفاجئاً له وإذا تحدثنا عن محطات الضخ قد نشاهد إقلاعاً أو توقفاً لمضخة بشكل مفاجئ يؤدي إلى ضغوط مرتفعة وقد يكون هذا التوقف طارئاً نتيجة خطأ بشري أو انقطاع التيار الكهربائي عن المضخة ، وفي هذه الحالة تتشكل المطرقة المائية بأخطر حالاتها أو ما نسميها انهيار المضخة وهي تترافق بانخفاض واضح في الضغط. كما يمكن أن تتشكل المطرقة المائية في محطات الطاقة الكهرومائية عند الإقلاع أو التوقف لعمل إحدى التوربينات في المحطة بشكل مفاجئ. من الملاحظ أن هذه الظاهرة واسعة الانتشار وهي خطيرة بسبب الأضرار التي تخلفها على الأنابيب أو المضخات أو غيرها من الأجزاء في المنظومة المدروسة وقد تكون نتائجها مدمرة لذلك يجب أخذها في الحسبان لتفادي هذه الضغوط منذ الدراسة الأولية للمشروع.

يعطي الشكل (1) تصوراً ولو بسيطاً عن الأضرار الممكن أن تسببها قيم الضغوط

المتشكلة على الأنابيب من ضعف في الجدار أو ثقب أو غيرها:



شكل (1) أثر المطرقة المائية على الأنابيب.

1.2 الدراسة المرجعية.

تشير المراجع إلى أن العالم الروسي **جوكوفسكي (Joukowski)** أول من عمل في دراسة المطرقة المائية منذ عام (1898م). فقد حدد وصفاً دقيقاً لهذه الظاهرة، ووضع المعادلات الأساسية الحاكمة للمطرقة المائية، والتي تربط بين التغير في ضغط السائل المتحرك في الأنابيب، والحاصل نتيجة التغير في معدل الجريان (السرعة) فيها. واعتمد في تحليله لهذه الظاهرة على معادلاتي الاستمرار ومعادلة تغير كمية الحركة. حيث أجرى تجاربه على الأنابيب الفولاذية، لقياس الموجات السريعة، وتوصل في النهاية إلى صياغة معادلته المشهورة التي تمكننا من حساب قيمة الزيادة أو النقصان في الضغط الناتجة عن المطرقة المائية:

$$P = -\rho C \Delta V$$

وبدلالة الضاغط تأخذ الشكل التالي:

$$\Delta H = -\frac{C}{g} \Delta V$$

حيث C سرعة انتشار موجة الضغط في الناقل (m/s).

g تسارع الجاذبية الأرضي (m/s²).

ΔV مقدار التغير في سرعة الجريان ضمن الناقل (m/s).

ΔH مقدار التغير في الضاغط ضمن الناقل (m).

هذا وتحدد سرعة انتشار موجة الضغط C على كامل مسار الأنبوب وفق جوكوفسكي

بالعلاقة الآتية:

1. باعتبار الناقل صلد والسائل قابل للانضغاط:

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

2. باعتبار الناقل مرن والسائل قابل للانضغاط:

$$C = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e}}}$$

حيث K معامل انضغاطية السائل (N/m^2).

D قطر الأنبوب (m).

ρ الكتلة النوعية للسائل (kg/m^3).

E معامل المرونة (N/m^2).

e سماكة جدران الأنبوب (m).

وتشير بعض المراجع الأخرى أن العالم الألماني **جوهانس فون كريس** (Johannes von Kries) قد توصل إلى ذات المعادلة التي وصل إليها **جوكوفسكي** في العام (1883م) وتركزت أبحاثه في مجال الأوعية الدموية، كما أجرى تجارباً على الأنابيب المطاطية القصيرة ولكن لم تنشر أعماله خارج ألمانيا لذلك نسبت أولى الدراسات في المطرقة المائية إلى العالم الروسي **جوكوفسكي** (Joukowsky) في العام (1898م)، حيث نشرت مقاله في روسيا عام (1899م)، ونشرت بعد ذلك في ألمانيا عام (1900م) وتمت ترجمتها للغة الإنكليزية عام (1904م) وإلى اللغة الفرنسية عام (1907م) [6].

قام العالم **غيبسون** (Gibson) في كتابه *Water Hammer in Hydraulic Pipelines*

لعام (1908م) بتحليل ظاهرة المطرقة المائية الناتجة عن الإغلاق أو الفتح البطيء والتدريجي للسكورة والذي اعتبر تجديداً في ذلك الوقت.

اقترح العالم **أليفي** (Allievi) عام (1925م) الطريقة التخطيطية في حساب المطرقة المائية

وذلك بإهمال الاحتكاك من معادلة الحركة ثم تم تطوير هذه الطريقة من قبل العلماء

1935 BERGERON، 1937 SCHNEIDER والعالم 1955 PARMAKIAN بالرغم من أن

استخدام هذه الطريقة محدود جداً حالياً لكنها تعطي تصور واضح عن آلية الجريانات العابرة

(*Transient Flow*) وانعكاسات الموجة. كما يمكن الحصول من المخطط الناتج على كمية كبيرة من التفاصيل عن الظاهرة العابرة في الأنبوب. تم تعديل هذه الطريقة لاحقاً بإدخال قيمة الاحتكاك حيث تم تمثيل هذه الفواقد بشكل فواقد موضعية تحدث في مناطق محددة من الناقل أوجدت طرائق حديثة هذه الأيام في تطوير هذه النظرية باستخدام الحواسيب [1].

طرح الكتاب *Elementary Fluid Mechanics* في العام (1940م) الذي قام بتأليفه العالم جون فينراد (*John K. Vennard*) دراسة عن الجريانات بشكل عام وفي مختلف الظروف والشروط الممكنة، ومن بينها الجريان ضمن الأنابيب بطريقة تحليلية منطقية للوصول إلى القواعد الأساسية التي تخص مختلف أنواع الجريان ضمن الأنابيب من بينها الجريان غير المستقر طبعاً. ولم يعتمد المرجع على التجارب إنما أوضح المعادلات الأساسية في تحليل الظواهر الهيدروليكية ودراسة رياضية تبين هذه الظواهر المدروسة.

قدم العالمان **ويلي وسترييتر** (*WYLIE and STREETER*) عام (1967م) في كتاب *Fluid Transients* عرضاً مفصلاً عن المطرقة المائية والمعادلات الحاكمة لها، والطرق المختلفة التي تمت بها دراسة هذه المعادلات ومساوئ وحسنات كل طريقة. حيث تقسم هذه الطرق بشكل عام إلى الطريقة الحسابية والتخطيطية وطبعاً طريقة المميزات، وتعتبر الأخيرة أكثر الطرق استخداماً نظراً لسهولة ودقتها وقابليتها للبرمجة إضافة إلى سهولة تحديد الشروط الحدية فيها [12]، وتعتمد هذه الطريقة في تحليلها لظاهرة المطرقة المائية على معادلتين أساسيتين هما : معادلة الاستمرار ومعادلة الحركة، وهما معادلتان تفاضليتان جزئيتان يتم باستخدام طريقة المميزات تحويلهما إلى أربع معادلات تفاضل كلي قابلة للتكامل تُمكننا بالنهاية من حساب تغيرات الضغط والغزارة في أي مقطع من الأنبوب وفي أي لحظة زمنية. وقد بين العالمان أن المعادلة الخاصة بانتشار موجة الضغط يمكن أن تعطى بالعلاقة الآتية:

$$C = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}} (a)}$$

حيث تتعلق قيمة الثابت a بخيارات الأنبوب و توضع في الحالة الطبيعية إذا كان:

$$a = \frac{5}{4} - \mu \quad \text{— الأنبوب موثوق من طرفه العلوي فقط}$$

$$a = 1 - \mu^2 \quad \text{— الأنبوب ممنوع من الحركة المحورية بشكل كامل}$$

- الأنبوب يكون قابل للتمدد على كامل نقاطه $a = 1$ حيث μ يمثل معامل بواسون.

نشرت مقالة عام (1968م) قدمها المهندس **قذري محمد حنيف** (*haudhry Mohammad Hanif*) تحدث فيها عن الشروط الحدية في تحديد المطرقة المائية . حيث تم تطوير هذه الشروط واستخدامها في مجال أنظمة الري واستخدمت هذه الشروط أيضاً وبدون أي تعديل في شبكات التزويد بالمياه إضافة إلى تقديم العديد من الحلول البرمجية باستخدام طريقة المميزات. قدم الباحث **عاطف قاسم** (*Atef M.Kassem*) في العام (1976م) بحثاً بعنوان *Protection Against Water Hammer In Pump-Discharge Lines* عن انقطاع التيار الكهربائي في نظام الضخ نال عليها درجة الماجستير في الهندسة المدنية من جامعة *McMaster University, Hamilton, Ontario*. تناول البحث تصميماً لبرنامج حاسوبي حول المطرقة المائية المتشكلة نتيجة انقطاع التيار الكهربائي باستخدام طريقة المميزات وناقش فيها جميع الشروط الحدية الممكنة كما قدم جملة من الاقتراحات عن وسائل وسبل الحماية من المطرقة المائية المتشكلة.

قدم الدكتور **قذري محمد حنيف** (*M.HanifChaudhry*) في كتابه *Applied Hydraulic Transient* عام (1979م) مناقشة شاملة ومنظمة للمطرقة المائية ، أبرز فيها العديد من الطرق المستخدمة في حلها وتحليلها ، واختيار الطرق الأمثلية من أجل النمذجة الحاسوبية وقد تضمن الكتاب مجالات واسعة حول المطرقة المائية أبرز فيها تأثير هذه الظاهرة الواسع على المشاريع المائية المختلفة مثل: المحطات الكهرومائية ومحطات الضخ التخزينية إضافة إلى أنظمة تزويد المياه وحتى محطات الطاقة النووية وأنباب النفط.

تشارك كل من الباحثين **بروس وغيبسون وواترن** (*Bruce E.Larak*)، (*Roland W.Jeppson*) و (*Gary Z.Wattern*) في تأليف كتاب *Hydraulic of Pipeline Systems* للعام (2000م) عن المطرقة المائية وتحليلها باستخدام طريقة المميزات وقد تم شرح الطريقة المبسطة أو المعادلات التقريبية بإهمال الاختلاف الواسع بين كل من V و P حيث اعتبر هذا الاختلاف ليس كبيراً ومنها نحصل على مجهولين اثنين فقط، ثم تمت دراسة الطريقة الشاملة والتي نحصل فيها على أربعة مجاهيل، ونوقشت أيضاً حالات كثيرة ومتنوعة والشروط الحدية المختلفة وظاهرة

التكهف وانفصال عمود السائل وكيف تم تسخيرها في الكثير من البرامج الحاسوبية لحساب مختلف أنواع الشبكات والانهيارات في المضخة ونوقشت حالات أجهزة الحماية المختلفة.

قدم الباحثان ستيفنسون و أسس (F.ASCE، D.Stephenson) مقالة عام (2002م) فيها إرشاد مبسط لأجهزة الحماية وخصوصاً خزانات الضغط المستخدمة كجهاز حماية للمطرقة المائية في أنظمة الضخ ، وهي طبعاً فعالة في تخفيف الضواغط المرتفعة الناتجة عن المطرقة المائية والتحام عمود السائل.

قدم كل من أتانجادولوهراسبي (A.R.Lohrasbi and R.Attarnejad) مقالة عام

(2008م) بعنوان *Water Hammer Analysis by Characteristic Method* وهي تشمل دراسة للمطرقة المائية واستعراض مفصل لمعادلات المميزات ومناقشتها وذلك فقط على حالة الإغلاق والفتح المفاجئ للسكر وأثرها على الأنابيب وقد دعت بمثال عملي استخدم فيه برنامج EXCEL في الحل.

أجريت دراسة قام بها المهندسان آنسا كوستنتين وكلوديو ستيفان (AncaConstantin, Claudiu Stefan Nitescu) ونشرت بشكل مقالة عام (2010م) بعنوان *Numerical Simulation Of Hydraulic Shock in Water Pumping System Protected by Air* وبشكل خاص طرق الحماية منها وكيفية الاستفادة من الهواء كعازل يمكن أن يحمي من الصدمة الهيدروليكية. أجريت هذه الدراسة في رومانيا حيث اعتبرا أن الهواء وبسبب مرونته عازلاً حامياً لتأثير المطرقة الهيدروليكية وذلك من خلال استخدام نظام الحماية المعروف بالغرف الهوائية أو خزانات الضغط حيث درس مثال تجريبي عن الموضوع وحسبت الضواغط في الحالة العامة وكيف أصبحت بعد استخدام هذه الغرف.

مما سبق وجدنا الأثر المهم لدراسة ظاهرة المطرقة المائية المتشكلة في الأنابيب منذ القدم، وكيف قدم العلماء التجديد المناسب لها على كل الأصعدة لمحاولة حلها. وقد ركز البحث على هذه الظاهرة نتيجة تشكلها في أخطر حالاتها في المجموعة البرية المدروسة كما تناولتها بالتفصيل مشكلة البحث.

1 3. مشكلة البحث.

خصص هذا البحث من أجل دراسة وتحليل ظاهرة المطرقة المائية، التي تواجهنا في إحدى المجموعات البرية في المنطقة الشمالية الشرقية من محافظة السويداء. وهي مجموعة آبار محطة

ضخ الرشيدة، التي تم تشييدها كمشروع إسعافي ، الغرض منه إمداد القرى الشمالية الشرقية من المحافظة بالمياه، بسبب تراجع كمية الأمطار ، والنقص في المنسوب المائي لسد المشنف الذي تم بناؤه في سبيل دعم تلك القرى التي تقع على حدود البادية.

إن الاعتماد على المياه الجوفية كبير جداً كونها المورد الأمثل في تلك المنطقة ، لكن المشكلة كانت في العمق الكبير لتلك الآبار حيث وصل العمق في بعضها إلى ما يزيد على (700م) وذلك بسبب تراجع المنسوب الجوفي ، وبالتالي كان لابد من استخدام مضخات غاطسة متعددة المراحل ضمن البئر لتغطية فرق المنسوب بين المضخة التي توضع على عمق قريب من (600م) تحت سطح الأرض وبين خزان التجميع الأولي الذي كانت تضخ إليه المياه ، وبالتالي كان لاختيار نوع المضخة ونوعية الأنابيب المناسبة أهمية كبرى في المشروع.

غير أن هذه المنظومة تتعرض أثناء عملها إلى جملة انقطاعات في التيار الكهربائي بسبب الأوضاع الراهنة مما يؤدي كما ذكرنا سابقاً إلى ظاهرة الانهيار المتكرر في عمل المضخات والتي يرافقها هبوطات في الضغط قد تصل إلى حد التكيف في المناطق العالية من الأنبوب وأحياناً زيادة في الضغط ناتجة عن إعادة التحام عمود السائل وتلاشي الجيوب الهوائية، ومن هنا تأتي أهمية دراسة هذه الحالة وتحليلها لهدف الوصول إلى فهمها وإيجاد الحلول المناسبة لضمان سلامة المنظومة بالكامل وتأمين استمرارية عملها.

1 4. هدف البحث.

يظهر مما سبق الغاية الأساسية من هذا البحث وهي دراسة ظاهرة المطرقة المائية وتحديد قيم الضواغط المتشكلة على طول المسار من لحظة الانهيار عند المضخة (عند انقطاع التيار) وحتى الخزان ودراسة مشكلة التكيف التي تواجهها في منطقة رأس البئر وذلك بالاستعانة ب موديل حاسوبي مبسط تمت كتابته باستخدام برنامج الإكسل معتمدين في ذلك على المعادلات الأساسية للمطرقة المائية التي سنذكرها بالتفصيل لاحقاً.

يتكون المشروع من خمسة آبار : اثنان منها قيد التنفيذ وثلاثة فقط هي العاملة ضمن المشروع تتصل هذه الآبار مع بعضها بشبكة من الأنابيب بشكل معين. إن توضع الآبار على الواقع أوحى لنا بإمكانية الربط بين الآبار بطرق مختلفة و ذلك بعددراسة وتحليل المنظومة مستخدمين النموذج المبسط السابق، وقد أظهرت النتائج حلولاً مختلفة تؤدي إلى حالات ربط أفضل بكثير من المنفذة حالياً، بوجودها نتفادي كثيراً من المشاكل التي تتعرض لها المنظومة ، وتخلصنا

من إجراءات مفروضة علينا حالياً يمكن أن تكون مكلفة جداً. وهنا تكمن الغاية الثانية لهذا البحث هو تحديد نظام الحماية الأمثل للمنظومة البرية في مختلف طرق وصلها لتفادي الضواغط المتشكلة سواء العالية أو المنخفضة التي تؤدي إلى تشكل التكهف في رأس البئر. ومن أجل التحقق من سلامة عمل البرنامج الحاسوبي المبسط تضمن البحث مقارنة للنتائج التي تم الوصول إليها باستخدام البرنامج السابق لحالة ربط بسيطة وهي حالة بئر واحد موصول إلى خزان التجميع مع تلك النتائج التي حصلنا عليها باستخدام برنامجين (HAMMERBENTLY, WATERHAMM) ثم تعميمها على الحالات الأكثر تعقيداً.

الفصل الثاني

المطرقة المائية

2.1. تحليل المطرقة المائية.

تجري السوائل في الأنابيب بشكل طبيعي بسرعة منتظمة في الحالة العامة وتلك هي التي نسميها الحالة المستقرة للجريان لكن في بعض الأحيان يحدث اختلال في الشروط المفروضة أو يكون يحصل تغير مفاجئ لحركة الجريان ينتج عنه اضطراب أو تغير في سرعة الجريان يؤدي هذا التغير إلى انتقال من وضع مستقر للجريان إلى وضع مستقر في وضع آخر وذلك ضمن فترة قصيرة نسميها فترة عدم الاستقرار.

يمكن أن نميز نوعين من الجريان غير المستقر:

◆ الجريان شبه المستقر (*Quasi-steady flow*) وهي حالة تعني أن عدم الاستقرار بدون تأثير العطالة والمرونة اللذين يتم إهمالهما في هذه الحالة، هذا ويمكن اعتبار هذا الجريان مستقراً خلال فترة زمنية قصيرة نسبياً كما أن انتشار كل من الغزارة والضاغط يكون بشكل تدريجي عبر الناقل ولعل أبرز هذه الجريانات هي التي تحدث أثناء التصريف من الخزانات الكبيرة الحجم أو انتشار الطلب عبر شبكة توزيع المياه خلال فترة 24 ساعة.

◆ الجريان غير المستقر الحقيقي (*True-transient flow*) حيث تؤخذ قيم معاملات العطالة والمرونة سواء للناقل أو للسائل كعامل أساسي بالاعتبار وهنا نميز حالتين:

1. تحليل الجريان باستخدام نظرية العمود الصلب (*Rigid Column Theory*) وذلك عندما يكون معدل تغير الجريان في الناقل قليلاً بالمقارنة مع الزمن اللازم لانتشار موجة الضغط، في هذه الحالة يمكن اعتبار السائل وكأنه غير قابل للانضغاط وأن الناقل صلب، أي إن الغزارة في لحظة زمنية معينة تكون متساوية وفي جميع النقاط على طول الناقل وكل تغير في الضغط والغزارة ينتقل آنياً للنقاط المجاورة ويتحرك السائل وكأنه كتلة واحدة.

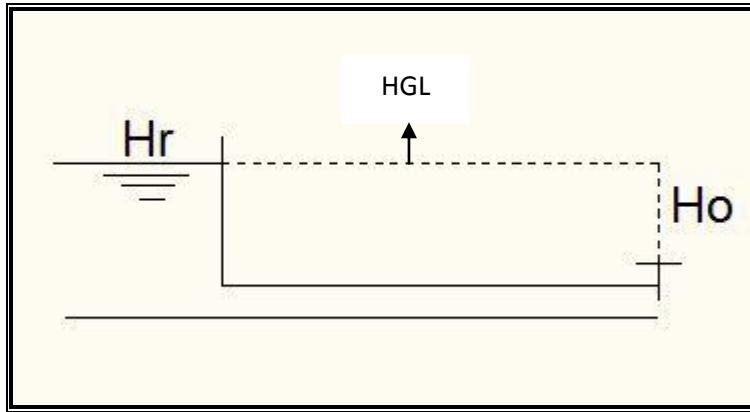
2. تحليل الجريان باستخدام المطرقة المرنة (*Water Hammer*) عندما يصبح معدل تغير الجريان بالمقارنة مع الزمن كبيراً وهنا لا بد من إدخال مرونة السائل والناقل في الحساب وننتقل إلى تحليل الجريان باستخدام المطرقة المرنة. [1].

2.2. وصف ظاهرة المطرقة المائية وآلية حدوثها.

إن الأسباب الأساسية لتشكل هذه الظاهرة متعددة كما ذكرناها سابقاً نذكر منها:

- 1 إقلاع أو توقف مضخة أو عدة مضخات.
- 2 إغلاق أو فتح سكرة التحكم بالغرارة.
- 3 السحب المتغير والسريع من الشبكات المضغوطة.
- 4 إجماء أنبوب مائل باتجاه الجريان وبتدفق زائد.
- 5 تفريغ الهواء من الأنابيب.
- 6 تدفق المياه بشكل مفاجئ من أنابيب الضخ بسبب حوادث الانكسار. [2].

ولفهم ظاهرة المطرقة المائية وحركة الأمواج في الأنابيب، سنقوم بتحليل مبسط لحالة نموذجية وهي ظاهرة انتشار موجة الضغط المتشكلة نتيجة إغلاق سكر بشكل مفاجئ أو فتح مفاجئ، حيث يتوضع السكر في نهاية أنبوب أفقي طول L متصل بخزان يغذي الشبكة كما هو موضح في الشكل التالي:

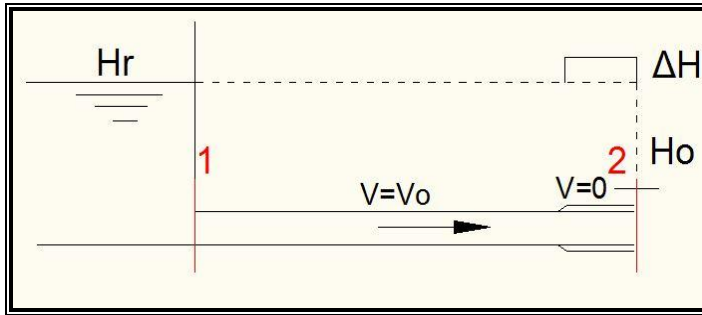


شكل (2) الحالة الستاتيكية ($t=0$)

في حالة الإغلاق المفاجئ للسكر، تحدث مطرقة مائية عند السكر تمر بعدة مراحل متتالية:

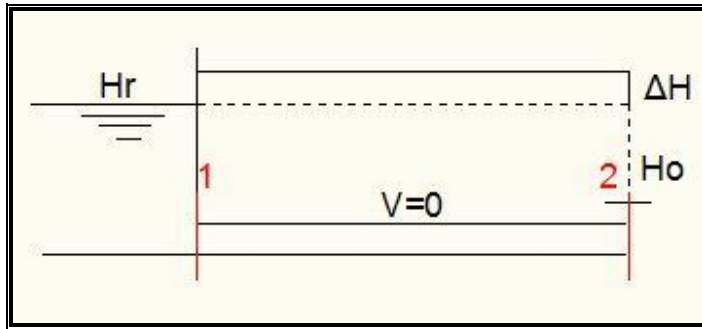
المرحلة الأولى: $(0 \leq t \leq \frac{L}{c})$

بمجرد إغلاق السكر تنخفض سرعة الجريان في الناقل الأمر الذي يؤدي إلى ارتفاع الضاغط بمقدار $(\Delta H = \frac{c}{g} V_0)$ ونتيجة لذلك يتمدد الناقل فينضغط السائل وتزداد كثافته (كتلته النوعية) وتنتشر موجة ضغط موجبة من السكر باتجاه الخزان وبالتالي يتم تحويل كامل الطاقة الحركية للسائل إلى طاقة ضغط تبدأ هذه الموجة بالانتشار من السكر باتجاه الخزان بسرعة c كما يلي:



شكل (3) المرحلة الأولى $(t < \frac{L}{c})$

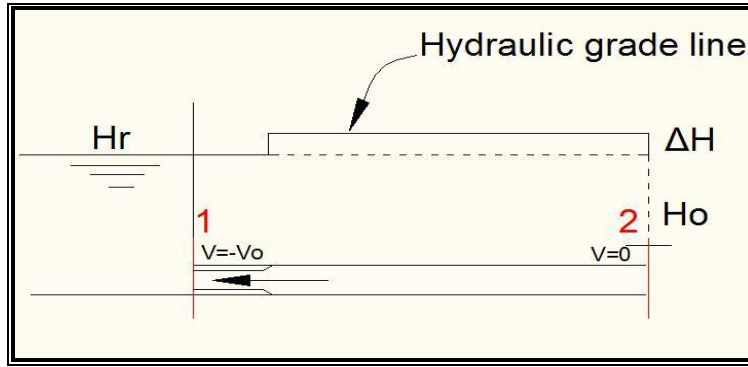
وفي الشكل التالي نلاحظ انتشار كامل موجة الضغط على كامل مسار الأنبوب:



شكل (4) المرحلة الثانية $(t = \frac{L}{c})$

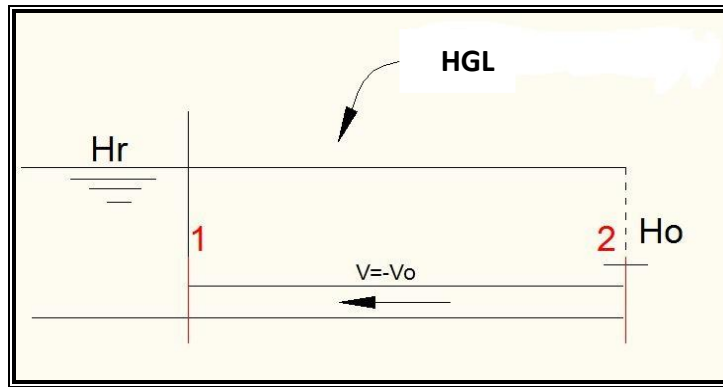
المرحلة الثانية: $(\frac{L}{c} \leq t \leq 2\frac{L}{c})$

بما أن منسوب الماء في الخزان (H_r) يكون ثابتاً عندما تأتي الموجة بضاغط (H_0+H) ونتيجة لهذا الفرق في الضغط تصبح شروط الجريان في الناقل غير مستقرة وبالتالي يبدأ السائل بالجريان من الناقل إلى الخزان بسرعة $(-V_0)$ وبالتالي تبدأ الموجة بالانحسار وينخفض الضاغط بدءاً من الخزان من (H_0+H) إلى القيمة (H_0) أي تنتشر موجة سالبة من الخزان باتجاه السكر بحيث يصبح الضغط في الناقل خلف الموجة (H_0) وسرعة الجريان $(-V_0)$ كما يلي:



شكل (5) المرحلة الثالثة ($t=L/c+\epsilon$)

وتستمر هذه الموجات بالانتشار من الخزان إلى السكر حتى تسود على كامل الناقل كما يلي:



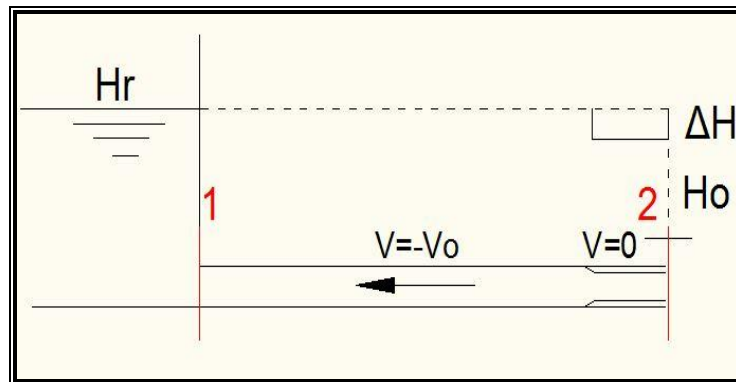
شكل (6) المرحلة الرابعة ($t=2L/c$)

المرحلة الثالثة: ($2\frac{L}{c} \leq t \leq 3\frac{L}{c}$)

بما أن السكر مغلق بشكل كامل بالتالي فهو لا يسمح للسائل بالجريان خلاله وبالتالي

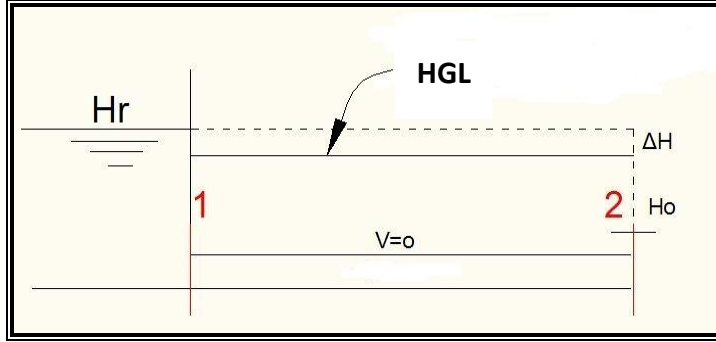
تتعدم سرعة الجريان التي كانت سالبة أساساً وبالتالي ينخفض ضغط السائل من (H_o) إلى (H_o^-)

وتنتشر موجة ضغط سالبة من السكر باتجاه الخزان كما يلي:



شكل (7) المرحلة الخامسة ($t=2L/c+\epsilon$)

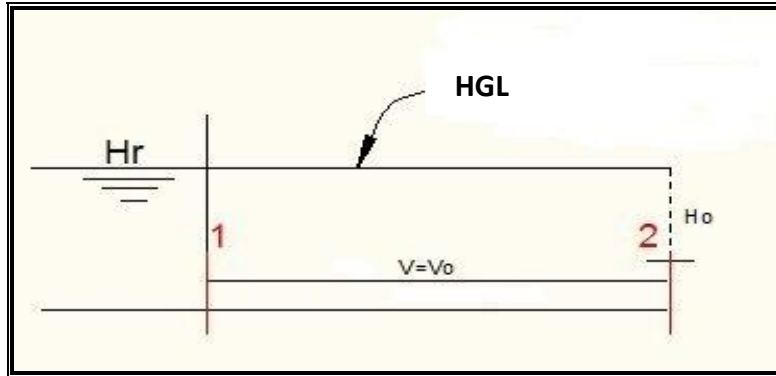
ثم تنتشر هذه الموجة التي قيمتها $(H_0 - \Delta H)$ وبسرعة معدومة على كامل طول الناقل كما في الشكل (8):



شكل (8) المرحلة السادسة $(t=3L/c)$

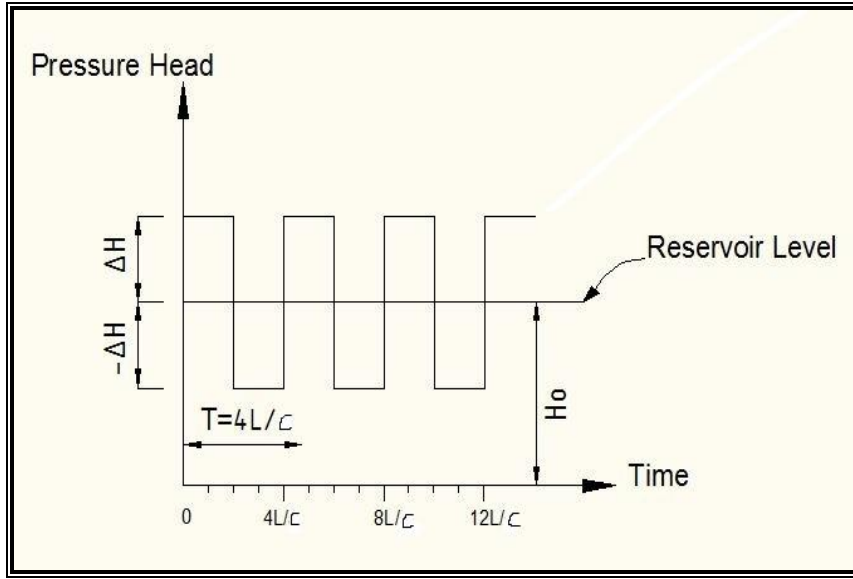
المرحلة الرابعة: $(3 \frac{L}{c} \leq t \leq 4 \frac{L}{c})$

بمجرد وصول الموجة السالبة إلى الخزان تحدث حالة عدم الاستقرار، ويكون في هذه الحالة الضغط في الخزان أعلى منه في الناقل وبالتالي يبدأ السائل بالجريان من الخزان إلى الناقل بسرعة (V_0) وتنتشر موجة ضغط موجبة باتجاه السكر ويعود الضغط (H_0) كما في الشكل (9):



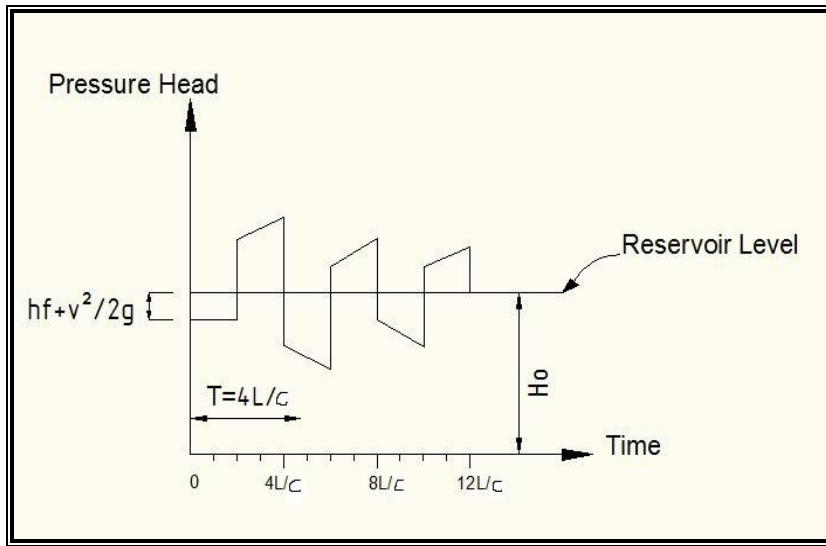
شكل (9) المرحلة السابعة $(t=4L/c)$

وبما أن السكر مغلق كلياً فتعاد جميع العمليات السابقة ويتم تكرارها ابتداءً من اللحظة الزمنية $(t = \frac{4L}{c})$ كما يوضح الشكل (10):



شكل (10) منحنى تغير ضاغط السائل عند السكر في ظروف الجريان المثالي.

يمثل الشكل السابق ظروف الجريان المثالية، لكن في الواقع تتخادم موجة الضغط تدريجياً بسبب الاحتكاك في الناقل أثناء انتشارها وهكذا تنعدم سرعة الجريان في الناقل بعد فترة وجيزة. فإذا تم أخذ الفواقد بالحسبان يأخذ عند ذلك منحنى تغير الضاغط عند السكر الشكل (11):



شكل (11) منحنى تغير ضاغط السائل عند السكر في ظروف الجريان الحقيقي.

المرجع [1].

2.3 معادلات الجريان غير المستقر.

قبل الدخول في هذه المعادلات لابد من الإشارة إلى أنه تم التوصل إليها من خلال أخذ مجموعة من الافتراضات التي مكنت الباحثين في هذا المجال إلى اشتقاقها وهي:

1. إن الجريان ضمن الأنبوب يكون أحادي البعد كما أن توزع السرعة غير منتظم خلال المقطع العرضي للأنبوب.
 2. تعتبر جدران الأنبوب إضافة إلى السائل الجاري مرنة خطياً.
 3. العلاقات المستخدمة في حسابات الاحتكاك من أجل الجريان المستقر هي نفسها المعتمدة في حساب الجريان غير المستقر مع العلم أن هذا حتى تاريخه لم يتم إثباته بشكل دقيق.
- تعتبر معادلات الجريان غير المستقر الأساسية هي:

◆ معادلة الحركة: Equation of Motion

تنتج هذه المعادلة بشكل أساسي من تطبيق قانون نيوتن الثاني على حجم تحكم محدد من السائل في الأنبوب المدروس حيث تعتبر القوى المؤثرة في هذه الحالة و هي:

1. الوزن الذاتي للسائل.
2. قوى ضغط السائل على وجهي الجسم الطليق.
3. قوى الضغط على المحيط والنااتجة عن التغير في المقطع.
4. الإجهادات المماسية على المحيط.

وتكون المعادلة بشكلها النهائي:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \sin \alpha + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0$$

وهي معادلة تصلح للأنابيب المخروطية والأسطوانية.

إذا استعصنا عن الضغط P باستخدام مفهوم الضاغط البيزومتري H بحيث:

$$P = \rho g(H - Z)$$

نحصل على شكل آخر لمعادلة الحركة كما يلي:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0$$

◆ معادلة الاستمرار: Continuity Equation

وهي تعتمد على مبدأ انحفاظ الكتلة أي كتلة السائل الداخلة إلى حجم تحكم معين مطروح منها الكتلة الخارجة عنه تساوي مع فرق التزايد أو التناقص في كتلة السائل الموجودة داخل هذا الحجم.

وبالتالي تكون معادلة الاستمرار بشكلها العام كما يلي:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

وهي محققة للأنايبب الأسطوانية والمخروطية.

هذا ويمكن كتابة معادلة الاستمرار بدلالة الضغط P بالشكل التالي:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho \alpha^2 \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

أما إذا أخذنا هذه المعادلة بدلالة الضاغط البيزومتري نحصل على معادلة الاستمرار بشكلها النهائي كما يلي:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \sin \alpha + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

المرجع [1].

ملاحظة:

خلافاً لما ذكر أعلاه فإن العالم جوكوفسكي اعتمد في دراسته للمطرقة المائية على معادلتني: تغير كمية الحركة وعلاقة الاستمرار وحصل في النهاية على معادلته المشهورة التي أشرنا إليها سابقاً.

2. 4. طرائق حل معادلات المطرقة المائية.

وجدنا سابقاً أنّ المعادلات الحاكمة للمطرقة المائية هي معادلات تفاضلية شبه خطية قطعية أو معادلات تفاضلية جزئية غير قابلة للحل بشكل مباشر ، بالتالي وجدت طرائق متعددة لمناقشتها وحلها ورغم وجود هذه الطرق إلا أن استخدامها في الأنظمة المعقدة غير دقيق بسبب شروطها الحدية المعقدة وبالتالي تعطي حلولاً تقريبية، ومن أبرز هذه الطرق:

◆ الطريقة الحسابية.

◆ الطريقة التخطيطية.

◆ الطريقة التحليلية.

◆ طريقة المميزات.

◆ طريقة المميزات الضمنية.

◆ التحليل الخطي.

الطريقة الحسابية: (Arithmetic Method)

وهي تعتمد على إهمال الاحتكاك وأن يكون الأنبوب أفقياً وهي تشتق وتعطى كما يلي:

$$H \pm \frac{a}{g} = C$$

حيث تؤخذ الإشارة الموجبة عند حالة عودة الموجة من الخزان السفلي إلى الخزان أعلى التيار وتكون العلاقة العامة:

$$H_A + \frac{a}{g}V_A = H_B + \frac{a}{g}V_B$$

هذا وتكون الإشارة سالبة عندما ينتقل الجريان من أعلى التيار إلى أسفل التيار وبناءً عليه تعطى المعادلة بشكلها العام:

$$H_A - \frac{a}{g}V_A = H_B - \frac{a}{g}V_B$$

وذلك حسب المرجع [12].

الطريقة التخطيطية: (Graphical Method)

وقد تم اقتراح هذه الطريقة من قبل العالم الإيطالي ألفي (Allievi) في العام (1925م) وهي أيضاً تعتمد على حذف الحدود غير الخطية من معادلتى الحركة والاستمرار من خلال إلغاء الاحتكاك وحد التسارع الانتقالي، وهي من إحدى الطرق المفيدة التي تعبر عن آلية انعكاس الموجة و الجريانات العابرة في المنظومات البسيطة، هذا ويمكن إدخال الاحتكاك إذا كان مرغوباً. [1].
لكن واقع هذه الطريقة وجملتها مساوئها التالية جعلتها تنتهي ويتم استبدالها بطرق رقمية قابلة للبرمجة، أبرز هذه المساوئ:

1. المنظومات الكبيرة لا يمكن تحليلها.
2. العديد من الشروط الحدية تتم معالجتها من خلال الخطأ والتجريب.
3. افتراض أخذ الاحتكاك بالاعتبار غير دقيق في هذه الحالة. [3].

الطريقة التحليلية: (Analytical Method)

تعتمد هذه الطريقة على اعتبار معادلتى الحركة والاستمرار اللاخطيتين كمعادلات خطية ، وذلك من خلال إهمال الحدود اللاخطية والحدود القليلة الأهمية وأخذ فوائده الاحتكاك بالنسبة للسرعة. وقد تم حل هذه المعادلات من قبل كل من *Wood & Whyte* و *Streeter* وغيرهم في تحليلاتهم وحل هذه المعادلات الخطية . وتعطي هذه الطريقة كل من الضاغط الكلي والسرعة الناتجة عن انتشار موجة الضغط.[3].

أبرز طرق حل معادلات المطرقة المائية هي طريقة المميزات وهي التي سنعتمدها في الدراسة ولذلك سنتوسع في الشرح قليلاً عن هذه الطريقة:

2.5 طريقة المميزات (Characteristics Method)

تعتمد طريقة المميزات على تحويل معادلتى الحركة والاستمرار من معادلات تفاضل جزئي إلى أربع معادلات تفاضل كلي قابلة للمكاملة باستخدام طريقة الفروق المحدودة بحيث تصبح قابلة للنمذجة باستخدام الحاسب.

تمتاز هذه الطريقة بدقتها وسهولة استخدامها وتطبيق الشروط الحدية فيها كما يمكن استخدامها لأعداد المنظومات التي نواجهها في الحياة العملية بدقة ، إضافة إلى سهولة برمجتها حاسوبياً.

تحكم الجريان غير المستقر معادلتان أساسيتان هما معادلتى الحركة والاستمرار وهما معادلتان تفاضليتان تكتبان كما يلي:

$$L_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0$$

$$L_2 = V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \sin \alpha + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

تحتوي هاتين المعادلتين على متحولين مستقلين هما (x) و (t) ومتحولين تابعين هما (V) و (H) أما المتحولات الأخرى مثل المساحة أو القطر فهي فقط صفات مميزة للناقل وغير تابعة للزمن ولكنها من الممكن أن تتبع للمسافة . ونلاحظ أن الحدود التفاضلية من هذه المعادلات هي من الدرجة الأولى فقط، لذلك تسمى معادلات شبه خطية ويمكن تصنيفها إلى معادلات ناقصية (*Elliptic*) أو معادلات مكافئة (*Parabolic*) أو معادلات زائدية (*Hyperbolic*). [1].

يتم التعامل مع هذه الطريقة وفق أسلوبين:

الأول: الطريقة العامة لحل معادلات المطرقة المائية)

يعتمد على دراسة معادلتى الحركة والاستمرار بشكل كامل بدون إهمال أي حد من حدودها للوصول إلى الحل المناسب لهذه المعادلات. وقد تم الاعتماد على جمع المعادلة الأولى إلى الثانية بعد ضربها بثابت β فتصبح المعادلة كما يلي:

$$L_1 + \beta L_2 = (\beta V + g) \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda V |V|}{2D} + \beta \frac{\partial H}{\partial t} + \left(V + \beta \frac{\alpha^2}{g} \right) \frac{\partial V}{\partial x} - \beta V \sin \alpha = 0$$

وبتطبيق اختصارات وجمع بعض الحدود إلى بعضها نحصل على:

$$L_1 + \beta L_2 = \beta \left[\left(\frac{g}{\beta} + V \right) \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[\left(\beta \frac{\alpha^2}{g} + V \right) \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right] - \beta V \sin \alpha + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0$$

من المعادلة السابقة نلاحظ أنه إذا تحقق الشرط:

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{g}{\beta} = V + \frac{\alpha^2}{g} \beta$$

يمكن تحويل المعادلة السابقة إلى معادلة تفاضل كلي من الشكل:

$$\beta \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} - \beta V \sin \alpha + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0$$

وبالتالي تكون قيمة الثابت (b) في هذه الحالة كما يلي:

$$\beta^2 = \frac{g^2}{C^2} \rightarrow \beta = \pm \frac{g}{C}$$

وبالتالي يصبح لدينا العلاقة الرابطة بين (x) وبين (t):

$$\frac{dx}{dt} = V \pm C$$

و بعد التعويض نحصل على زوجين من المعادلات نطلق عليهما الرمزین (C⁻ & C⁺).

$$\frac{g}{\alpha} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} - \frac{g}{\alpha} V \sin \alpha + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0$$

} C+

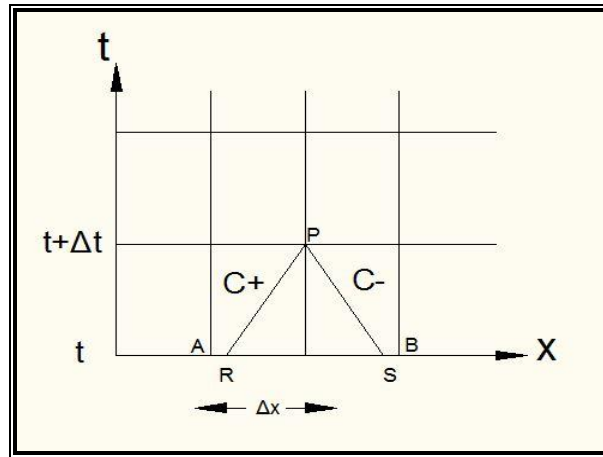
$$\frac{dx}{dt} = V + C$$

$$-\frac{g}{\alpha} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{g}{\alpha} V \sin \alpha + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0$$

} C-

$$\frac{dx}{dt} = V + C$$

وبين الشكل (12) حالة المميزات:



شكل (12) شبكة المميزات المعقدة.

نجري عملية مكاملة للمعادلات السابقة وذلك بعد الضرب بـ (dt) فنحصل على معادلات

المميزات بشكلها النهائي والمختصر:

$$H_P = C_P - B_R Q_P$$

$$H_P = C_M + B_R Q_P$$

حيث يتم استخدام فترة زمنية ثابتة (Δt) للحسابات أي:

$$t_p - t_R = t_p - t_S = \Delta t$$

حيث:

$$C_P = H_R + Q_R \left(B_R + \frac{\Delta t}{A} \sin \alpha - \frac{\lambda \alpha_R \Delta t}{2gDA^2} |Q_R| \right)$$

$$C_M = H_S - Q_S \left(B_S + \frac{\Delta t}{A} \sin \alpha - \frac{\lambda \alpha_S \Delta t}{2gDA^2} |Q_S| \right)$$

وتعطى قيمة B بشكل عام بالعلاقة التالية:

$$B = \frac{C}{gA}$$

إن الهدف الأساسي من هذه الطريقة هي تحديد قيمة الغزارة والضاغط في كل نقطة من نقاط الجريان عند حدوث موجة الضغط ، وبالتالي نحصل على كل من قانون الغزارة والضاغط بالعلاقات التالية:

$$Q_R = \frac{Q_C - N_R(Q_C - Q_A)}{1 + \frac{\theta}{A}(Q_C - Q_A)}$$

$$Q_S = \frac{Q_C - N_S(Q_C - Q_B)}{1 - \frac{\theta}{A}(Q_C - Q_B)}$$

أما الضاغط لكل عقدة فيحسب من العلاقات التالية:

$$H_R = H_C - \left(\frac{Q_R}{A} \theta + N_R \right) (H_C - H_A)$$

$$H_S = H_C + \left(\frac{Q_S}{A} \theta - N_S \right) (H_C - H_B)$$

حيث:

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

$$N = C \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

الثاني: (الطريقة التقريبية)

يعتمد على إهمال بعض الحدود الثانوية من معادلتى الحركة والاستمرار السابقتين

والمقصود بها الحدين التاليين:

$$V \frac{\partial V}{\partial x} \text{ و } V \frac{\partial H}{\partial x}$$

وتسمى الطريقة في هذه الحالة طريقة المميزات التقريبية [1].

حيث نحصل على معادلات المميزات في هذه الحالة بالعلاقات التالية:

$$C + : H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_A|Q_A|$$

$$C - : H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) - RQ_B|Q_B|$$

حيث:

$$R = \frac{\lambda \Delta X}{2gDA^2}$$

$$B = \frac{C}{gA}$$

طبعاً نتوصل في هذه الحالة إلى علاقة تحكم بين (x) وبين (t) هي:

$$\frac{dx}{dt} = \pm C$$

أي تهمل سرعة الجريان في الأنابيب لصغرهما مقارنة مع سرعة انتشار موجة الضغط.

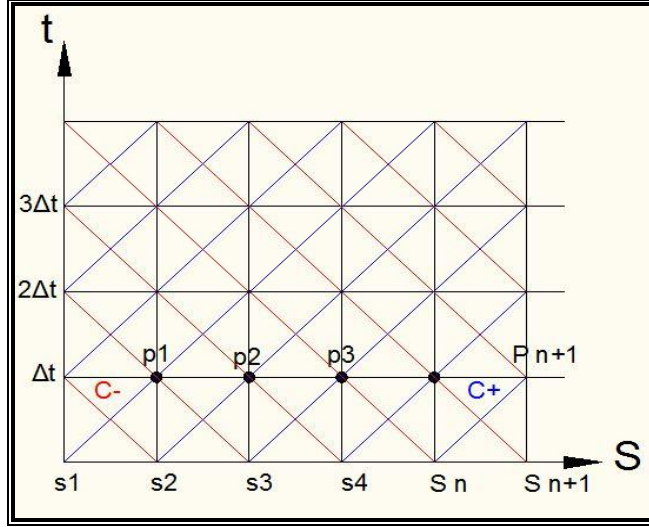
ونحصل في النهاية على قيم الغزارة والضاغط المتغيرة مع الزمن في كل لحظة أثناء انتشار الموجة

وفق العلاقات التالية:

$$Q_P = \frac{C_P - C_M}{2B}$$

$$H_P = \frac{C_P + C_M}{2}$$

وبالتالي سنجد شبكة المميزات الواصلة إلى النقاط مبينة بالشكل (13):



شكل (13) شبكة المميزات البسيطة.

وهي الطريقة التي استخدمناها في العمل باستخدام الإكسل.

2.6 سرعة انتشار موجة الضغط. (Wave Speed)

كما نوهنا سابقاً تعود دراسات سرعة انتشار موجة الضغط في الأنابيب اعتماداً على

جوكوفسكي من خلال معادلتني الحركة والاستمرار، كما تم بين العامين (1876-1877م) على يد

العالمين راسيل وموينز (*Moens* و *Resal*) بقدهي شكل من أشكال العلاقات المستخدمة في

حساب السرعة كما يلي:

$$C_{Moens} = \alpha \sqrt{\frac{E \cdot e}{\rho_f \cdot D}}$$

حيث e سماكة جدران الناقل (m).

E معامل يونغ للمرونة (N/m^2).

D قطر الأنبوب (m).

ρ_f الكتلة النوعية للسائل المدروس (kg/m^3).

α عامل يأخذ قيمة مقدارها 0.9 وتصلح هذه المعادلة من أجل موجات الضغط المنتشرة في

الأنابيب الأسطوانية المرنة المطاطية:

$$\frac{1}{C_f^2} = \frac{1}{C_o^2} + \frac{1}{C_1^2}$$

حيث كل هذه الثوابت ذات قيمة كالتالي:

$$C_1 = \sqrt{\frac{E \cdot e}{\rho_f \cdot D}} = C_{Resal}$$

$$C_o = \sqrt{\frac{K}{\rho_f}}$$

$$C_f = \frac{C_o}{\sqrt{1 + \frac{K}{E} \cdot \frac{D}{e}}} = C_{Korteweg}$$

كما قدم العالم *Weber* علاقة لحساب سرعة انتشار موجة الضغط كما يلي:

$$C_{Weber} = \sqrt{\frac{D}{4K \cdot \rho_f}}$$

نلاحظ مما سبق اختلاف العلاقات النازمة لسرعة انتشار موجة الضغط تبعاً لطبيعة

الناقل ومواصفاته، حيث تلعب المرونة وسماكة الجدران وطبيعة وصل الناقل على أرض الواقع دوراً هاماً في تحديدها . وقد نوقشت حالات متعددة في مختلف المراجع وفي حالتنا نناقش على أرض الواقع أنابيب متنوعة، فالأنابيب ضمن البئر من نوع الفولاذ المزيبق والأنابيب الواصلة بين الآبار من نوع البولي إيثيلين . ويتم اعتبار الأنابيب موثوقة في نقاط اتصالها مع المضخات ومع الخزان، أما بين نقاط الأنابيب المختلفة يتم اعتبارها نقاط فواصل تمدد بين الأنابيب وليست وثاقات. وتعطى المعادلة بشكل عام حسب [1] معطاة بالعلاقة التالية:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{Ee} a}}$$

حيث a ثابت يمكن أن يأخذ قيماً تبعاً لتصنيفات متنوعة منها:

1. تبعاً لطريقة الاستناد:

$a = 1$ فهي تعني حالة وجود فواصل تمدد في الأنبوب.

$a = 1 - \mu^2$ فهي تعني حالة تثبيت كامل للأنبوب.

$a = 1 - \frac{\mu}{2}$ فهي تعني حالة تثبيت في بداية الناقل.

2. تبعاً لطريقة التثبيت على أرض الواقع أيضاً [1]:

$a = 1$ أيضاً لحالة فواصل تمدد على طول الأنبوب.

$a = 1 - \mu^2$ حالة الأنبوب المقيد بشكل كامل.

$a = \frac{5}{4} - \mu$ حالة التثبيت في أعلى الناقل.

حيث μ : عامل بواسون ويؤخذ من الجداول حسب نوعية المادة حيث لدينا جداول مختلفة توضح قيم هذا العامل إضافة إلى قيم معامل الانضغاطية وقيم معامل يونغ للمرونة والكتلة النوعية للمادة وذلك تبعاً للخصائص الفيزيائية لجدار الأنبوب المستخدم:

الجدول (1) الخصائص الفيزيائية للأنبوب.

Material	Poisson's ratio	Shear modulus G(GN/m ²)	Young's modulus E(GN/m ²)
Gray cast iron	0.3	41.4	89.6
Ductile iron	0.3	82.7	172.4
Steel	0.3	82.7	207
Reinforced concrete	-	-	30-60
Asbestos cement	-	-	23.44
Concrete	0.15	-	20-30
uPVC (at 20 c)	0.5	1.10	3.31

يضاف لدينا الجدول التالي الذي يوضح قيم الكتلة النوعية ومعامل الانضغاطية تبعاً لنوعية السائل المستخدم إضافة إلى درجة الحرارة السائدة:

الجدول (2) الكتلة النوعية و معامل الانضغاطية.

Liquid	Temperature(c)	Bulk modulus K(GN/m ²)	Density ρ (Kg/m ³)
Water	20	2.193	998
Sulphurica acid	30	2.7	1330
Methanol	20	1.0	791
Mineral oils	25	1.5 to 1.9	863 to 886
Water-glycol fluids	25	3.108	1072
Phosphate esters	25	0.9 to 0.96	1264 to 1317

المرجع [1].

كما يمكن بيين الجدول (3) هذه القيم حسب بعض المراجع الأخرى:

الجدول (3) قيم معامل بواسون ومعامل المرونة.

Material	E (lb/in ²)	Poisson ratio μ
Steel	30×10^6	0.30
Ductile cast iron	24×10^6	0.28
Copper	16×10^6	0.36
Brass	15×10^6	0.34
Aluminum	10.5×10^6	0.33
PVC	4×10^5	0.45
Fiberglass-reinforced plastic	$E_2 = 4 \times 10^6$ $E_1 = 1.3 \times 10^6$	$\mu_2 = 0.27-0.30$ $\mu_1 = 0.20-0.24$
Asbestos Cement	3.4×10^6	0.30
Concrete	$57,000 \sqrt{f'_c}$ $f'_c = 28\text{-day strength}$	dynamic value 0.24

[1].

يمكن أن نصادف في الحياة العملية أنابيب من الخرسانة المسلحة فلحساب سرعة انتشار موجة الضغط في هذه الأنابيب يتم الاستعاضة عن هذه المقاطع الخرسانية بأخرى من الفولاذ وفق العلاقة التالية:

$$A_{\text{Steel}} = \frac{E_{\text{concret}}}{E_{\text{Steel}}} A_{\text{Concret}}$$

في حالة الأنبوب ذي الجدار الثخين سنجد أيضاً اختلاف قيمة سرعة انتشار موجة الضغط أيضاً حسب حالة توضع الأنبوب.

ففي حالة الأنبوب الموثوق من الأعلى فقط سنجد قيمة الثابت:

$$C = \frac{1}{1 + \frac{e}{D}} \left[\left(\frac{5}{4} - \mu \right) + \frac{2 \cdot e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D} \right) \right]$$

أما لحالة الأنبوب المقيد والممنوع تماماً من الحركة:

$$C = \frac{1}{1 + \frac{e}{D}} \left[(1 - \mu^2) + \frac{2 \cdot e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D} \right) \right]$$

أما الأنبوب الحاوي على جملة من فواصل التممدد تكون علاقة السرعة كما يلي:

$$C = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon}{D}} \left[1 + \frac{2 \cdot e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D} \right) \right]$$

المرجع [1].

وحسب أطروحة الدكتوراة للعالم **موينز (Moens)** فإنه و بشكل عام تتعلق سرعة انتشار موجة الضغط بجملة من العوامل التي أبرزها أثناء بحثه أهمها:

- 1 - تأثير الضغط الستاتيكي.
- 2 - تأثير قطر الأنبوب.
- 3 - تأثير عامل يونغ.
- 4 - تأثير سماكة جدران الأنبوب.
- 5 - الكتلة النوعية للسائل.
- 6 - الكتلة النوعية لمادة الأنبوب.

وهذا ما أوضحته المعادلة السابقة التي ذكرناها.

المرجع [20].

2-7. الدراسة التحليلية والشروط الحدية (Boundary Conditions)

تتنوع الشروط الحدية باختلاف المسائل التي يتم تناولها والحالات التي نواجهها وبشكل عام

سنجد في مسألتنا المدروسة جملة الحالات التالية:

- 1 - المضخة المتوضعة في أسفل كل بئر.
 - 2 - الخزان العلوي في أعلى المنظومة.
 - 3 - تغيير الأنابيب من حيث الأقطار ونوعية المادة المؤلفة منها.
 - 4 - التقاء جملة أنابيب أو أنبوبين حسب كل حالة وصل واجهها في المنظومة.
- بشكل عام كل حالة تم فيها ربط مختلف للأنابيب تناقش شرطاً حدياً مختلفاً تتم دراسته في وقته وسنناقش الحالات التالية للشروط الحدية بالتالي:

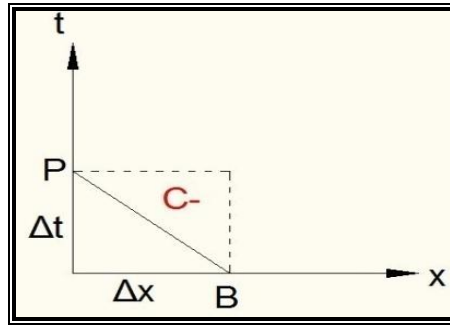
1. وجود مضخة في أسفل كل بئر:

تتشكل المطرقة المائية في حالتنا نتيجة انقطاع التيار الكهربائي عن محرك المضخة وهي تدعى حسب المصطلحات الأجنبية حالة (*Pump Failure*) أو انهيار المضخة.

وفقاً لطريقة المميزات فإنه وحسب توضع المضخة لدينا فقط مميزة واحدة سالبة تصل إلى المضخة أي C_M تعطى بالعلاقة التالية:

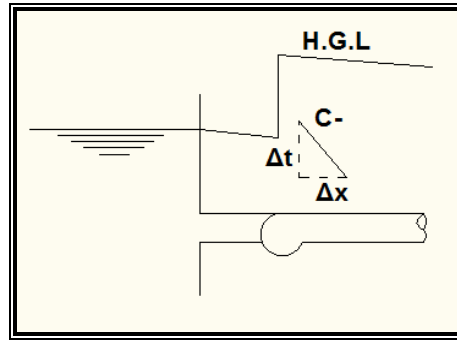
$$C_M = H_B - Q_B \left(B_B + \frac{\Delta t}{A} \sin \alpha - \frac{\lambda \alpha_s \Delta t}{2gDA^2} |Q_S| \right)$$

ونلاحظ ذلك وفق الشكل (14):



شكل (14) مميزة سالبة واصلة بالمضخة أسفل البئر .

تتناقش مسألتنا مضخة تضخ المياه من حوض امتصاص ثابت المنسوب وهو البئر:



شكل (15) مضخة بالقرب من خزان ثابت.

وأهم خطوة في دراسة انهيار المضخة هي معرفة المنحنيات المميزة للمضخة والتي تشمل

ضاغط المضخة والغزارة وعزم الدوران والمردود وضغط التبخر.

إن توقف المضخة بشكل مفاجئ يؤدي إلى تناقص سرعة دورانها من لحظة الانقطاع إلى

التوقف النهائي وهذا يؤثر على كل من الغزارة والضاغط وعزم الدوران المرتبطين بها.

إن علاقات التشابه الخاصة بالمضخة تعطى وفق العلاقات:

$$\frac{Q}{N} = \text{constant}$$

$$\frac{h_p}{N^2} = \text{constant}$$

$$\frac{T}{N^2} = \text{constant}$$

ترتبط غزارة المضخة وسرعة دوران محركها المتناقصة مع الزمن كالتالي:

$$Q_i = Q_0 \frac{N_i}{N_0}$$

وبناء على هذا يرتبط تغير الضاغط مع سرعة الدوران بالعلاقة التالية:

$$h_{pi} = h_{p0} \left(\frac{N_i}{N_0} \right)^2$$

"عند انقطاع الطاقة المقدمة لمضخة عاملة تبدأ عند ذلك سرعة دوران المضخة بالتلاشي بفعل الضغط الخارجي. يتناسب معدل تباطؤ سرعة دوران المضخة في أي لحظة عكساً مع عزم عطالة الأجزاء الدائرة من المضخة والمحرك وطردياً مع عزم الدوران المطبق على دافع المضخة" المرجع [1].

$$T = -I \frac{dw}{dt}$$

حيث w سرعة دوران المضخة (rpm).

يمكن تحديد قيمة عزم العطالة باستخدام العلاقة التالية وهي تربط عزم العطالة باستطاعة المضخة وسرعة دورانها وهي حسب المرجع [1]:

$$I = 1818 \left(\frac{H_p}{N} \right)^{1.48}$$

إنَّ شرط استخدام العلاقة السابقة أن تكون الاستطاعة مقدرة بالحصان البخاري وقيمة سرعة الدوران بالراديان في الثانية أو الدقيقة.

كما ويمكن الحصول على قيمة عزم العطالة من مواصفات المضخة حسب الشركة الصانعة في حال كانت تقدمها.

يمكن من المنحني المميز للمضخة استنتاج علاقة تغير عزم الدوران حسب الغزارة والضاغط باتباع العلاقة التالية:

$$T_R = \frac{60 \cdot \gamma \cdot H_R \cdot Q_R}{2 \cdot \pi \cdot N_R \cdot \eta_R}$$

تحتسب هذه القيمة عند نقطة عمل المضخة في الحالة المثالية وتعتبر هذه القيمة المحسوبة ثابتة طوال زمن موجة الضغط، وبالتالي تتناقص قيمة سرعة دوران المضخة مع الزمن وفق العلاقة التالية:

$$N_{i+1} = N_i - \frac{60.T(t).\Delta t}{2.\pi.I}$$

تأخذ معادلة توازن الضغوط في هذه الحالة بالقرب من المضخة الشكل التالي:

$$H_r + H_{pump} - \Delta H = H_p$$

H_{pump} الضاغط الذي تقدمه المضخة ويعطى بدلالة الغزارة عند أية سرعة دوران بالعلاقة التالية في حال أخذ من الدرجة الثانية:

$$H_{pump} = A_0 + A_1.Q + A_2.Q^2$$

ΔH الفاقد في الطاقة خلال سكر تصريف المضخة ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta H = K.Q_p^2$$

H_p الضاغط عند المقطع بعد المضخة مباشرة ويعطى بدلالة الغزارة من المعادلة المميزة السالبة للمطرقة المائية:

$$H_p = C_M + B.Q_p$$

في حالتنا تم استخدام مضخات من نوع (*JET*) وبالتحديد المنحني رقم (36) أو كما يعرف حسب المخططات (*RB8X/36+8P125*)، ولرسم هذا المنحني بشكل صحيح تمت الاستعانة ببرنامج *GRAPH* كما سيتم الشرح في الفقرة التالية علماً أن ضاغط المضخة هو بشكل عام مجموع فرق المنسوب إضافة إلى الفواقد كما توضح العلاقة التالية:

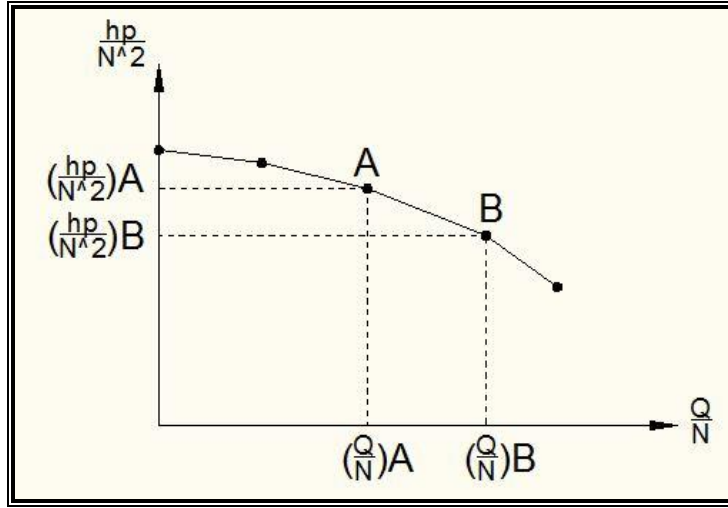
$$H_p = H_{St} + \Delta H$$

رسم المنحني المميز للمضخة:

من المعروف أن المنحني المميز للمضخة هو منحني من الدرجة الثانية أو درجات أعلى عندما يراد الرسم بشكل أكثر دقة في أخذ النقاط. يمكن تقسيم المنحني المميز للمضخة إلى جملة من المستقيمات الواصلة بين الضواغط والغزارات المقدمة ، وذلك حسب مقدار التغير في الغزارة المتناقصة مع الزمن بحيث تكون معادلة المنحني المميز للمضخة هي مستقيم من الدرجة الأولى .

وهذا يسهل علينا الحسابات في العمل فبدلاً من مقاطعة مستقيم مع منحني من الدرجة الثانية لنحصل منها على عدة نتائج لا نعرف منها الأصلح للاستخدام. ذلك أننا في لحظة معينة من الزمن لا نعرف مثلاً هل ستكون السرعة هنا موجبة أم سالبة؟ وذلك لصعوبة تقدير وتوقع ما يجري فعلاً ضمن الأنبوب، وبالتالي إننا نضمن بهذه العملية الحصول على قيمة واحدة للسرعة والغزارة بعد المضخة مباشرةً وذلك بتقاطع معادلة المضخة مع المميزة السالبة. حيث نحصل على معادلتين بمجهولين هما الغزارة والضاغط أو السرعة والضاغط مباشرةً بقيمة موجبة أو سالبة وهذا ما تم بالفعل في المنحني المميز للمضخة الذي أُستخدِم في حالتنا.

حيث تم تقسيم المنحني المميز للمضخة بدءاً من نقطة عملها وبشكل مستقيمات وحسب قيم تناقص الغزارة مع الزمن حتى تتعدم بشكل نهائي كما يبين الشكل (16):



شكل (16) المنحني المميز للمضخة.

من المنحني المميز للمضخة نحصل على قيم الغزارة مع الضاغط، ومن أجل الرسم باستخدام برنامج *Graph* تمت الاستعانة بالنقاط المساعدة:

الجدول (4) تحديد المنحني المميز للمضخة.

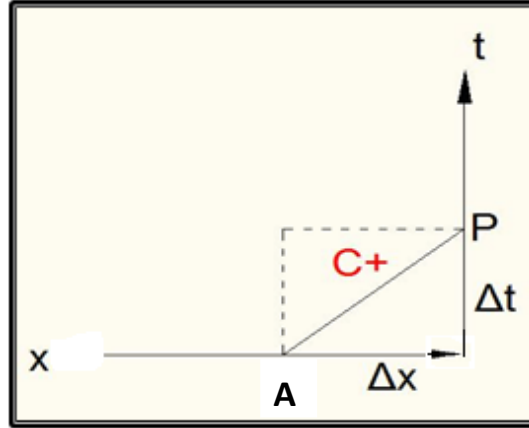
الغزارة (L/sec)	الضاغط (m)
2.5	750
4.17	720
5	710
6.67	690
8.33	630
10	575

11.67	490
13.33	340

1. خزان مائي محدد المنسوب:

تصل الخزان العلوي حسب طريقة توضع وحسب مبدأ المميزات مميزة واحدة موجبة فقط

أي من نوع CP كما يبين الشكل (17):



شكل (17) مميزة موجبة تصل إلى الخزان العلوي.

وقد اعتُبر أن الأنبوب يصل إلى الخزان من الأسفل، وأنه حسب الحالة لدينا الجريان يتجه

نحو الخزان فتضيع الطاقة الحركية للسائل كافة ويكون الشرط الحدي:

$$H_P = H_R$$

حيث H_R هو منسوب الماء في الخزان عن منسوب مقارنة محدد.

وتكون قيمة الغزارة الواصلة إلى الخزان معطاة بالعلاقة التالية:

$$Q_P = \frac{C_P - H_P}{B}$$

وقد تم الأخذ بعين الاعتبار في البرنامج المكتوب على الإكسل حالتين: الأولى على اعتبار

مشاركة الخزان بالجريان العكسي، والثانية على اعتبار عدم مشاركته أي انعكاس الجريان من

الخزان ممنوع وذلك عندما تظهر لدينا قيم سرعة سالبة، أي عندما يرجع الجريان من الخزان إلى

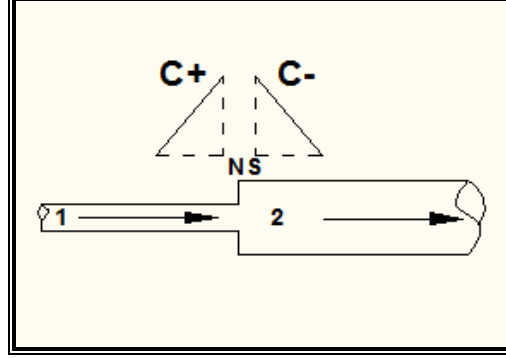
الأنبوب. ولتنفيذ ذلك فيزيائياً باستخدام الإكسل نضع شرطاً حدياً يأخذ قيمة السرعة صفر عندما

يصبح معدل الجريان سالباً عند الخزان ويعتبر هذا العمل فيزيائياً على أرض الواقع بمثابة وضع

سكر عدم رجوع للمياه.

2. وصلة على التسلسل لناقلين:

حيث إن وجودها طبيعي هنا لاختلاف الأقطار بين الأنابيب ضمن البئر والأنابيب الواصلة إلى الخزان، إضافة إلى اختلاف طبيعة مادة الأنبوب. يمثل الشكل (18) وصفاً للحالة:



الشكل (18) وصلة على التسلسل لناقلين.

طبعاً إن أول شرط يحكم الحالة هو توازن الضغوط: $H_{P1} = H_{P2}$

وبناءً على المميزات يمكن حساب الضاغط عند العقدة سواءً من المميزات السالبة أو الموجبة وستعطي نفس الضاغط:

$$H_{P1} = C_{P1} - B_1 \cdot Q_{P1}$$

$$H_{P1} = C_{M2} + B_2 \cdot Q_{P2}$$

أيضاً لدينا معادلة الاستمرار عند العقدة : $Q_{P1} = Q_{P2}$

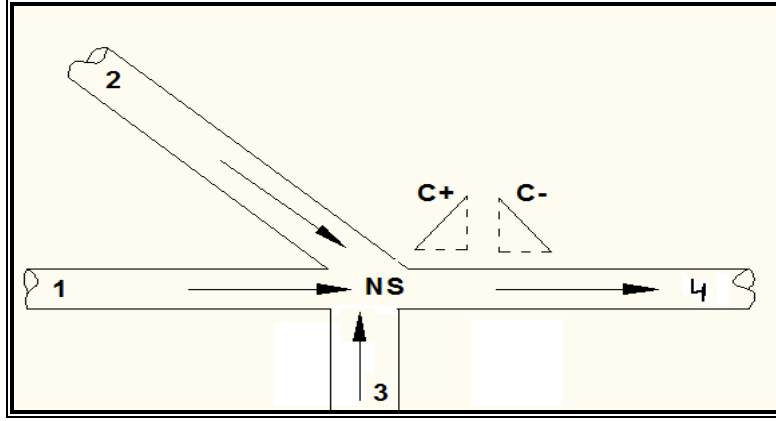
وبالتالي نحصل على الغزارة في كل من الأنبوبين عند العقدة كالتالي:

$$Q_{P2} = Q_{P1} = \frac{C_{P1} - C_{M2}}{B_1 + B_2}$$

3. وصلة تفرع:

وهي أي عقدة ضمن الشبكة يتفرع عندها عدد من الأنابيب. وقد واجهناها ضمن المشروع كأحدى الحالات المدروسة، حيث تم ربط الآبار الثلاثة إلى نفس العقدة، حيث يصلها ثلاث مميزات موجبة ومميزة واحدة سالبة.

يوضح الشكل (19) شكل العقدة:



الشكل (19) وصلة تفرع.

فتكون معادلة توازن الضغوط:

$$H_{P1} = H_{P2} = H_{P3} = H_{P4}$$

أيضاً لدينا معادلات الغزارات بالاعتماد على المميزات كالتالي:

$$Q_{P1} = \frac{C_{P1}}{B_1} - \frac{H_P}{B_1}$$

$$Q_{P2} = \frac{C_{P2}}{B_2} - \frac{H_P}{B_2}$$

$$Q_{P3} = \frac{C_{P3}}{B_3} - \frac{H_P}{B_3}$$

$$-Q_{P1} = \frac{C_{M4}}{B_4} - \frac{H_P}{B_4}$$

وبإدخال معادلة الاستمرار عند العقدة سنجد الضاغط عند العقدة:

$$H_P = \frac{\frac{C_{P1}}{B_1} + \frac{C_{P2}}{B_2} + \frac{C_{P3}}{B_3} + \frac{C_{M4}}{B_4}}{\sum \left(\frac{1}{B_i} \right)}$$

العلاقات المستخدمة في النمذجة على الحاسوب:

لدينا في كل نقطة على شبكة المميزات مميزة سالبة وأخرى موجبة تتقاطع في تلك النقطة

وباستخدام معادلاتي الحركة والاستمرار السابقين نخلص إلى العلاقات التالية في الحساب والتي

تعتمد على الغزارة والضاغط في الحسابات حيث سنجد معادلات المميزات الموجبة والسالبة:

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1} | Q_{i-1} |$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1} | Q_{i+1} |$$

وباختصار الغزارة من المعادلتين السابقتين نحصل على الضاغط من العلاقة:

$$H_p = \frac{C_p + C_M}{2}$$

ولتطبيق هذا الحل نحتاج إلى معطيات أولية ليتم الحصول عليها بالحساب المباشر، وهي

مقدمة من قبل مؤسسة المياه في السويداء، أُعتمد في حسابها على برنامج الإيبانيت (EPANET2) الذي يعطي قيم الضواغط والغزارات عند كل عقدة، وسنعتد هذه القيم في الحل باستخدام الإكسل.

يجب اعتماد تقسيمات للأنايبب الواصلة إلى البئر ويتم تحديدها بالعلاقة:

$$N = \frac{L}{\Delta S}$$

L طول الأنبوب الكلي (م).

ΔS طول الجزء من الأنبوب.

N عدد تقسيمات الأنبوب.

أي نسبة قيمة الطول الكلي للأنبوب إلى قيمة التباعد بين العقد والتي نرضها.

نعتمد هذه القيم الأولية في الحسابات باستخدام الإكسل لحساب القيم المطلوبة خلال الزمن الكلي لحدوث موجة الضغط، حيث سننطلق من هذه المعلومات، ولحل كل بئر على حدة ثم متكامل مع باقي الآبار في حالات التوصيل المختلفة.

تحديد الخطوة الزمنية:

إن أهم عملية في العمل على الإكسل تحديد قيمة الزمن الذي ستعتمده في الحساب

لانتشار الموجة وننطلق في ذلك من العلاقة الأساسية وهي:

$$\text{السرعة} = \frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}}$$

حيث المسافة تمثل كامل مسار الأنبوب بدءاً من البئر وحتى الخزان.

أما السرعة فهي سرعة انتشار موجة الضغط عبر الأنبوب ونختار السرعة الكبرى طبعاً بين

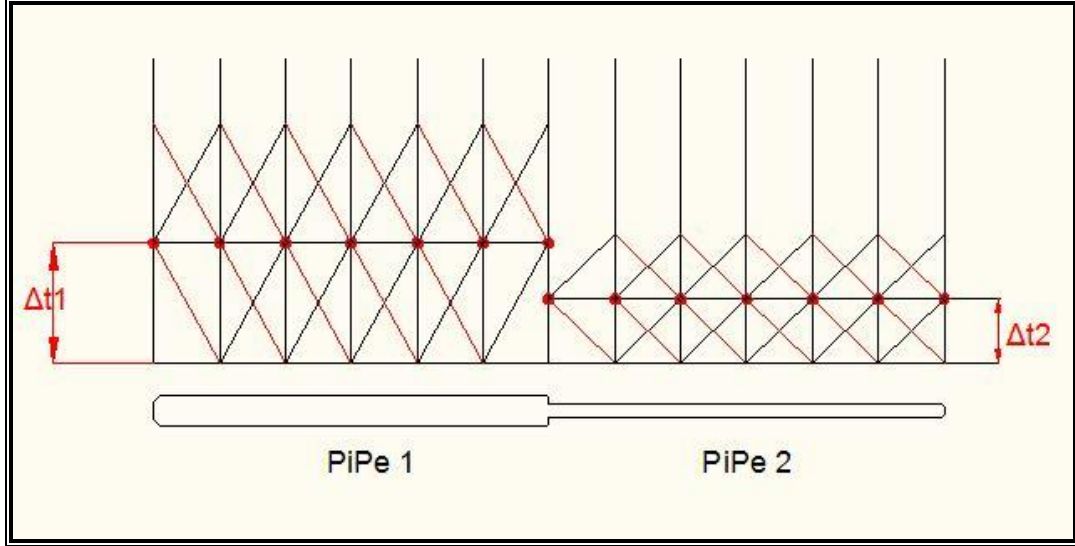
كل الأنايبب وهي التي نجدها في الفولاذ المزيبق حيث تصل إلى 1300 م/ثا تقريباً. طبعاً في العمل

يجب أن تتلاقى المميزتان الموجبة والسالبة في نفس النقطة، ولكن في الواقع هذا لا يحصل وذلك

بسبب اختلاف الميل لكل مميزة والمرتبطة أساساً مع نوع الأنبوب والقطر وفي حالتنا لدينا اختلاف

في الأقطار على طول المسار، بالتالي سنواجه حالة اختلاف الميل للمميزات المتلاقية في نفس

النقطة. كما أن هناك مشكلة أخرى يمكن أن نفكر فيها هي عدد التقطيعات التي سنحصل عليها في كل أنبوب بسبب اختلاف الطول اختلاف التقسيمات للأنايبب حيث يمكن أن نحصل على ثلاثة أقسام أو أربعة أقسام في كل أنبوب ، وبالتالي لن يكون هناك التقاء تماماً في نفس النقطة إنمسنحصل على الشكل (20):



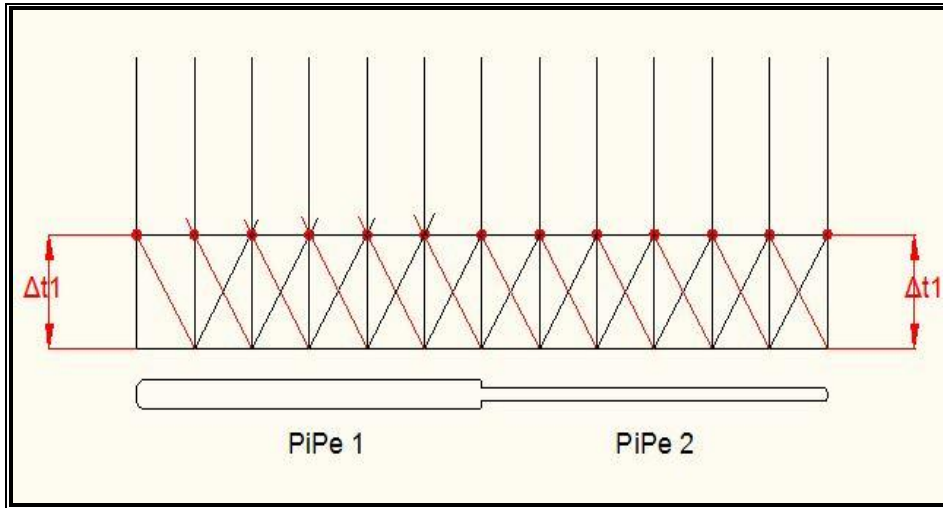
شكل (20) تحديد الخطوة الزمنية.

ولتلافي الوقوع في هذه المشكلة يتم الحل بتقسيم الطول المختار على أكبر قيمة لسرعة موجة الضغط كما في العلاقة التالية

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{\max|V + a|}$$

تمثل السرعة في العلاقة السابقة قيمة السرعة الأولية ضمن الأنبوب قبل تشكل موجة

الضغط. إن تطبيق هذه العلاقة يحدد الزمن الواجب اتخاذه في العمل وهذا الزمن يمثل الزمن الأصغري عملياً الذي نحصل عليه لأننا نقسم على أكبر سرعة وهي التي تجري في الفولاذ المزييق وبالتالي نسميه الأنبوب المتحكم في العمل وبهذا نكون قد ساهمنا في جعل المميزات تلتقي في ذات النقطة تقريباً كما في الشكل (21):



شكل (21) تحديد الزمن.

طبعاً مع الانتباه إلى تقسيم الطول لكل أنبوب بشكل مختلف عن الآخر مثلاً الأول ب 6 أجزاء والثاني ب 4 أجزاء كمثال وهذا يساعد أيضاً في الالتقاء لكن العمل الأساسي هو من خلال الأنبوب المتحكم وهو الذي يعطي أصغر زمن.

2-8. دراسة التكيف في الناقل.

تعرف ظاهرة التكيف بأنها عملية غليان الماء في درجة الحرارة العادية نتيجة انخفاض الضغط عند مقطع معين من الناقل.

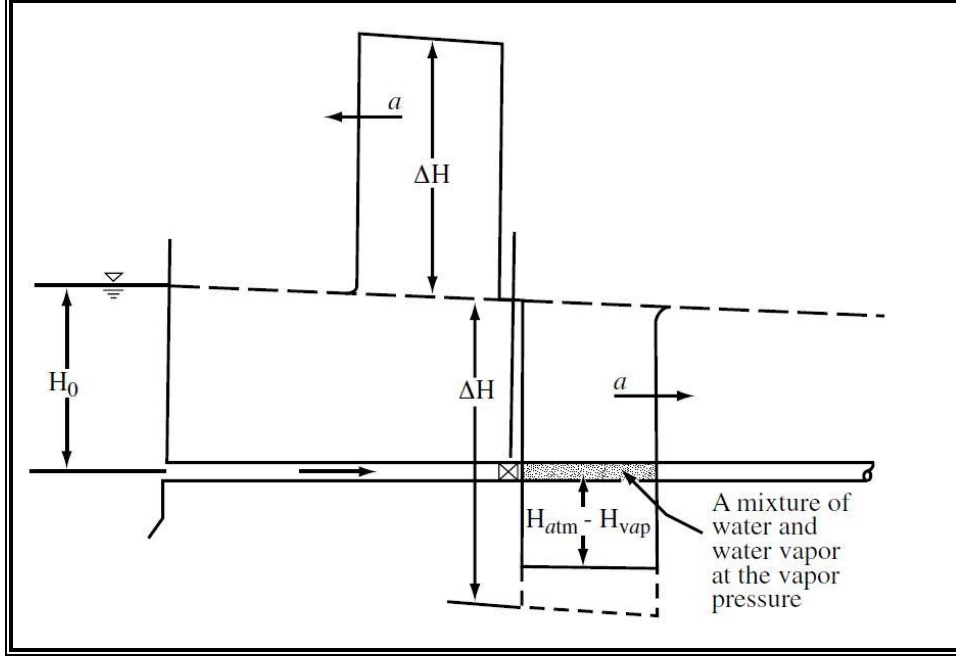
عندما تتشكل المطرقة المائية في الأنابيب لسبب من الأسباب قد يحدث انخفاضاً في الضغط، وقد يصل إلى قيمة ضغط التبخر للسائل في الأنبوب وذلك ضمن مناطق معينة مثلاً عند وجود نقاط مرتفعة في الناقل (*High Point*) أو في النهايات المغلقة (*Closed Ends*)، وبالتالي يتشكل ضمن الأنبوب بخار ماء أو هواء تؤثر على سلوك الجريان في حال كان هذا الانخفاض في الضغوط كبيراً قد يؤدي إلى تشكل ضغط محلي يصل إلى تشكل ضغط التبخر عندها يغلي السائل (يتكيف أو يتبخر) ويتسبب ذلك بوجود جيوب هوائية كبيرة من الغازات غير المنحلة والبخار وتحدث ظاهرة خطيرة تسمى انفصال عمود السائل (*Column Separation*).

والجدير بالذكر أنه يمكن أن نعزو تشكل هذه الظاهرة إلى سببين أساسيين:

أولاً إن عمود السائل يكون غير متجانس فقسم منه مائي والآخر هوائي بسبب وجود هذه الفجوات.

ثانياً حدوث تغير أساسي في سرعة انتشار موجة الضغط بسبب وجود هذه الغازات والفقاعات الهوائية التي تؤثر على انضغاطية السائل.

إن الشكل التالي يبين لنا هذه الظاهرة وهو مأخوذ من المرجع (1) يبين منطقة تشكل الغازات في الناقل مقارنةً بالضاغط الناتج عن انتشار موجة الضغط الأساسية طبعاً إن التشكل الأساسي ناتج عن إغلاق السكر في نهاية الأنبوب المبين في الشكل (22):

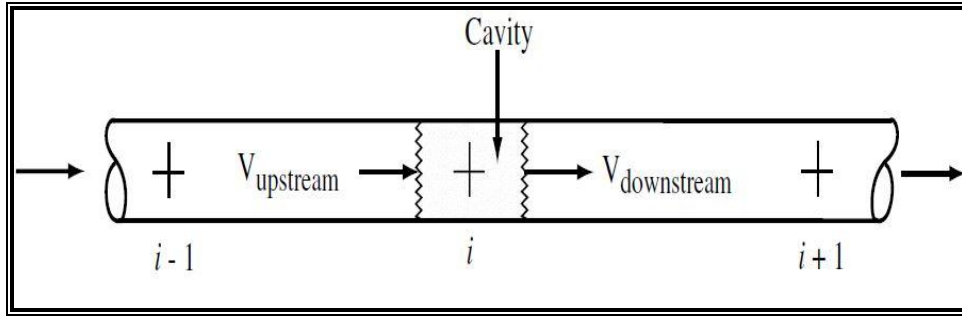


شكل (22) الموجة الواردة في حالة التكهف.

ما يهمنا عند دراسة هذه الظاهرة هو تحديد السرعة بين المقطعين قبل وبعد التكهف وذلك بسبب اختلاف السرعة بين المقطعين المدروسين. إن اختلاف السرعة يتم نتيجة تغير الضغط الذي يصل إلى قيم سالبة لكن لا تتجاوز أقل قيمة للضغط وهي (-10)، وللتخلص من هذه القيمة السالبة يجب إضافة ضاغط معين إلى القيمة الأساسية السالبة باستخدام العلاقة التالية:

$$\Delta H = \frac{a}{2g} (V_{Upstream} - V_{Downstream})$$

تتم إضافة القيمة السابقة إلى قيمة ضغط التكهف عند النقطة المدروسة كما يبين الشكل (23):



شكل (23) الأنبوب في حالة التكيف.

طبعاً في حال حدوث التكيف في نقطة بين أنبوبين مختلفين في نوعية مادتهما وبالتالي هناك اختلاف في سرعة انتشار موجة الضغط بينهما يتم أخذ السرعة الأعلى كونها تعطي الضغوط الأخطر.

إن المناطق المرتفعة من الأنبوب أو القمم تكون معرضة بشكل كبير لتشكل هذه الضغوط السالبة وللتخلص منها يفضل وضع سكرة تنفيس للهواء أو سحب الهواء لتحرير الغازات المنحلة وإذابتها بحيث يعود التحام العمود المائي.

إن استخدام هذه الطريقة مشروط على اعتبار أن جدران الناقل لا تتغير مقارنةً بالمقطع المدروس كما أن انحسار أو زيادة ظاهرة التكيف مرتبط بسرعة التكيف عند نهايات المنطقة التي يحدث عندها التكيف.

قيمة معامل المرونة للناقل:

إن النواقل المستخدمة ضمن المنظومة هي نوعين ضمن البئر من الفولاذ المزيبق إضافة إلى تلك الواصلة بين الآبار وحتى خزان التجميع من البولي إيثيلين، طبعاً إن نوعية المادة المصنوعة منها هذه الأنابيب تؤثر بشكل كبير على تحديد سرعة انتشار موجة الضغط التي يتم تحديدها كما في العلاقات السابقة، حيث تختلف سرعة انتشار موجة الضغط المارة في أنبوب من الفولاذ المزيبق عن تلك التي نحصل عليها من أنبوب بولي إيثيلين. إن هناك فرقاً شاسعاً حيث تصل سرعة موجة الضغط في الفولاذ حتى ال (1300 م/ثا) في حين لا تتعدى ال (230 م/ثا) في أنبوب من البولي إيثيلين. وسنجد هذه القيم الدقيقة حسب نوعية كل مادة وكل أنبوب في الجداول التي مرت معنا في فقرة سرعة انتشار موجة الضغط وأحدها مبين في الجدول (5): المرجع (2):

الجدول (5) معامل بواسون والمرونة حسب المرجع [2].

Material	Modulus of Elasticity, E^{**} (GPa)	Poisson's Ratio
Aluminum alloys	68-73	0.33
Asbestos cement, transite	24	
Brass	78-110	0.36
Cast iron	80-170	0.25
Concrete	14-30	0.1-0.15
Copper	107-131	0.34
Glass	46-73	0.24
Lead	4.8-17	0.44
Mild steel	200-212	0.27
Plastics		
ABS	1.7	0.33
Nylon	1.4-2.75	
Perspex	6.0	0.33
Polyethylene	0.8	0.46
Polystyrene	5.0	0.4
PVC rigid	2.4-2.75	
Rocks		
Granite	50	0.28
Limestone	55	0.21
Quartzite	24.0-44.8	
Sandstone	2.75-4.8	0.28
Schist	6.5-18.6	

*Compiled from Refs. 12, 25, and 31.
**To convert E into lb/in.², multiply the values given in this column by 145.038×10^3 .

كما يمكن أن نحصل على قيم أخرى لمعامل بواسون إضافة إلى قيم معامل المرونة تبعاً لنوع المادة من المرجع [1] وهو أحدث قليلاً:

جدول (6) معامل بواسون والمرونة حسب المرجع (1).

Material	E (lb/in ²)	Poisson ratio μ
Steel	30×10^6	0.30
Ductile cast iron	24×10^6	0.28
Copper	16×10^6	0.36
Brass	15×10^6	0.34
Aluminum	10.5×10^6	0.33
PVC	4×10^5	0.45
Fiberglass-reinforced plastic	$E_2 = 4 \times 10^6$	$\mu_2 = 0.27-0.30$
	$E_1 = 1.3 \times 10^6$	$\mu_1 = 0.20-0.24$
Asbestos Cement	3.4×10^6	0.30
Concrete	$57,000 \sqrt{f'_c}$	dynamic value 0.24
	$f'_c = 28\text{-day strength}$	

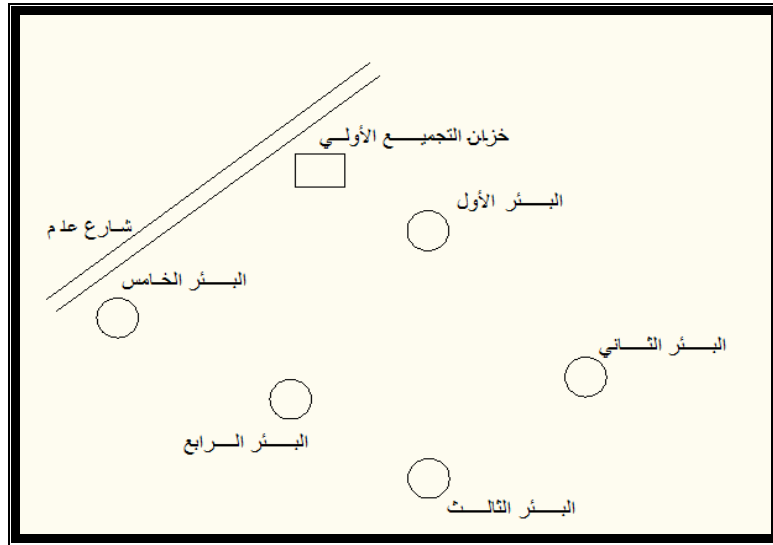
الفصل الثالث

مناقشة حالات تحميل مختلفة

3-1. مقدمة.

إن مشروع ضخ آبار الرشيدة هو أحد المشاريع الحديثة العهد في المحافظة وهي عبارة عن خمسة آبار متفرقة التوضع حيث أن أحد الآبار بُني بجواره خزان منفصل عن باقي الآبار على أمل أن يتم تشغيله لاحقاً مع بئر آخر لأغراض زراعية ، أما الآبار الثلاثة المتبقية فهي لضخ مياه الشرب ولها أيضاً خزان منفصل وهي التي تمت الدراسة عليها . تعاني المجموعة المدروسة من انقطاعات في التيار الكهربائي ما يؤدي إلى تشكل ظاهرة المطرقة المائية في أخطر حالاتها أو ما يسمى ظاهرة انهيار المضخة، إن ربط الآبار بشكل عام يتم بشكل مباشر من البئر إلى الخزان. إن هدف المشروع اقتراح طريقة لربط الآبار مع بعضها بوسائل مختلفة للوصول إلى الحالة الأمثلية التي تجنبنا ظاهرة المطرقة المائية المتشكلة نتيجة انقطاع التيار الكهربائي ، ومناقشة أخطر الحالات التي يمكن الوصول إليها حتى تستفيد المؤسسة من هذه المناقشة في التصميم لمشاريع أخرى.

يوضح الشكل (24) التوضع الطبيعي للآبار على أرض الواقع:



شكل (24) توزيع الآبار على أرض الواقع.

على الشكل إن كل من البئر الأول والثاني والثالث هي الآبار قيد التشغيل، أما البئرين الرابع والخامس فهي قيد التنفيذ. إن الآبار بشكل عام متماثلة يصل فيها المنسوب الديناميكي إلى (370م) وذلك عن مستوى سطح البحر. تستخدم ضمن البئر أ نابيب من الفولاذ المزيبق المسحوب بقطر 3 إنش ، وسماكة الجدران 5مم، أما الأنابيب الواصلة بين الآبار فهي من البولي إيثيلين ويختلف قطرها تبعاً للغزارة المضخوخة.

سندرس طرق الربط الأمثلية بين هذه الآبار الثلاثة ودراسة الاختلاف في حالات التشغيل واختلاف طرق الربط بين بئرين أو ثلاثة أو... إلخ.

هناك طرق وصل مختلفة لربط الآبار مع الخزان الرئيسي، نقترح منها:

- 1- ربط بئر مع الخزان (الأنبوب متجانس القطر والمادة).
- 2- ربط بئر مع الخزان (الأنبوب متغير القطر والمادة).
- 3- ربط بئرين مع الخزان (الربط على شكل حرف Y).
- 4- ربط بئرين مع الخزان (ربط البئر الأول مع رأس البئر الثاني).
- 5- ربط ثلاثة آبار مع الخزان (على التتابع).
- 6- ربط ثلاثة آبار مع الخزان (على التفرع).
- 7- ربط ثلاثة آبار مع الخزان (بئر على التفرع مع الثالث على التتابع).

سنناقش كل حالة من هذه الحالات بالتفصيل مع مناقشة الأرقام والنتائج التي توصلنا إليها باستخدام الإكسل ومناقشة الحالة الأفضل للوصل.

سنناقش حالات الوصل المذكورة على نحو غير متسلسل كما يلي:

3-2. دراسة حالة تحميل بسيطة.

وهي تمثل حالة بئر واحد وخزان واحد بينهما أنبوب . أدخل في هذا السيناريو حالات

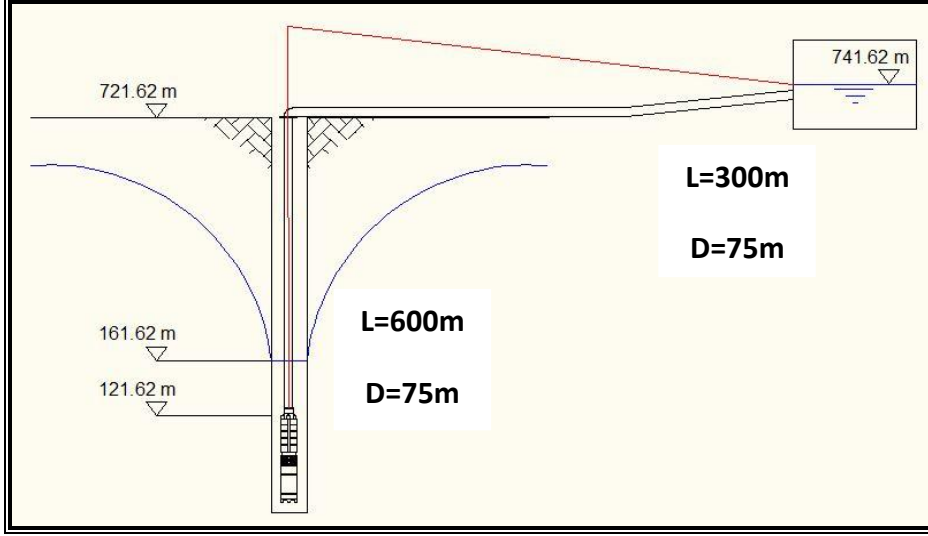
تفصيلية مثل:

- 1- تأثير مادة الأنبوب على الضواغط.
- 2- تأثير زمن الإغلاق على الضواغط.
- 3-2-1. حالة الخط المتماثل القطر و المادة على كامل المسار :يوجد لدينا في أسفل البئر

مضخة غاطسة متعددة المراحل، ويوجد سكر عدم رجوع عند طرف دفعها. أما مادة

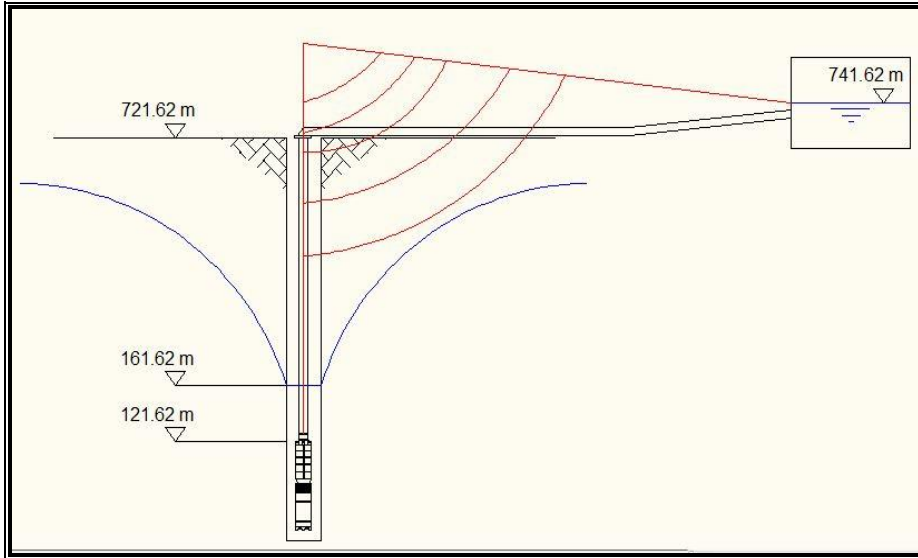
الأنبوب فهي من الفولاذ المزيبق على كامل مسار الأنبوب من البئر إلى خزان التجميع

الأولي ولها نفس القطر ومقداره 3 إنش، وسماكة الجدران 5 مم. إن خصوصية هذه الحالة المدروسة هي أن الأنابيب شاقولية تماماً و سنجد من الشكل (25) البئر والخزان والضغوط المتشكل في الحالة المستقرة:



شكل (25) بئر يضخ في الحالة الستاتيكية.

وكما نعلم أنه عند انقطاع التيار الكهربائي يتناقص الضغوط المقدم من قبل المضخة حتى تتعدم غزارتها بشكل نهائي. يمكن للشكل (26) أن يقدم توضيحاً عن هذا الانخفاض كما يلي:



شكل (26) بئر يضخ في حالة انقطاع التيار عن محرك المضخة.

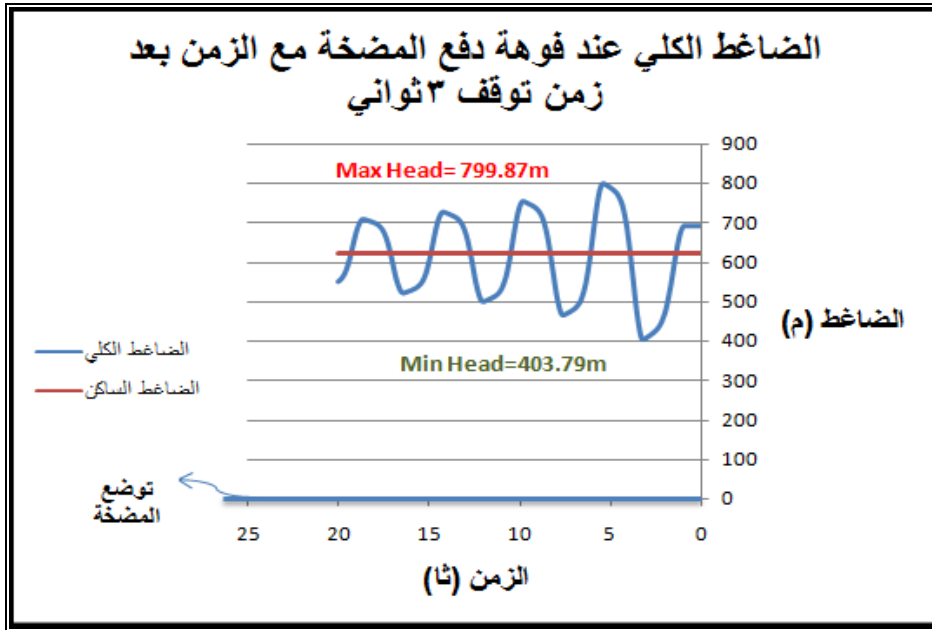
نلاحظ من الشكل أن انخفاض الضغوط سيؤدي تدريجياً إلى التكيف في منطقة رأس البئر وامتدادها بالتتابع على كامل مسار الأنبوب حتى خزان التجميع. أثناء مناقشة هذا السيناريو تم التركيز على مقطعين أساسيين هما:

1- بعد المضخة مباشرةً من أجل دراسة تأثير الضواغط المرتفعة الناتجة عن انعكاس الموجة بعد انقطاع التيار.

2- منطقة رأس البئر لمناقشة الضواغط السالبة الممكن تشكلها في هذه المنطقة وعلى امتداد الأنبوب حتى خزان التجميع الأولي.

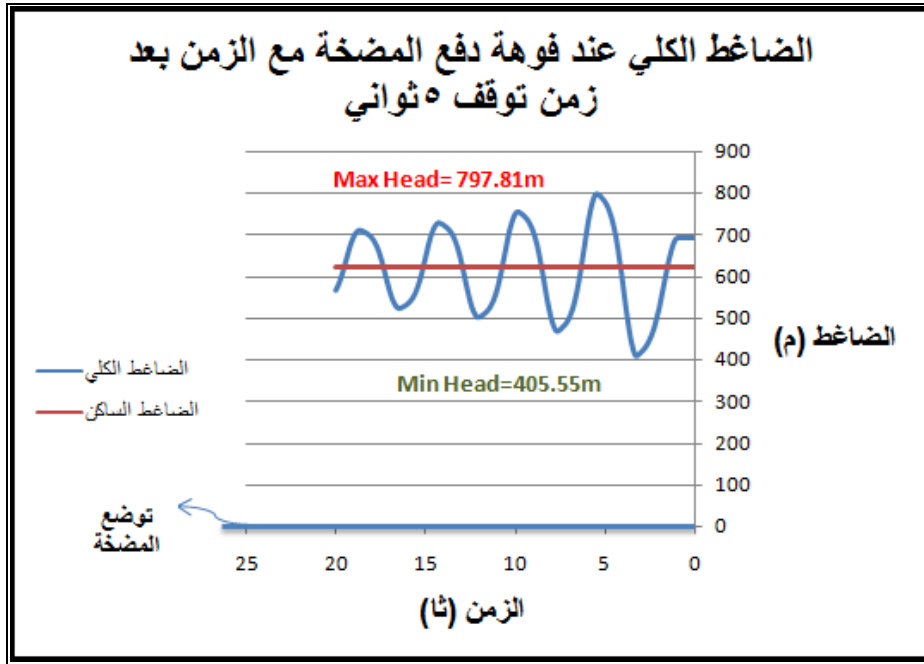
إن انقطاع التيار عن محرك المضخة لا يؤدي إلى توقف مباشر لمحرك المضخة إنما يحتاج إلى فترة حتى يتوقف نهائياً. طبعاً لا يعرف الزمن الحقيقي للتخامد لكن حسب الخبراء يتراوح زمن تخامد المضخة حتى (5-10) ثواني وكون المضخة المستخدمة متعددة المراحل وذات عزم عطالة صغير بالتالي إن زمن توقفها صغير، لذلك تمت مناقشة عدة خيارات للزمن وعدة خيارات لتغيير الضاغط على اعتبار أن التغيير في سرعة دوران المضخة قد تم بعد حوالي (1 ثانية) من انقطاع التيار الكهربائي، أما زمن التوقف النهائي فدرسنا قيم كالتالي حيث القيمة الأولى ($t=3$ sec) ثم أخذنا من أجل زمن ($t=5$ sec) ثم من أجل زمن ($t=10$ sec) وذلك فقط من أجل إظهار تأثير زمن التوقف على الضواغط.

نلاحظ في الشكل (27) الضاغط المتشكل في منطقة ما بعد المضخة نتيجة توقف نهائي لمحرك مضختها بعد 3 ثواني:



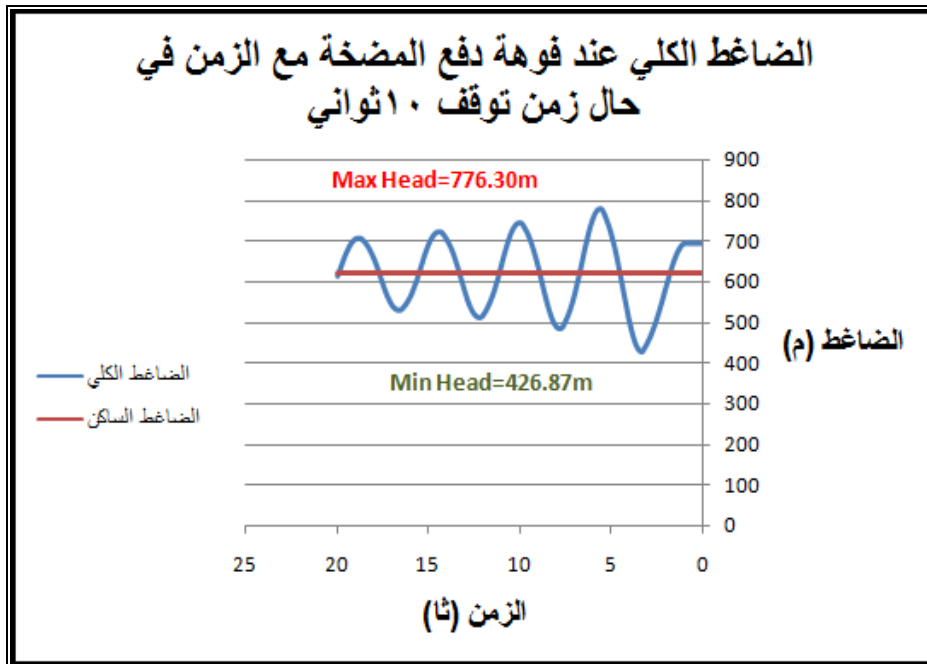
شكل (27) الضاغط الكلي مع الزمن في حالة زمن توقف 3 ثوان عند المضخة.

أما الشكل (28) فيعبر عن الضاغط المتشكل في منطقة ما بعد المضخة نتيجة توقف نهائي لمحرك المضخة بعد 5 ثواني:



شكل (28) الضاغط الكلي مع الزمن في حالة زمن توقف 5 ثوان عند المضخة.

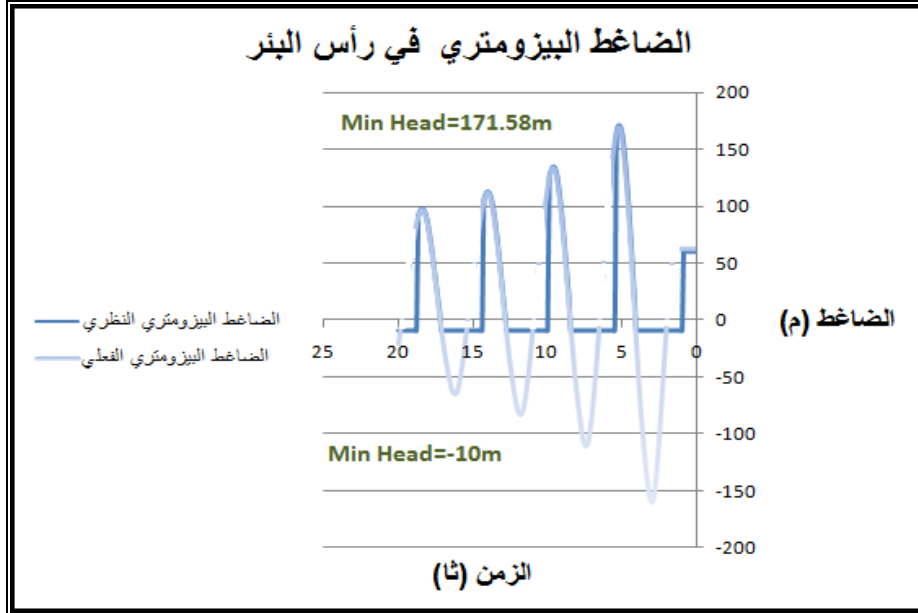
أما الشكل (29) يبين الضاغط المتشكل في منطقة ما بعد المضخة نتيجة توقف نهائي لمحركها بعد 10 ثواني:



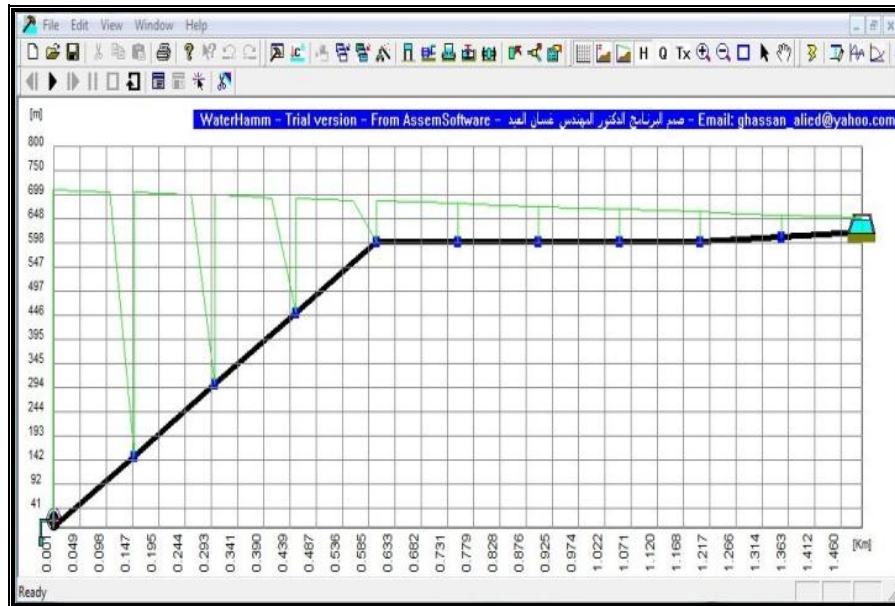
شكل (29) الضاغط الكلي مع الزمن في حالة زمن توقف 10 ثوان عند المضخة.

يمثل الشكل (30) قيمة الضاغط البيزومتري في رأس البئر بعد 5 ثواني من توقف المضخة، ويلاحظ من الشكل أن القيم الفعلية التي نتجت بالحساب للضاغط وصلت إلى ما دون

ضغط التبخر للسائل، لكن القيم بالخط الغامق على الشكل تبين القيم النظرية حيث لا يجوز أن تتجاوز قيمة الضغط السالب أقل قيمة لضغط التبخر وهي (- 10) وهذا موضح تماماً في الشكل (30):



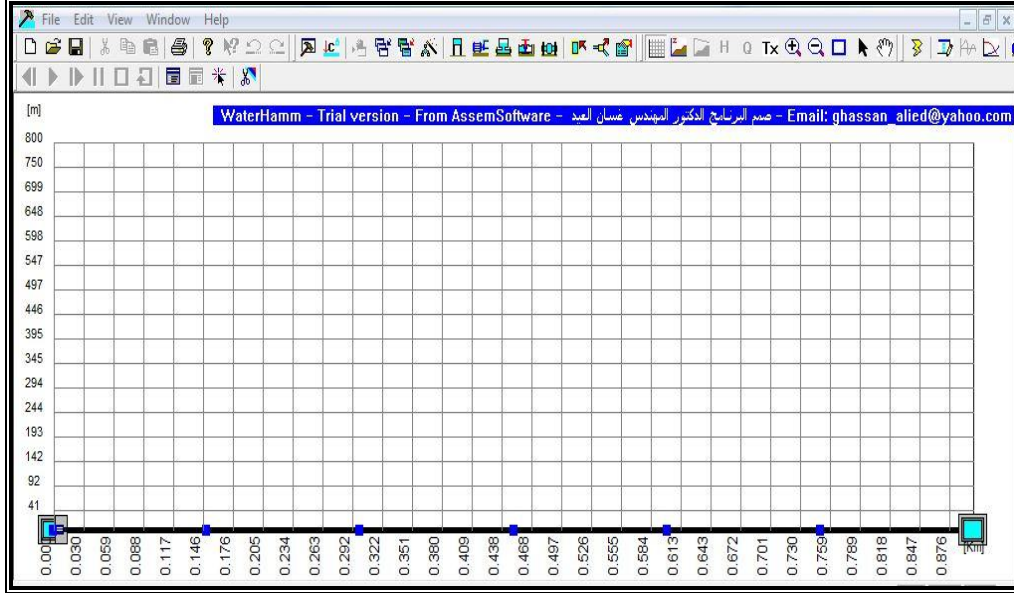
شكل (30) الضاغط المتشكل في رأس البئر مع الزمن بعد زمن توقف 5 ثوان عن محرك المضخة. وقد تم التحقق من النتائج باستخدام برنامج *WaterHamm* المصمم من قبل الدكتور المهندس غسان العبد، والمستخدم بشكل واسع في مؤسسة المياه في السويداء على هذه الحالة حصراً حيث تم رسم المنظومة المذكورة بالشكل (31) على البرنامج كمسقط جبهتي:



شكل (31) الضاغط في الحالة المستقرة للجريان باستخدام برنامج *Waterhamm*.

من الشكل نلاحظ الضاغط الكلي المتشكل نتيجة عملية الضخ النظامي قبل انقطاع التيار عن المضخة، طبعاً الفراغات بين الخط هي كون الأنبوب قائم ضمن البئر وهنا لدينا مسقط فهي في الأساس خطوط مستمرة.

يوضح الشكل (32) مسقطاً أفقياً للمنظومة بدءاً من البئر وإلى خزان التجميع الأولي من الأعلى:



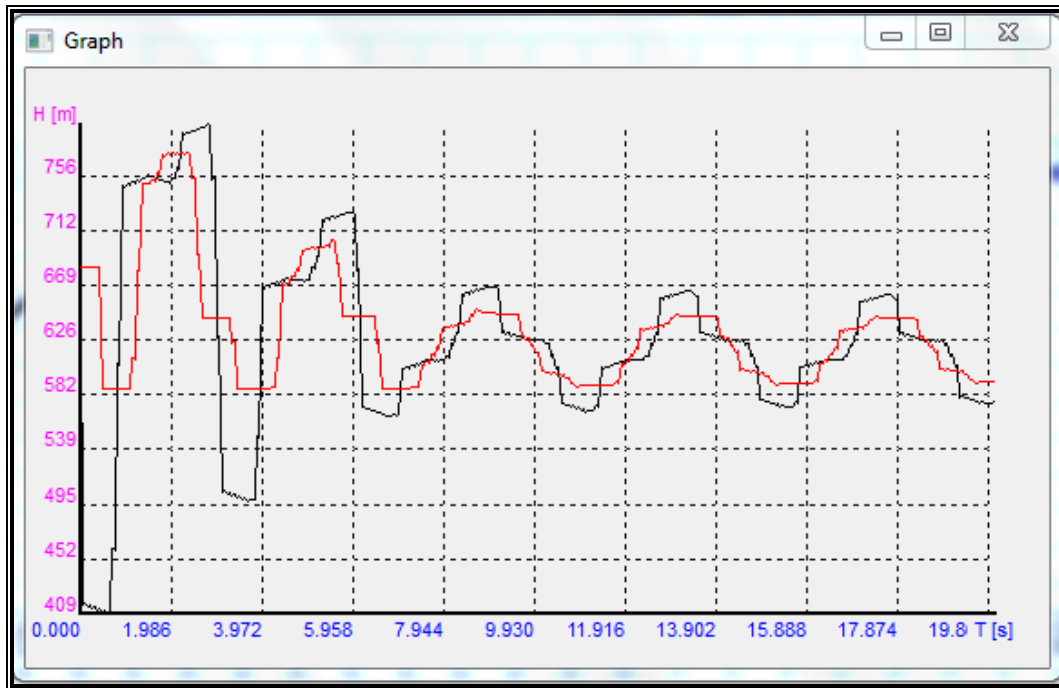
شكل (32) مسقط يوضح الحالة المدروسة باستخدام *Waterhamm*.

إن هذا البرنامج المستخدم يقدم العديد من الميزات مثل كل البرامج العالمية، حيث يمكننا من رسم وتحديد المنحني المميز للمضخة ومطابقته مع المنحني المميز للمنظومة للحصول على نقطة العمل المثالية حسب نوع المضخة المستخدمة، كما يبين الشكل (33):



شكل (33) المنحني المميز لمضخة المنظومة.

تم استخدام هذا البرنامج من أجل مقارنة النتائج التي حصلنا عليها باستخدام الإكسل اعتماداً على طريقة المميزات، وقد حصلنا على الشكل (34) الممثل لقيم الضاغط عند منطقتي رأس البئر وما بعد المضخة حيث يمثل الخط الأعلى قيم الضاغط في منطقة ما بعد المضخة ويقل مع طول الأنبوب بفعل الاحتكاك، أما الخط الأدنى فيمثل الضاغط في منطقة رأس البئر. واعتبرت القيمة المأخوذة للزمن أثناء الدراسة هي فترة الـ 20 ثانية التي درسنا فيها الضواغط باستخدام الإكسل مع العلم أن البرنامج قابل للحساب لفترات زمنية أطول من ذلك، لكن أخذت هذه الفترة فقط من أجل مقارنة العاملين.



شكل (34) الضاغط في مقطعي رأس البئر وما بعد المضخة.

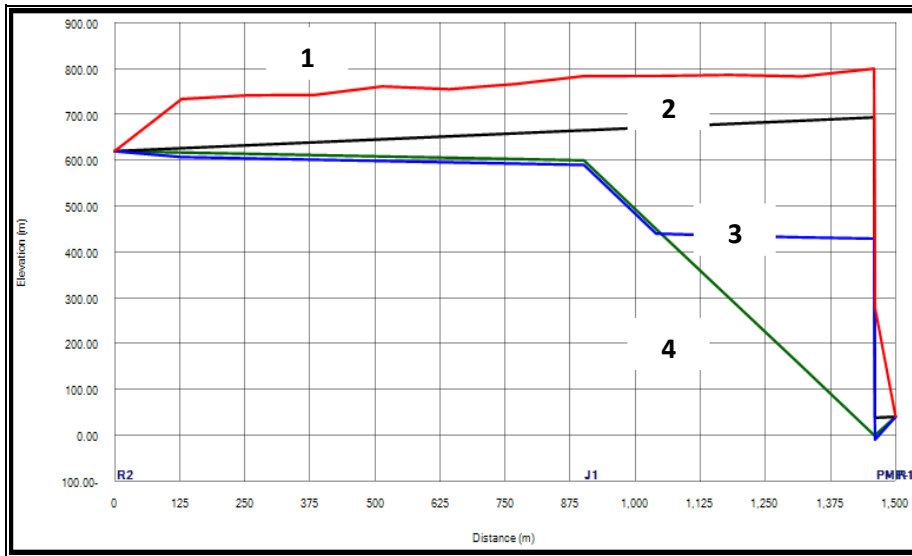
كما يتميز البرنامج السابق بإعطاء قيم الضواغط بشكل جدول حسب الشكل المرسوم وعند كل عقدة. كما يظهر لدينا هنا حيث تمثل الدائرة أعلى ضاغط وصلت إليها الموجة بعد عودتها بعد انقطاع التيار كما يلي في الجدول (7):

جدول (7) الضواغط الناتجة باستخدام WaterHamm .

Pipe	Node	X[m]	Y[m]	Z[m]	dL[m]	H[m]	Q[m3/h]	v[m/s]	H min[m]	H max[m]	P min[L]
1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	709.43	33.29	2.09	409.20	799.57	40.92
1	2	0.0	0.0	75.0	75.0	706.45	33.29	2.09	410.05	799.06	33.50
1	3	0.0	0.0	150.0	150.0	703.47	33.29	2.09	410.88	798.06	26.09
2	1	0.0	0.0	150.0	0.0	703.47	33.29	2.09	410.88	798.06	26.09
2	2	0.0	0.0	225.0	75.0	700.49	33.29	2.09	411.69	797.34	18.67
2	3	0.0	0.0	300.0	150.0	697.52	33.29	2.09	412.47	796.64	11.25
3	1	0.0	0.0	300.0	0.0	697.52	33.29	2.09	412.47	796.64	11.25
3	2	0.0	0.0	375.0	75.0	694.54	33.29	2.09	413.24	795.97	3.82
3	3	0.0	0.0	450.0	150.0	691.56	33.29	2.09	439.80	782.57	-1.02
4	1	0.0	0.0	450.0	0.0	691.56	33.29	2.09	439.80	782.57	-1.02
4	2	0.0	0.0	525.0	75.0	688.58	33.29	2.09	514.80	778.56	-1.02
4	3	0.0	0.0	600.0	150.0	685.60	33.29	2.09	589.80	776.59	-1.02
5	1	0.0	0.0	600.0	0.0	685.60	33.29	2.09	589.80	776.59	-1.02
5	2	75.0	0.0	600.0	75.0	682.62	33.29	2.09	589.80	777.30	-1.02
5	3	150.0	0.0	600.0	150.0	679.64	33.29	2.09	589.80	778.02	-1.02
6	1	150.0	0.0	600.0	0.0	679.64	33.29	2.09	589.80	778.02	-1.02
6	2	225.0	0.0	600.0	75.0	676.66	33.29	2.09	589.80	778.76	-1.02
6	3	300.0	0.0	600.0	150.0	673.68	33.29	2.09	589.80	779.51	-1.02
7	1	300.0	0.0	600.0	0.0	673.68	33.29	2.09	589.80	779.51	-1.02
7	2	375.0	0.0	600.0	75.0	670.70	33.29	2.09	589.80	778.69	-1.02
7	3	450.0	0.0	600.0	150.0	667.72	33.29	2.09	589.80	777.89	-1.02
8	1	450.0	0.0	600.0	0.0	667.72	33.29	2.09	589.80	777.89	-1.02
8	2	525.0	0.0	600.0	75.0	664.74	33.29	2.09	589.80	777.11	-1.02
8	3	600.0	0.0	600.0	150.0	661.76	33.29	2.09	589.80	776.35	-1.02
9	1	600.0	0.0	600.0	0.0	661.76	33.29	2.09	589.80	776.35	-1.02
9	2	675.0	0.0	605.0	75.2	658.77	33.29	2.09	594.80	775.61	-1.02
9	3	750.0	0.0	610.0	150.3	655.78	33.29	2.09	599.80	753.44	-1.02
10	1	750.0	0.0	610.0	0.0	655.78	33.29	2.09	599.80	753.44	-1.02
10	2	825.0	0.0	615.0	75.2	652.80	33.29	2.09	604.80	688.14	-1.02
10	3	900.0	0.0	620.0	150.3	649.81	33.29	2.09	620.00	649.81	0.00

وجدنا من الجدول السابق قيم الضواغط الأعظمية و الأصغرية على كامل المسار وبمقارنتها مع تلك التي حصلنا عليها باستخدام الإكسل سنجد تطابقاً كبيراً عند أخذ قيمة توقف المضخة بعد 3 ثانية حيث يأخذ هذا البرنامج القيمة الأخطر للضاغط حيث كانت قيمتها العظمى (799.57م) أما باستخدام الإكسل كانت قيمتها (799.87م) وهي قيم متقاربة جداً وصحيحة.

يوضح الشكل (35) قيم الضواغط على طول مسار الأنابيب من المضخة وحتى حيث اعتمدنا Bently من إنتاج وتصميم شركة WaterHammer الخزان باستخدام برنامج في هذا البرنامج على عدة أزمنة أيضاً للإغلاق للتحقق من القيم فكانت النتائج كما يلي:



شكل(35) الضواغط الأعظمي و الأصغري على كامل مسار الأنابيب.

تمثل الأرقام على الشكل بالتالي:

1-خط الضاغط الأعظمي.

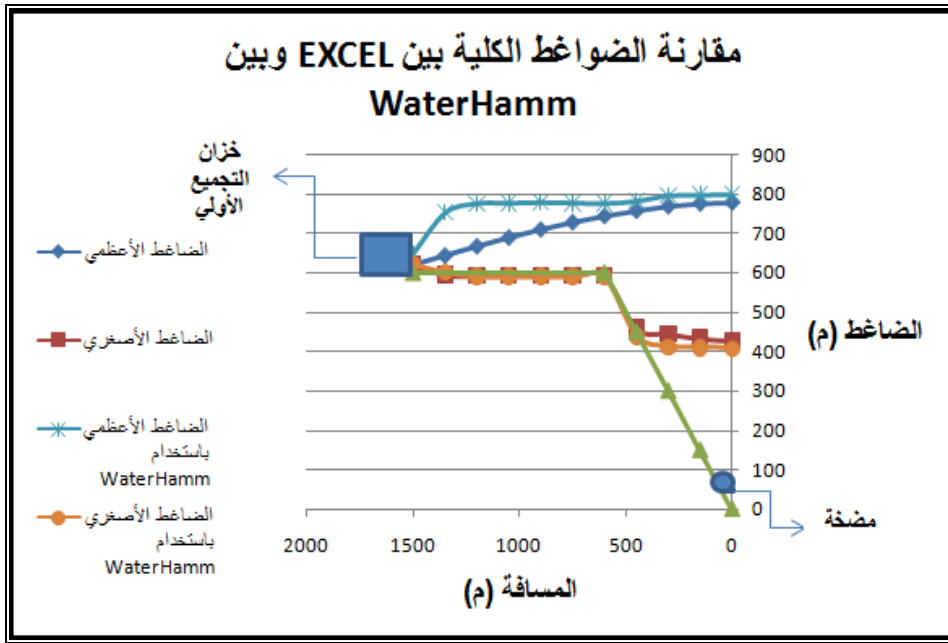
2-خط الضاغط في الحالة المستقرة.

3-خط الضاغط الأدنى.

4-مسار الأنبوب.

إن أعلى قيمة نحصل عليها للضاغط هنا هي (800.30م) وهي من القيم المطابقة لما حصلنا عليه باستخدام الإكسل. وهذه المقارنة هي لمزيد من التحقق.

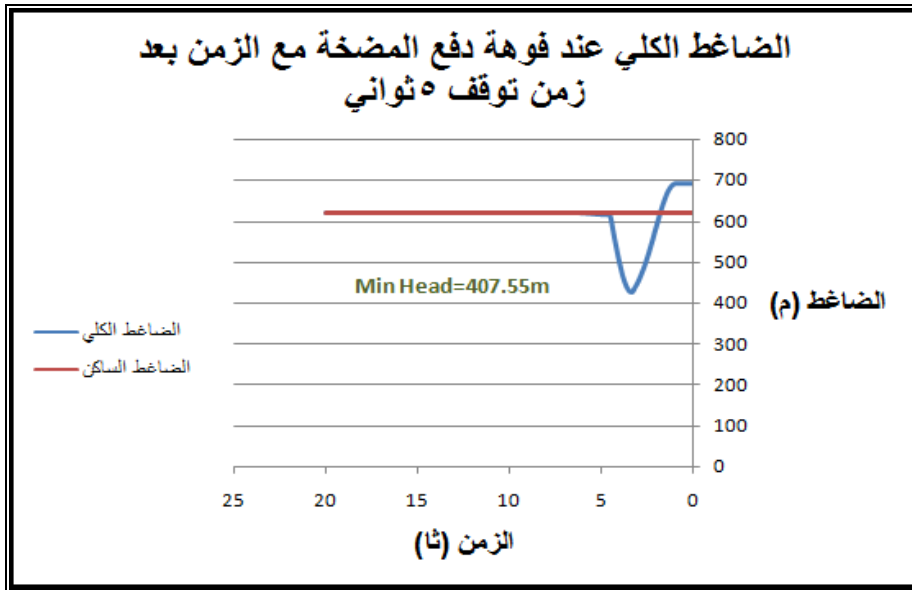
وقد تم رسم الضواغط الأعظمية و الأصغرية باستخدام الإكسل على كامل مسار الأنبوب للمقارنة بين النتائج التي حصلنا عليها باستخدام برنامج WaterHamm وبين الحسابات على الإكسل كما يبين الشكل (36):



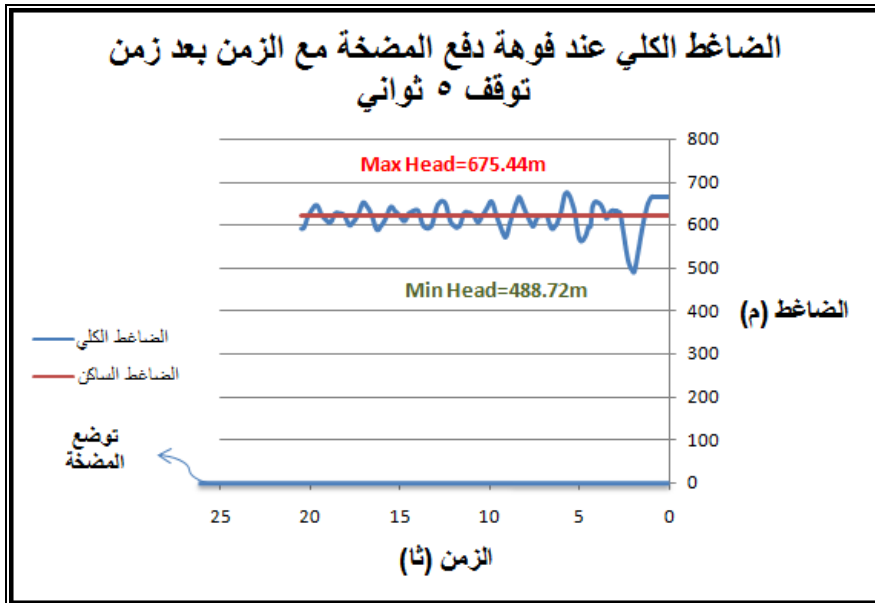
شكل (36) الضاغط الكلي باستخدام WaterHamm و EXCEL.

نلاحظ التطابق الكبير في مسار الضاغط الأصغري و الأعظمي بقيمة مقبولة. و الجدير بالذكر أن هذه الحالة أخذت بعين الاعتبار مشاركة الخزان في الجريان العكسي كما هي جميع الحالات النظرية الواردة في المراجع. لكن الحالة الواقعية تعتمد على وصل الخزان من الأعلى فقط أي لا ندخل أثر مشاركة الخزان في الجريان العكسي بعين الاعتبار فتصبح النتائج مختلفة بعض الشيء. ويتم أخذ عدم مشاركة الخزان على اعتبار أن الغزارة معدومة عندما تتعكس إشارة الجريان

و بالتالي نحصل على الشكل (37) في حال أخذنا المقطع المدروس هو المقطع بعد المضخة مباشرة:

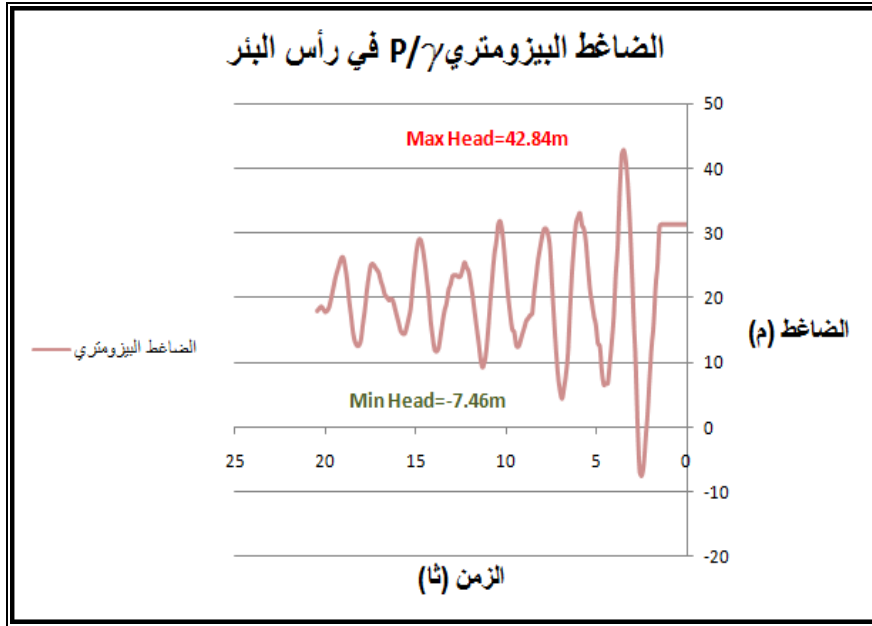


شكل (37) الضاغط في البئر على اعتبار عدم مشاركة الخزان في الجريان العكسي. 3-2-2. حالة الأنبوب غير متماثل القطر والمادة على كامل المسار: أظهرت نتائج حسابات الضاغط في المقطع ما بعد المضخة مباشرة (نتيجة توقف المضخة بزمن قدره 5 ثوان) باستخدام البرنامج على الإكسل، بشكل منحنى كما هو موضح في الشكل (38) ويظهر جلياً في هذه المنحنيات أثر مرونة أنابيب البولي إيثيلين في تخفيف الضغوط في الأنبوب بشكل عام.



شكل (38) الضاغط في البئر نتيجة اختلاف الأنبوب على طول مساره.

أما الضاغط البيزومتري المتشكل في منطقة رأس البئر لهذه الحالة يبينه الشكل (39) الذي يظهر جلياً وصول الضاغط إلى قيم حدية من ضغط تبخر السائل:



شكل (39) الضاغط البيزومتري في رأس البئر.

النتيجة:

- إن استخدام الفولاذ كمادة للأنبوب على كامل مساره أدى بالنتيجة إلى ازدياد ملحوظ في قيم الضواغط في المقطع ما بعد المضخة (عند عودة موجة الضغط) مقارنةً مع الحالة الستاتيكية، أما في المقاطع عند رأس البئر أدى استخدام الفولاذ إلى هبوط الضغط بشكل كبير وظهور مناطق تكهف امتدت حتى نهاية الأنبوب عند الخزان. لذلك لا ينصح باستخدام أنابيب الفولاذ في مثل حالتنا للجزء المكشوف من الأنبوب خارج البئر.
- نلاحظ في حالة استخدام أنابيب من البولي إيثيلين بدلاً من الفولاذ انخفاض الضاغط بشكل واضح نتيجة المرونة المنخفضة للبولي إيثيلين الذي يعمل على امتصاص جزء كبير من طاقة الموجة المنعكسة، ولكن تبقى مشكلة انخفاض الضاغط عند منطقة رأس البئر وتشكل التكهف بسبب العمق الكبير للبئر، فبالرغم من وجود البولي إيثيلين نلاحظ وصول التكهف إلى حالة حدية والتي لا يجب أن نتغاضى عنها في الحل.
- يتم استخدام الفولاذ المزيق ضمن البئر بشكل دائم من قبل مؤسسة المياه إذ أنه يمتاز بالمتانة العالية والمقاومة للكسر كما أنه يتحمل الضغوط المرتفعة المتوقع تشكلها، لذلك لم تتم مناقشة حالة بولي إيثيلين على كامل الخط من البئر إلى الخزان. مع العلم أنها ستكون

مماثلة تماماً لحالة الفولاذ المزيبق لكن بقيم منخفضة لسعة مخطط موجة الضغط وذلك بسبب المرونة المنخفضة للبولي إيثيلين.

- تبقى قيم الضواغط العظمى المتشكلة نتيجة فشل المضخة ضمن الحدود المقبولة مقارنةً مع قيمها باستخدام علاقة جوكوفسكي المعروف أنها تعطي قيماً أكبر دائماً من الحقيقية، وقد تم التحقق من ذلك باستخدام علاقة جوكوفسكي لحساب الضاغط في المقطع بعد المضخة مباشرةً والتي يعبر عنها بالعلاقة:

$$\Delta H = \frac{C \cdot \Delta V}{g}$$

حيث V تمثل سرعة الجريان في الحالة المستقرة وقيمتها بالحساب باستخدام برنامج الـ $EPANET$ (1.75م/ثا).

ρ تمثل الكتلة النوعية للسائل وقيمتها 1000 كغ/م³.

C تمثل سرعة انتشار موجة الضغط وقيمتها بالحساب لحالة الأنبوب من الفولاذ المزيبق (1318م/ثا).

إذاً تكون القيمة النهائية لازدياد الضاغط هي:

$$\Delta H = 235.12m$$

إن القيمة التي حصلنا عليها باستخدام الإكسل لحالة كامل الخط من الفولاذ المزيبق هي بحدود (108م) إذاً هي أقل من الأعظمية والضواغط مقبولة.

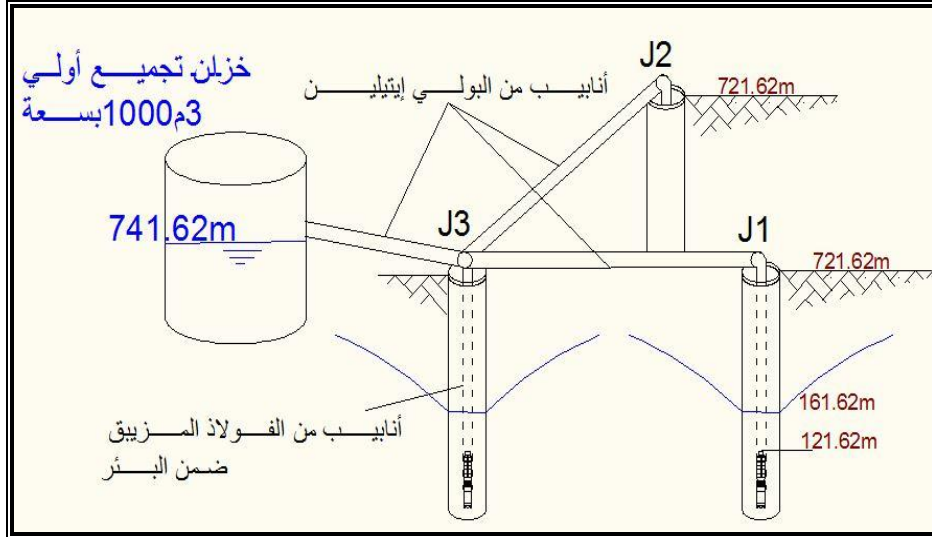
3-3. دراسة حالات وصل أكثر من بئر على مجمع رئيسي واحد.

الحالة الأولى:

وهي حالة آبار ثلاثة مربوطة إلى ذات النقطة ، حيث يقوم كل من البئرين الأول و الثاني بضخ المياه بالاشتراك مع البئر الثالث عند عقدة تقع في رأس البئر الثالث إلى خزان التجميع الأولي كما هو موضح بالشكل (40) وهي إحدى الحالات المهمة نتيجة انقطاع التيار عن مجموعة المضخات بنفس الوقت . وقد تمت دراسة هذه الحالة باستخدام الإكسل واعتماد الشروط الحدية الخاصة بالتقاء جملة من الأنابيب إلى ذات العقدة وقد تم الحصول على نتيجة مهمة في هذه الحالة، حيث لوحظ اختفاء ظاهرة التكهف المتشكلة عند منطقة رأس البئر . وكأن ارتباط هذه

الأنابيب في العقدة قد رفع الضاغط على طول الأنبوب الواصل إلى كل بئر وألغى حدوث هذه الظاهرة.

يوضح الشكل (40) تمثيل الربط على أرض الواقع:

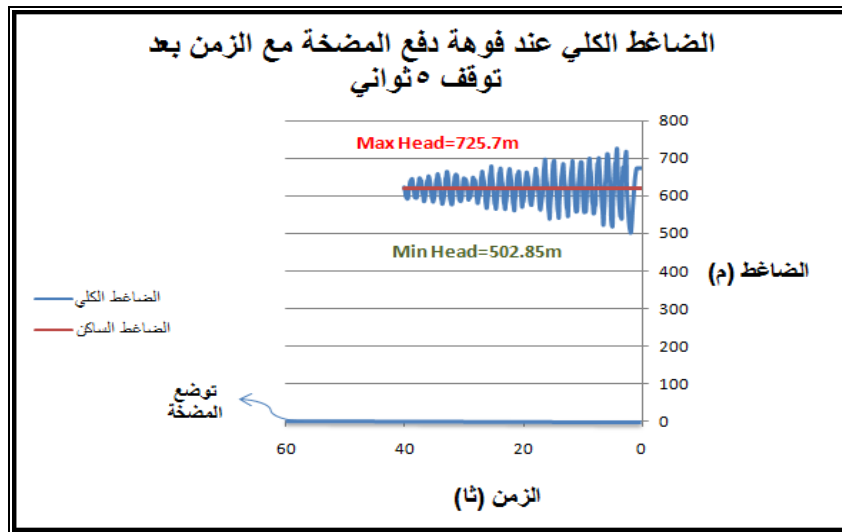


شكل (40) وصل الآبار الثلاثة إلى نفس العقدة.

سيتم دراسة الضواغط مع مراعاة المقطعين الأخطر وهما بعد المضخة مباشرة من أجل التحقق من خطورة الضواغط المرتفعة المتشكلة إضافة إلى منطقة رأس البئر ل توفير الضواغط السالبة من رأس البئر وحتى خزان التجميع الأولي.

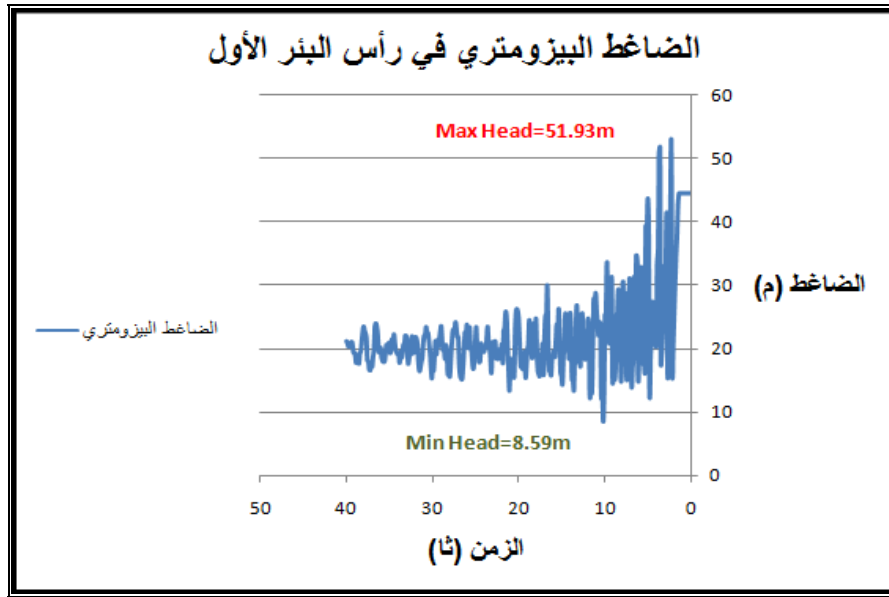
- بمشاركة الخزان في الجريان العكسي:

في البئر الأول والمقصود به الأبعد عن خزان التجميع الأولي بمقدار (900م) يوضح الشكل (41) قيمة الضاغط بعد المضخة مباشرة، بعلاقته مع الزمن في حالة توقف المضخة خلال 5 ثواني:



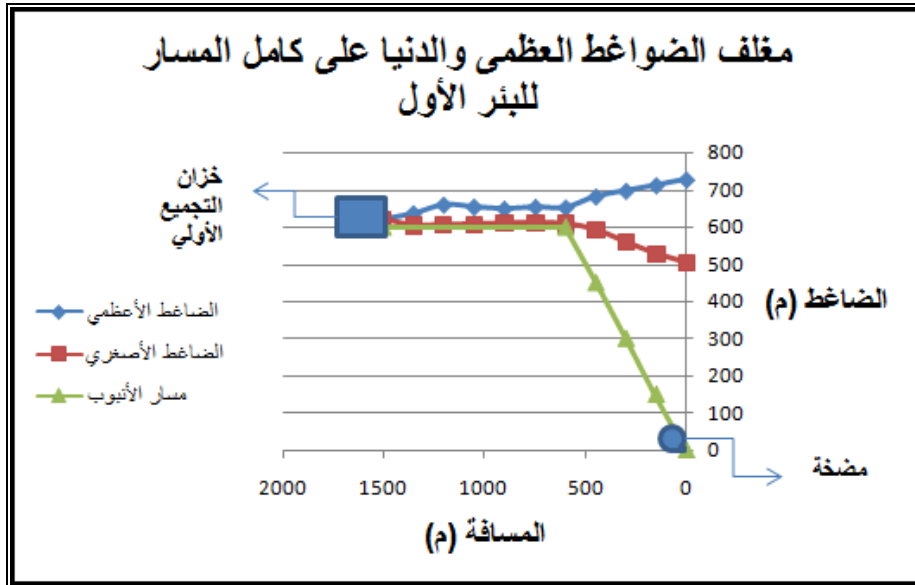
شكل (41) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.

أما بالنسبة لرأس البئر سنجد الضاغط المتشكل وسنلاحظ أنه لا يحدث تكهف في هذه الحالة كما يوضحها الشكل (42):



شكل (42) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

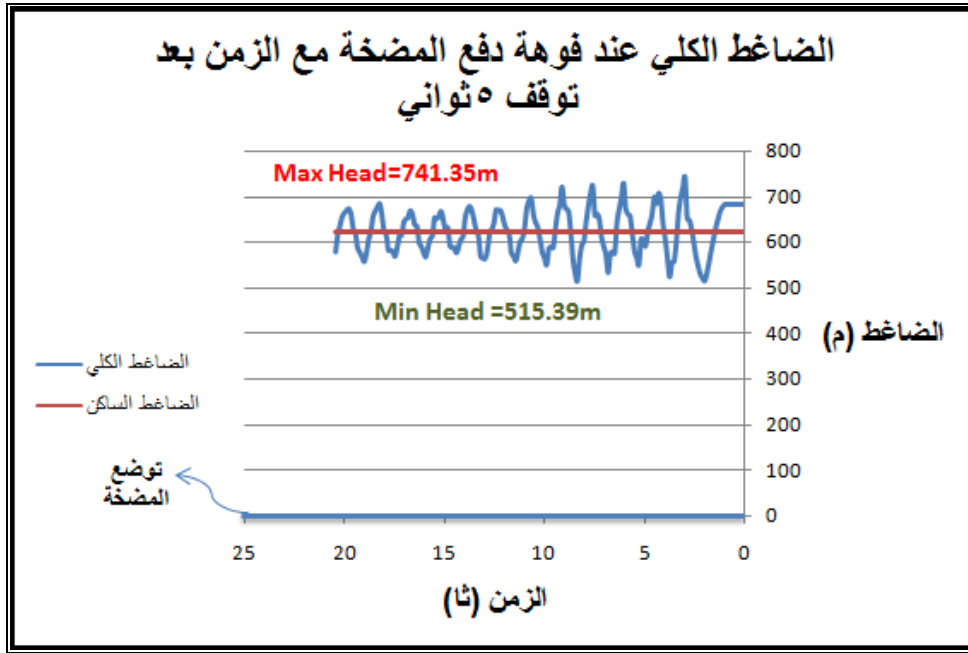
أما الضواغط العظمى والدنيا على كامل مسار الأنبوب سنجدها بالشكل (43):



شكل (43) الضاغط على كامل مسار الأنبوب من البئر الأول وحتى الخزان.

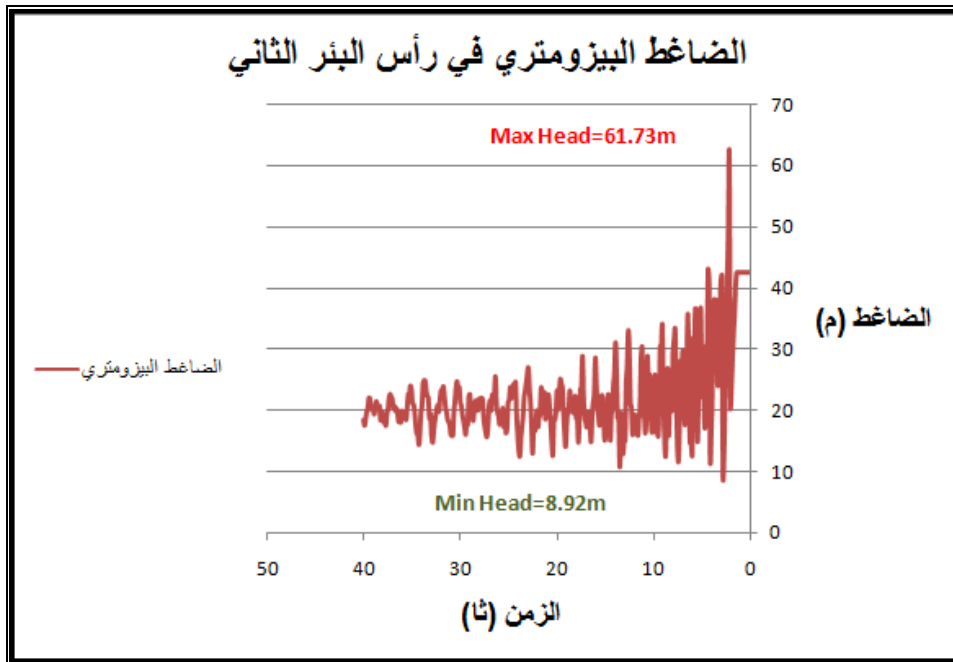
أما بالنسبة للبئر الثاني والمقصود البئر الذي يبعد عن خزان التجميع الأولي بمقدار (750م)

أيضاً سنجد الضاغط بعد المضخة في هذه الحالة مبين بالشكل (44):



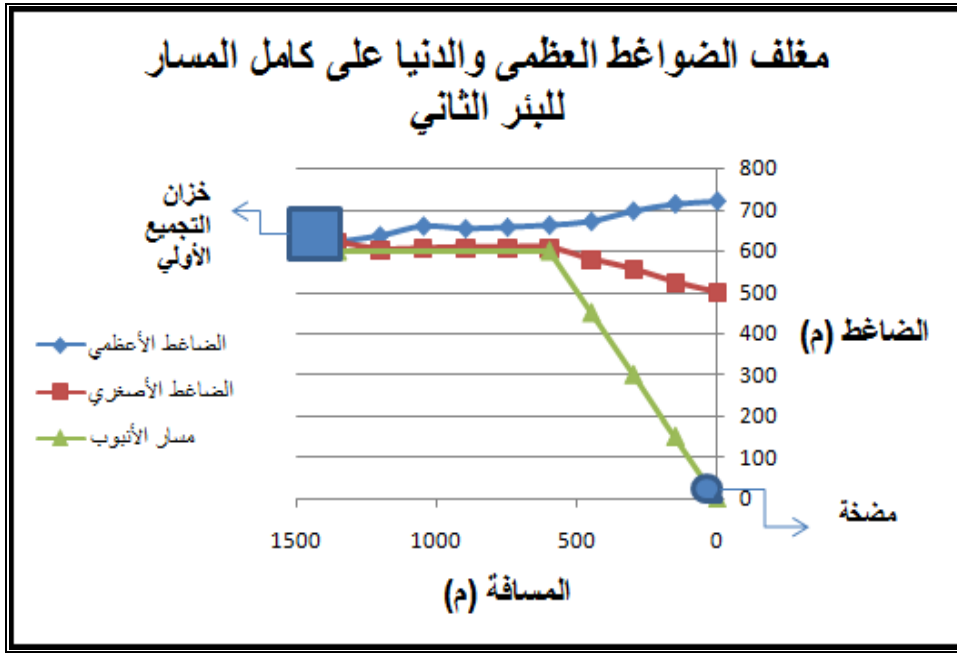
شكل (44) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.

أما منطقة رأس البئر موضحة بالشكل (45) حيث نلاحظ اختفاء التكهف منها بشكل نهائي علماً أن التوقف النهائي لمحرك المضخة بعد زمن مقداره 5 ثواني:



شكل (45) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

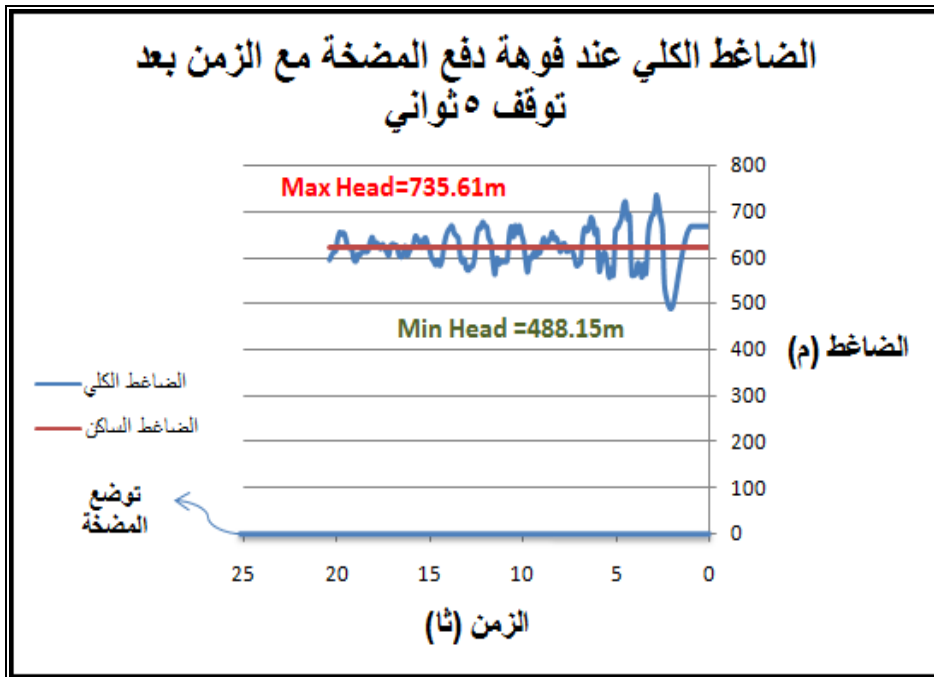
(46) أما الضواغط العظمى والدنيا على كامل المسار للبئر الثاني فهي مبينة بالشكل حيث نلاحظ الضواغط الدنيا أعلى من منسوب رأس البئر واختفاء التكهف:



شكل (46) الضاغط على كامل مسار الأنابيب من البرنر الثاني وحتى الخزان.

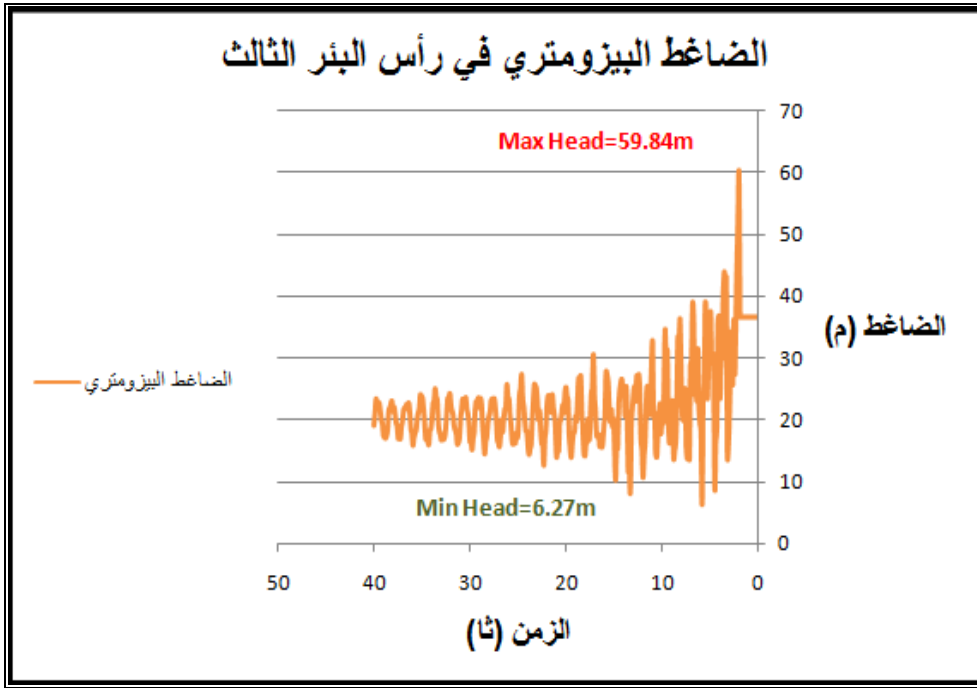
وبالنسبة للبرنر الثالث سنجد قيم الضواغط المتشكلة في منطقة ما بعد المضخة مباشرةً

مبينة بالشكل (47):



شكل (47) الضاغط الكلي في البرنر الثالث بعد المضخة مباشرةً.

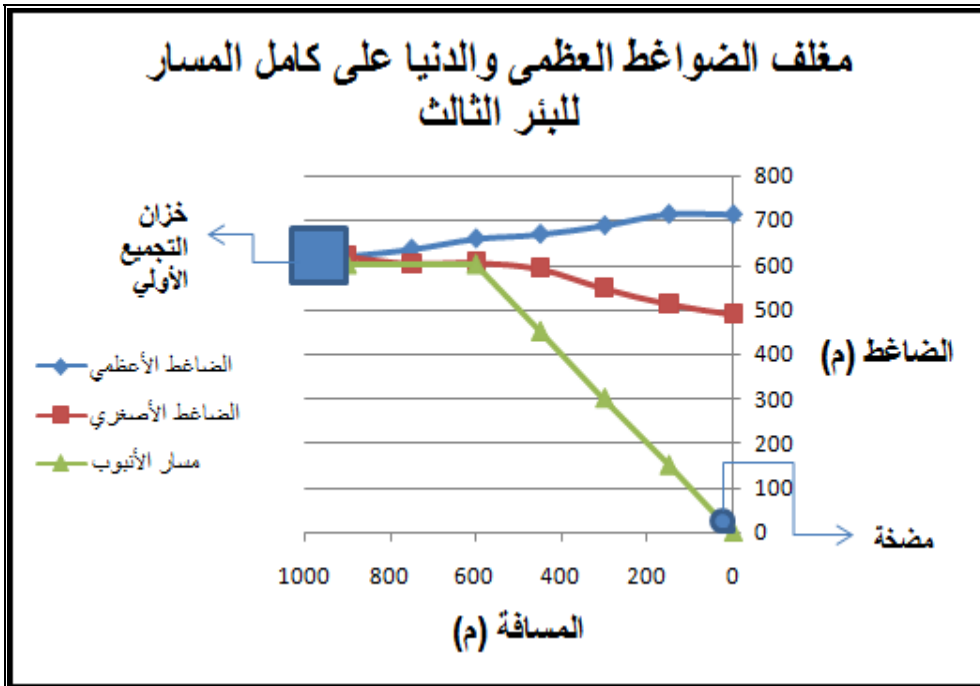
وفي منطقة رأس البرنر سنجد الضواغط التالية مع اختفاء التكهف أيضاً على كامل مساره:



شكل (48) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.

أما الضواغط العظمى والدنيا على كامل مسار الأنبوب للبئر الثالث فهي مبينة بالشكل

(49):

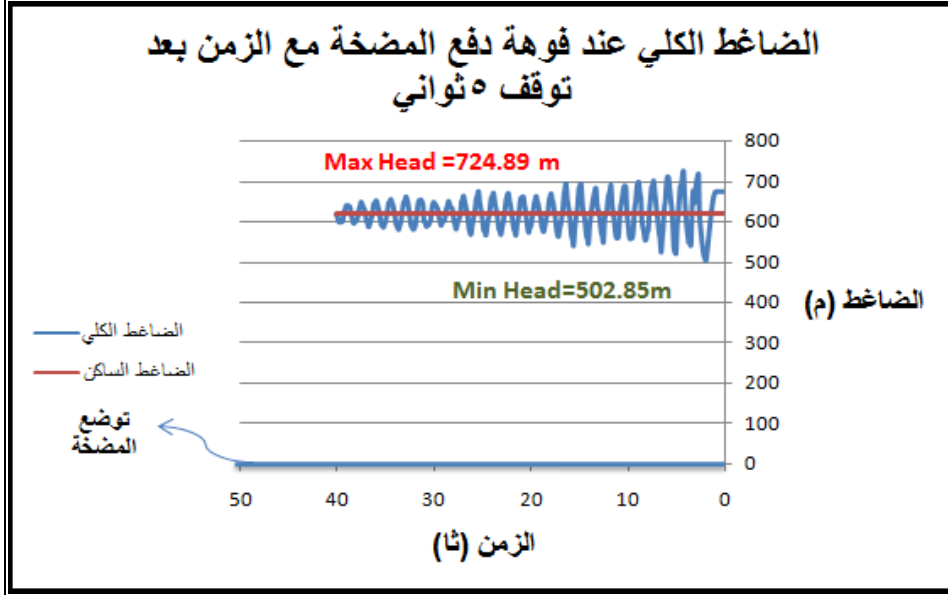


شكل (49) الضاغط على كامل مسار الأنبوب من البئر الثالث وحى الخزان.

- بدون مشاركة الخزان في الجريان العكسي:

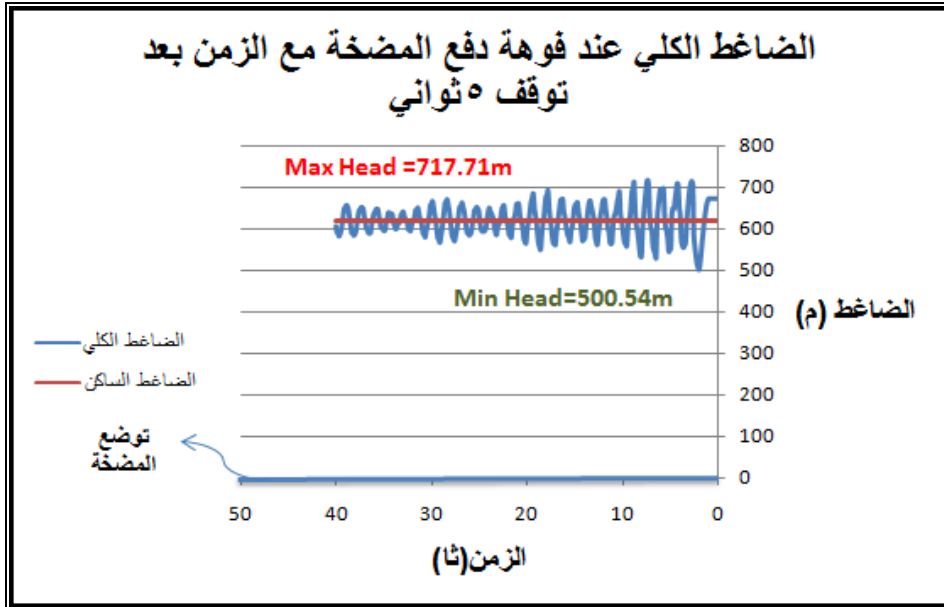
في هذه الحالة سنجد أن الضواغط في منطقة رأس البئر لا تتغير عن الحالة السابقة ولكن تنخفض قيمة الضاغط في منطقة ما بعد المضخة بشكل طفيف كما توضح الأشكال الثلاثة (50)،(51)،(52):

في البئر الأبعد بمقدار (900م) سنجد الضاغط:



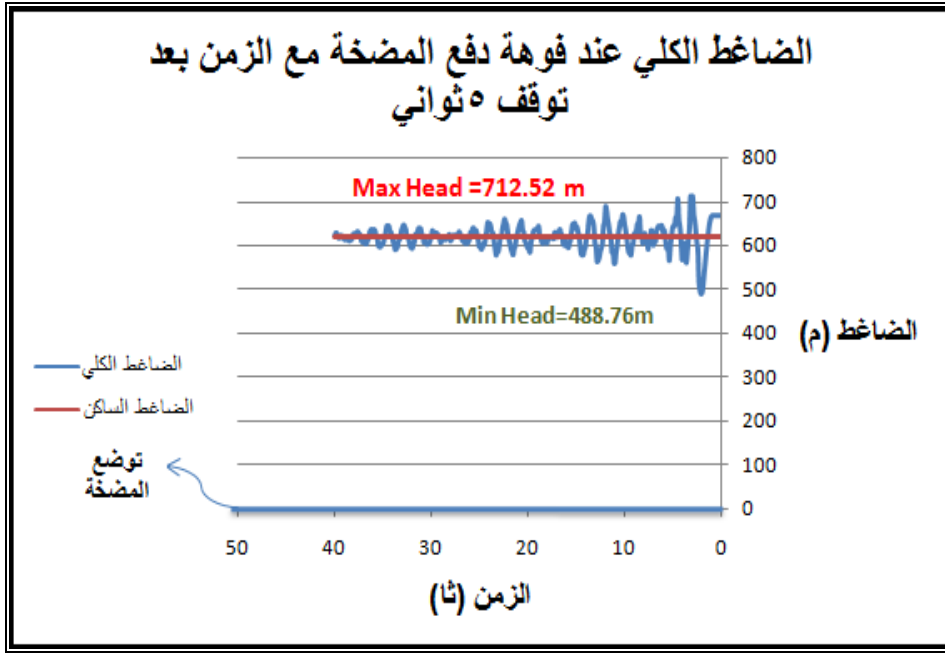
شكل (50) الضاغط الكلي في البئر الأول بعد المضخة مباشرة.

أما في البئر الثاني الذي يبعد (750م) عن الخزان سنجد الضاغط:



شكل (51) الضاغط الكلي في البئر الثاني بعد المضخة مباشرة.

وفي البئر الثالث الذي يبعد (300م) عن الخزان سنجد:



شكل (52) الضاغط الكلي في البئر الثالث بعد المضخة مباشرة.

نتيجة:

نلاحظ في حالة التوقف الطارئ لمجموعات الضخ لثلاثة آبار موصولة مع بعضها على مجمع رئيسي واحد يصل إلى خزان التجميع، أهمية الربط وفق هذه الطريقة حيث تختفي ظاهرة التكهف من رأس البئر لكافة الآبار مهما اختلف بعدها عن خزان التجميع، وهذه نتيجة إيجابية ذلك أننا نعلم أنه بزيادة بعد البئر عن الخزان تزيد فرصة واحتمالية ظهور التكهف امتداداً من رأس البئر وإلى الخزان، وبالتالي الربط إلى نفس العقدة يلغي التكهف مهما كان الطول والامتداد.

سنقوم بتفسير هذه الحالة بتوازن الضغوط في العقدة حيث يلتقي فيها أربعة أنابيب واحد من البئر الثالث وهو من الفولاذ المزيبق، واثنان من البولي إيثيلين قادمين من البئرين الثاني والأول أما الثالث فهو الواصل إلى خزان التجميع الأولي وهو أيضاً من البولي إيثيلين لكن بقطر أكبر. تقوم الفكرة الأساسية في هذه الحالة على قيمة الموجة المنعكسة الناتجة عن عودة موجة الضغط المتشكلة والتي وصلت من الآبار الثلاثة باتجاه الخزان وبالتالي عندما تعود تتعكس وتتنوع إلى كافة الآبار بقيم متساوية مقدارها:

$$\Delta H = \frac{2a_1 a_2 a_3 A_4 * \Delta H}{a_2 a_3 a_4 A_1 + a_1 a_3 a_4 A_2 + a_2 a_1 a_5 A_3 + a_1 a_2 a_3 A_4}$$

حيث تمثل القيم A_1, A_2, A_3, A_4 قيم مساحات مقاطع الأنابيب الأربعة المتصلة بالعقدة على التوالي بدءاً من البئر الأول.

في حين تمثل قيم a_1, a_2, a_3, a_4 قيم سرعة انتشار موجة الضغط على كل أنبوب كل حسب نوعية مادته.

أما ΔH فهي تمثل الفرق بين الضاغط في الحالة الستاتيكية في المنطقة المدروسة وبين الضاغط عند عودة موجة الضغط.

إذا عوضنا القيم سنجد أن قيم الضاغط تكون مرتفعة وتصل إلى (50م) وهي كافية لرفع أي قيمة تكهف أو أي قيم سالبة قابلة للتشكل في رأس أي بئر من الآبار الثلاثة وبالتالي تلغي التكهف. كما يمكن تفسير هذه النتيجة بأن الزمن الذي ترد فيه الموجة من كلا البئرين البعيدين هي متقاربة زمنياً وبالتالي رفعت من قيمة الضاغط بشكل واضح.

أما بالنسبة للضواغط المتشكلة الناتجة عن عودة موجة الضغط فهي قد تكون مرتفعة لكنها ضمن حدود الأمان المسموح بها للفولاذ المزريق وضمن مجال قوة احتماله.

ملاحظة:

يتم التحقق من الضواغط المرتفعة من خلال حساب إجهادات الشد التي يتعرض لها الأنبوب أثناء مرور موجات الضغط المرتفعة ومقارنتها بالقيم المسموح بها والتي تم اختبار الفولاذ عليها:

تمثل المعادلة التالية كيف يتم حساب إجهادات الشد التي يتحملها الأنبوب:

$$\sigma = \frac{D}{2e} \Delta P$$

وطبعاً لحساب الضغط نطبق القانون العام للضغط الهيدروستاتيكي:

$$\Delta P = \rho g \Delta H$$

ثم تتم المقارنة باستخدام الجداول المعروفة الخاصة بنوعية المادة وقدرة احتمالها حسب البولي إيثيلين أو الفولاذ المزريق، مع العلم أن سماكة الأنابيب من الفولاذ تصل إلى 5مم أما البولي إيثيلين فهي (6.6م).

سنجري عملية الحساب طبعاً عند مقطعين أساسيين في العمل: هما منطقة ما بعد المضخة، والثانية منطقة رأس البئر فنجد:

1- على اعتبار كامل الأنبوب من الفولاذ المزيبق حيث أعلى ضاغط في هذه الحالة هو بحدود (800م) كما وجدنا من الأشكال والنتائج السابقة، فإذا حسبنا قيمة إجهاد الشد سنجد:

$$\sigma = \frac{P.D}{2.e}$$

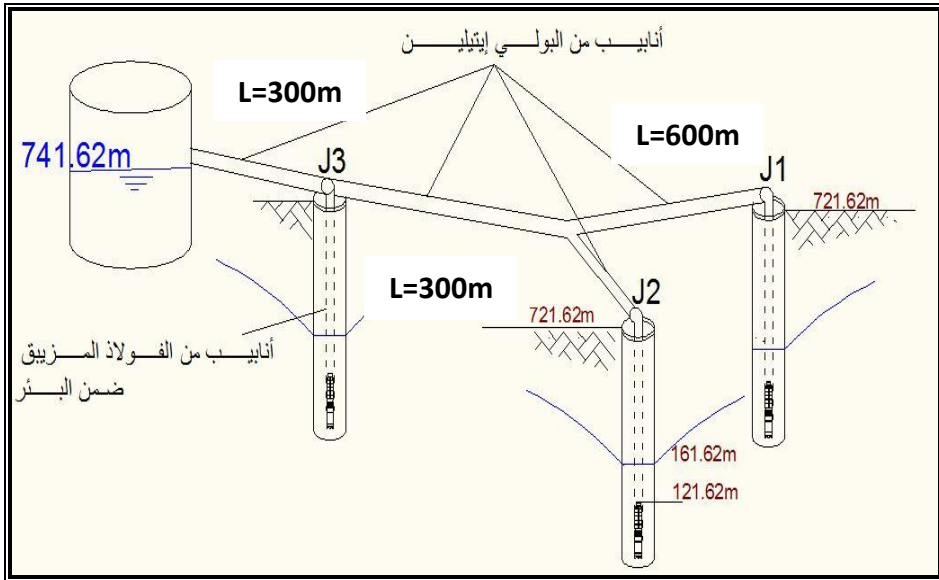
واعتماداً على معطيات الأنبوب الفولاذي سنجد قيمة إجهاد الشد بحدود (53.61Mpa) وهي مقبولة مقارنة بقيمة (860N/mm²).

2- أما إذا أخذنا حالة الأنبوب مكون من جزأين: ضمن البئر من الفولاذ المزيبق وعلى المسار من رأس البئر وحتى خزان التجميع فهو من البولي إيثيلين، عندها يلزمنا المقارنة مرة بمقاومة الفولاذ بعد المضخة مباشرة، وأخرى بمقاومة البولي إيثيلين عند رأس البئر. بالحساب سنجد القيمة عند رأس البئر هي (3.08N/mm²)، وهي مقبولة مقارنة مع الإجهاد الأعظمي الذي يتحمله البولي إيثيلين وهو (15N/mm²). أما بعد المضخة فهي (45.26N/mm²)، وهي مقبولة مقارنة مع الإجهاد الأعظمي الذي يتحمله الفولاذ المزيبق.

الحالة الثانية:

وهي تمثل حالة اتصال ثلاثة آبار على مجمع رئيسي واحد ولكن على مبدأ (2+1) كما

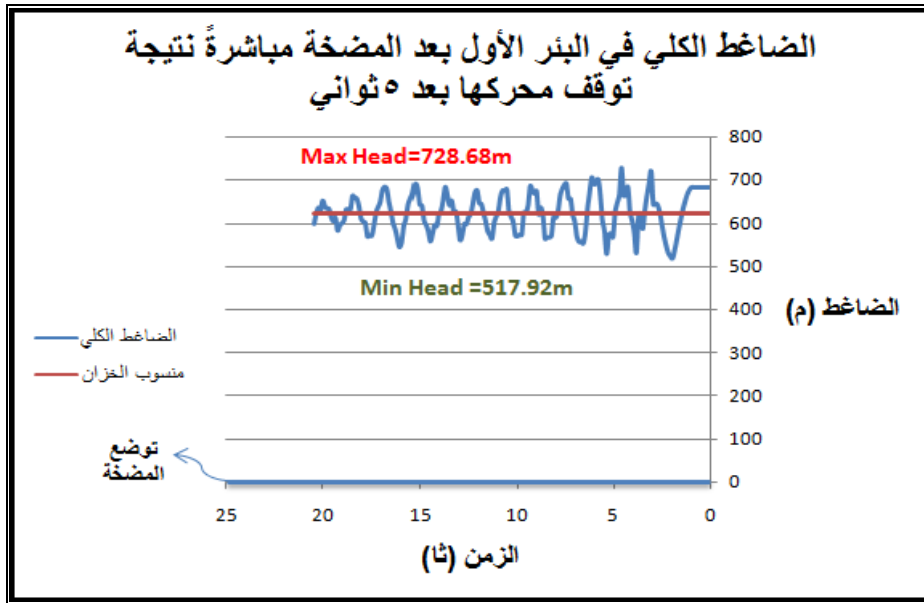
هو موضح في الشكل (53):



شكل (53) وصل الآبار الثلاثة بشكل منفصل.

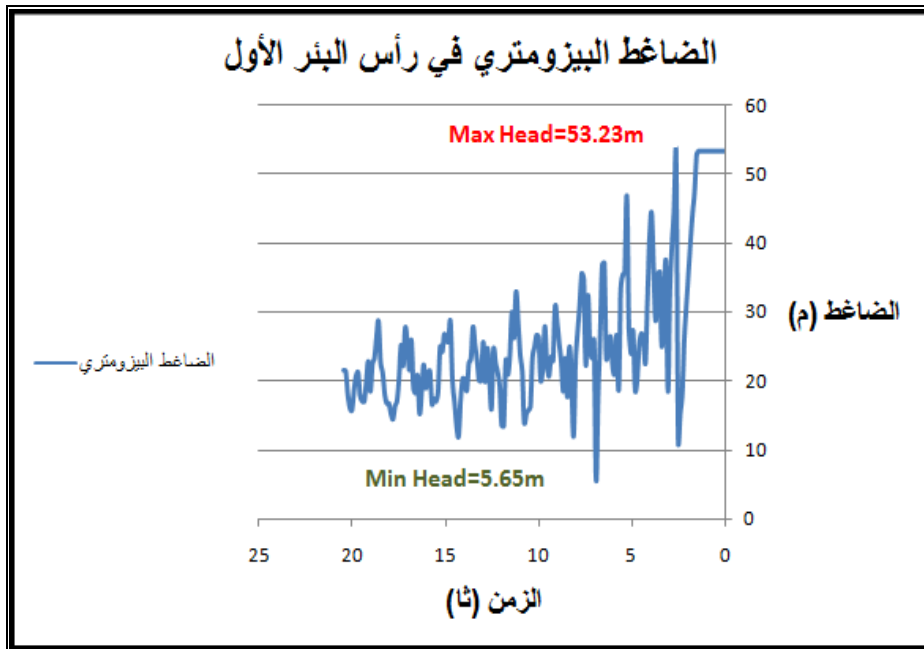
1- بمشاركة الخزان بالجريان العكسي:

سنجد قيمة الضاغط في البئر الأبعد أو البئر الأول الذي يبعد مسافة (1200م) عن الخزان في المقطع ما بعد المضخة بالشكل (54):



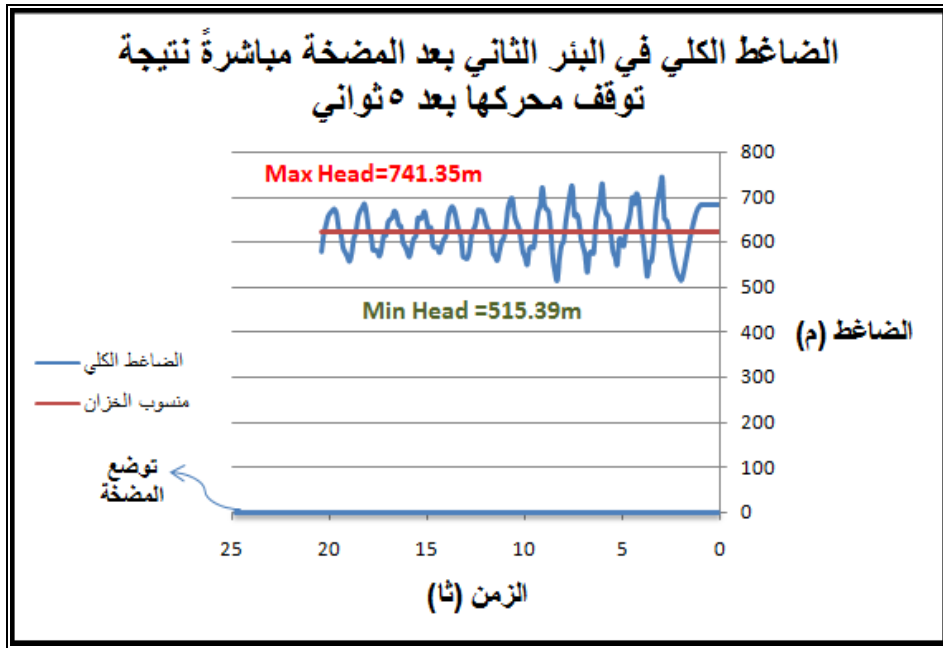
شكل (54) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة للبئر الأول.

أما في منطقة رأس البئر سنجد الضواغط بالشكل (55) حيث نلاحظ انعدام أثر الموجة المنعكسة بالجريان وانخفاض الضاغط ولم نحصل على قيم سالبة بشكل كامل:



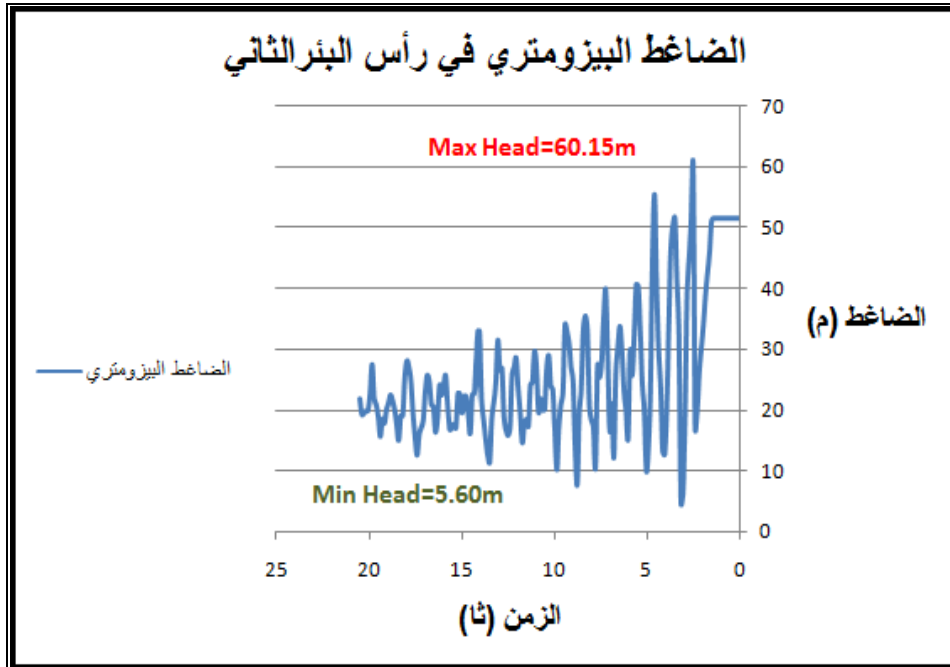
شكل (55) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

أما الضواغط المتشكلة في منطقة ما بعد المضخة في البئر الثاني الذي يبعد عن الخزان مسافة (1050م) تظهر بالشكل (56):



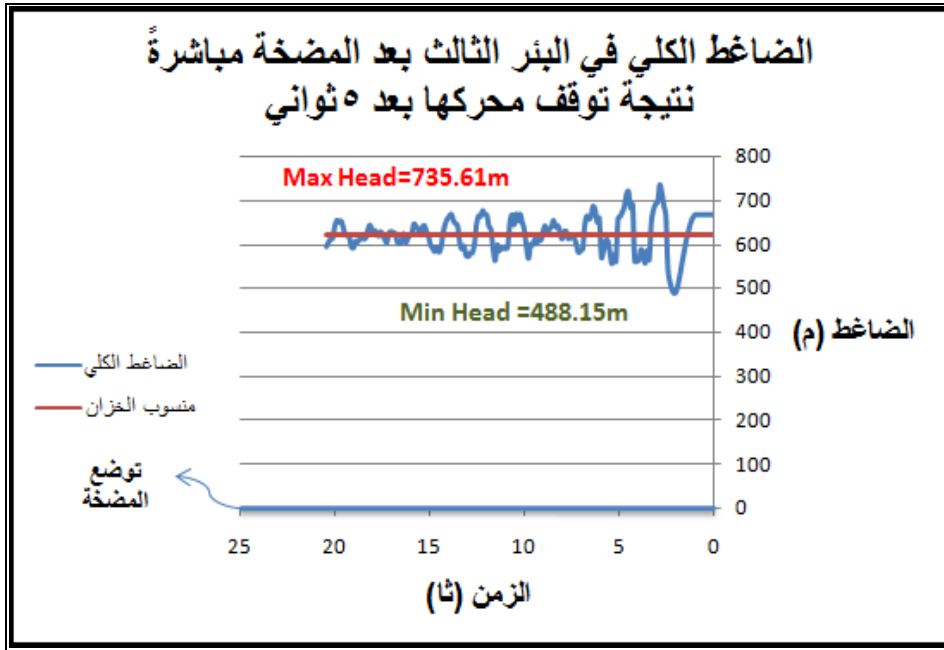
شكل (56) الضاحط الكلي بعد المضخة مباشرة للبئر الثاني.

أما رأس البئر الثاني سنجد الضواغط بالشكل (57):



شكل (57) الضاحط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

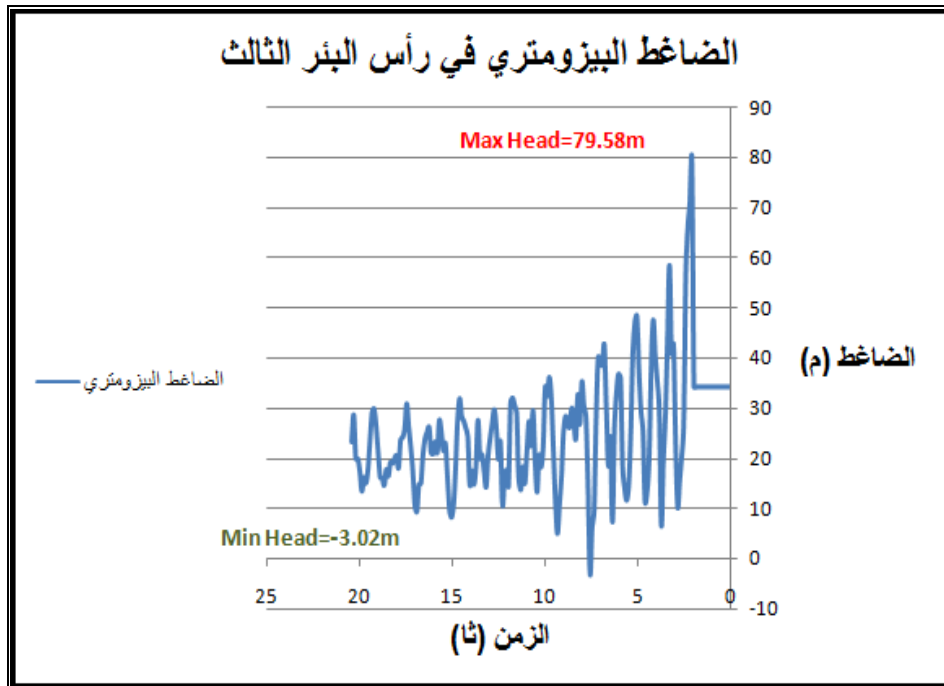
أما في البئر الأقرب إلى خزان التجميع الذي يبعد (300م) عن الخزان سنجد الضواغط التالية في منطقة ما بعد المضخة:



شكل (58) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.

أما بالنسبة لرأس البئر سنجد الضواغط تصل على قيم سالبة لكنها لم تتجاوز حد التكهف

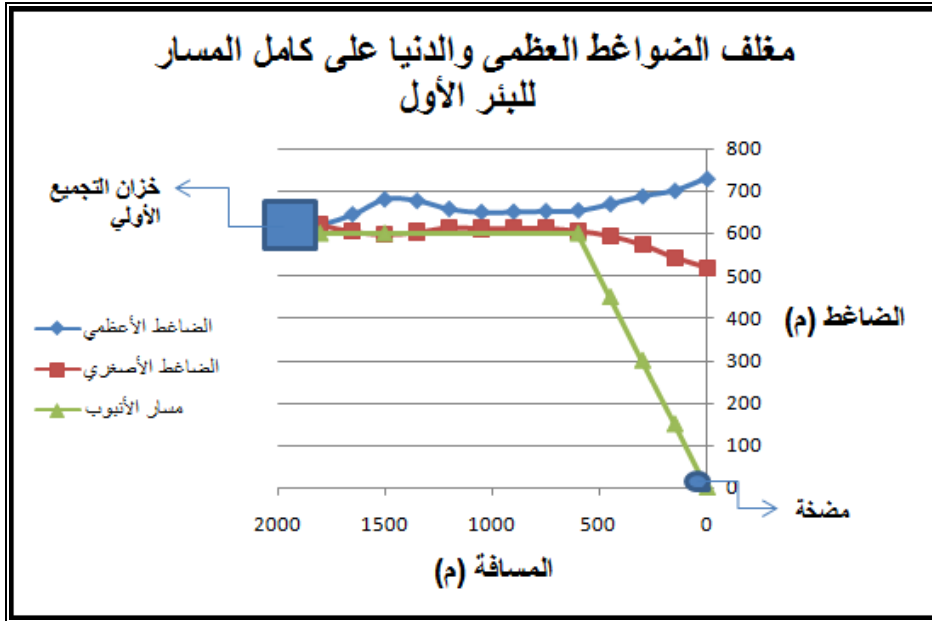
وهي مبينة بالشكل (59):



شكل (59) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.

هذا وتوضح الأشكال (60)،(61)،(62)، قيم الضواغط الأعظمية و الأصغرية على كامل

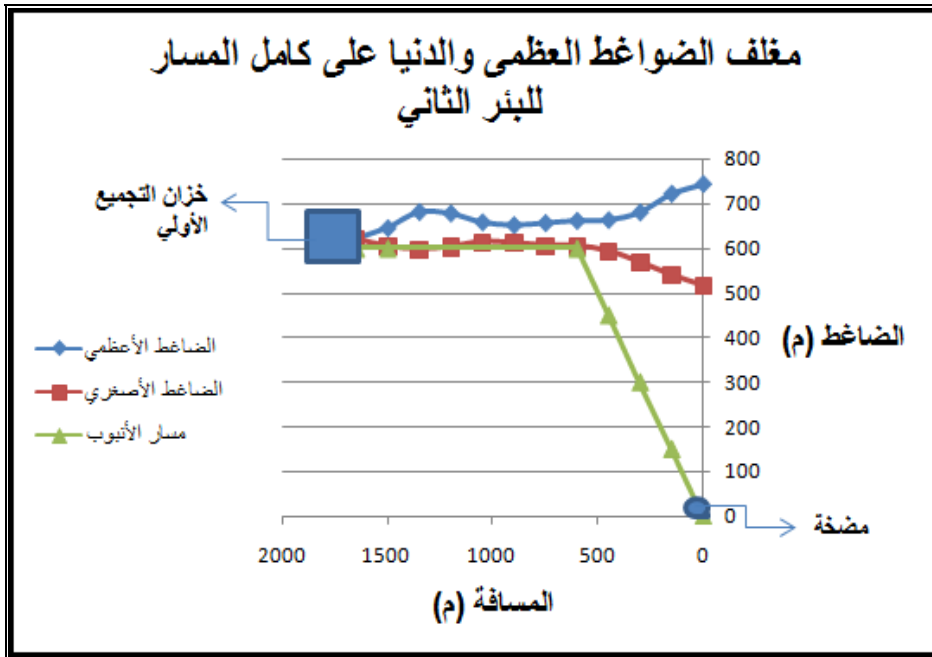
المسار من البئر الأول وحتى خزان التجميع لكل بئر:



شكل (60) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبنر الأول.

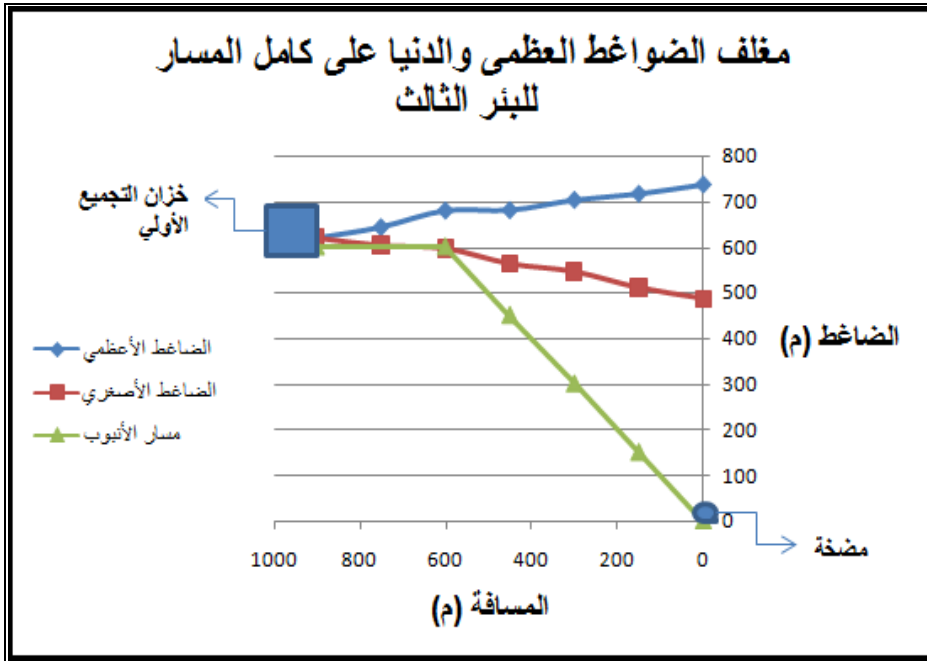
أما الضواغط المتشكلة على كامل المسار للبنر الثاني وحتى خزان التجميع تظهر في

الشكل (61):



شكل (61) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبنر الثاني.

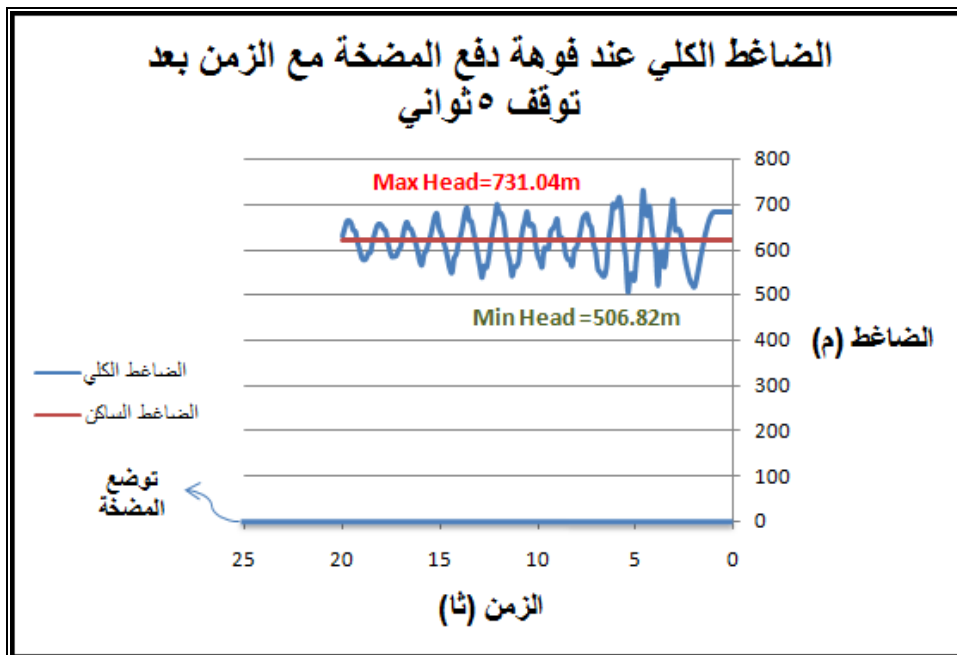
أما البئر الثالث فنجد قيم الضواغط على كامل المسار كما في الشكل (62):



شكل (62) الضواغط الكلية على كامل مسار الأنابيب للبيتر الثالث.

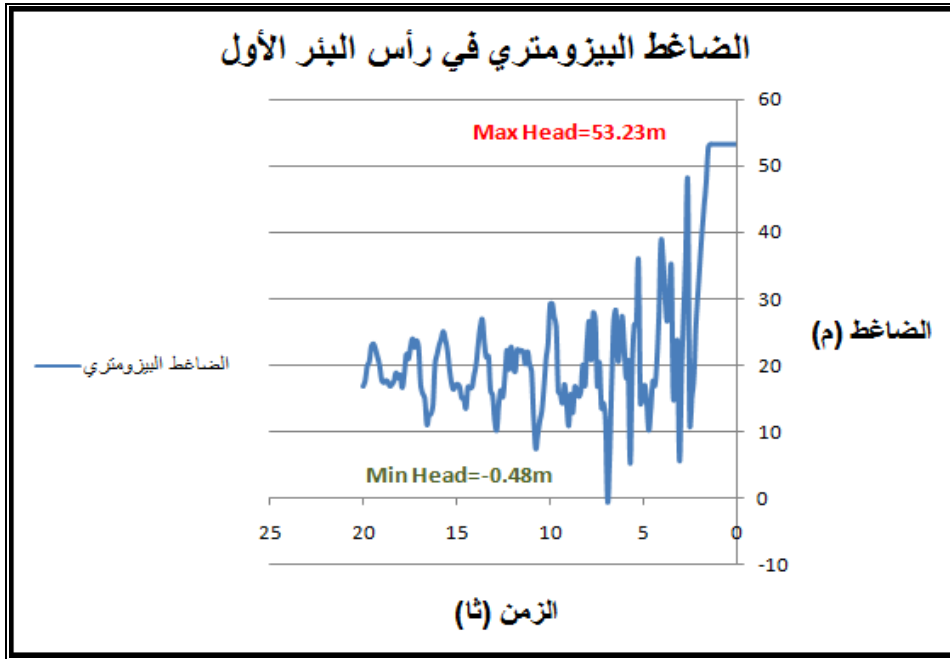
2- في حال عدم مشاركة الخزان بالجريان العكسي:

سنجد أن الضواغط لحالة البيتر الأبعد في منطقة ما بعد المضخة بالشكل (63):



شكل (63) الضواغط الكلية بعد المضخة مباشرة في البيتر الأول.

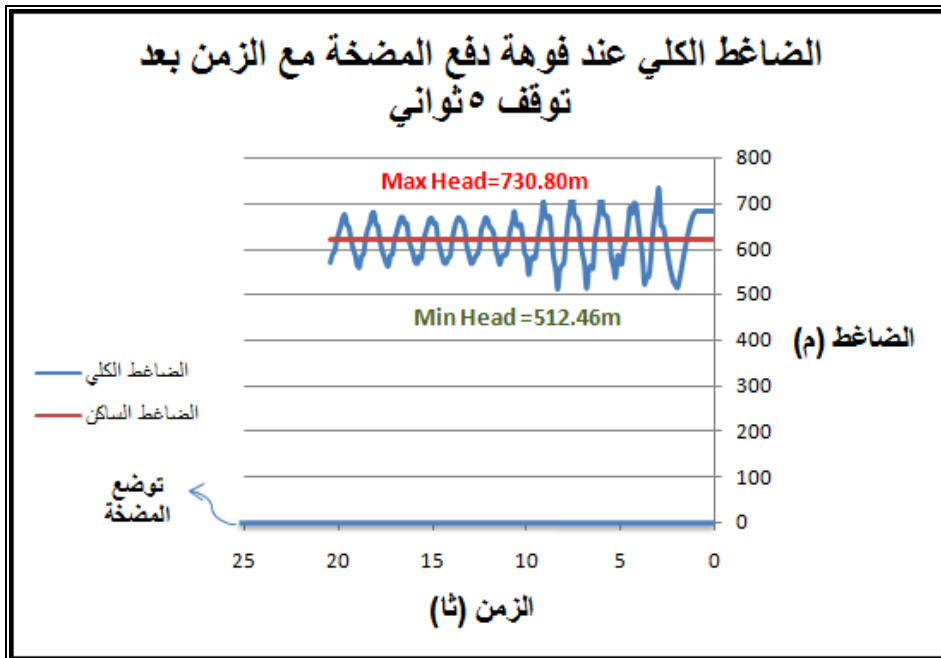
والضواغط البيزومترية المتشكل في منطقة رأس البيتر فهي كما يوضحها الشكل (64):



شكل (64) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

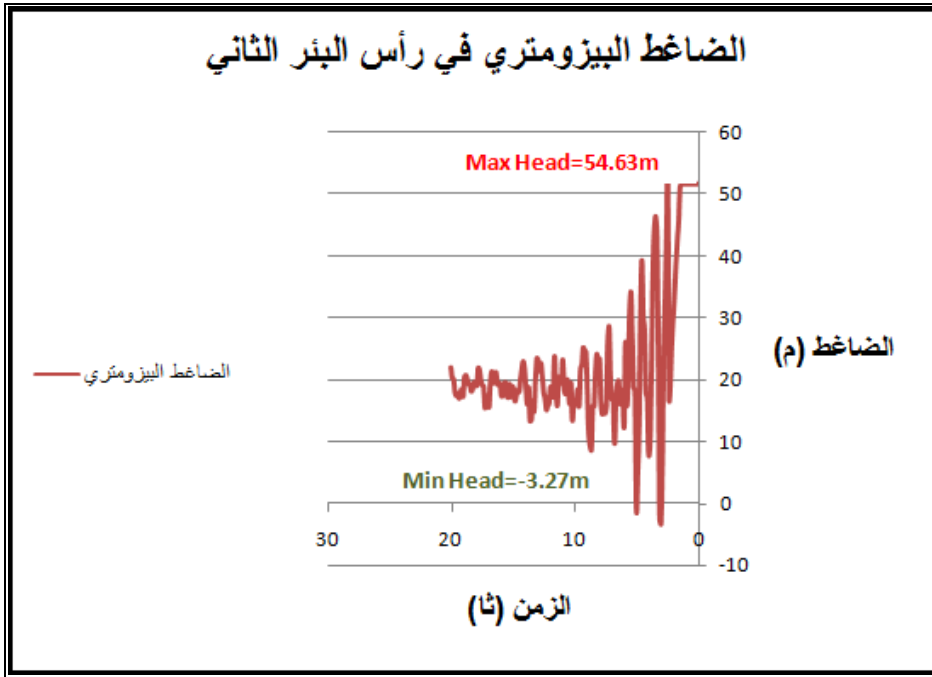
يوضح الشكل السابق ازدياد الضاغط الأدنى بشكل واضح نتيجة عدم مشاركة الخزان في الموجة المنعكسة التي أساساً ليس لها ذلك التأثير.

أما للبئر الثاني سنجد الضواغط في منطقة ما بعد المضخة بالشكل (65):

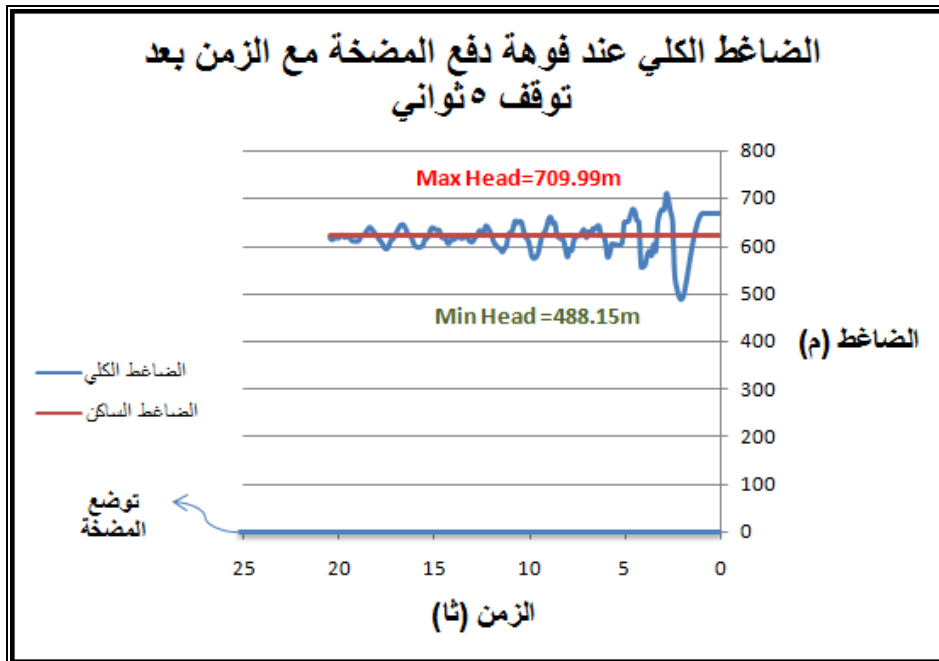


شكل (65) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.

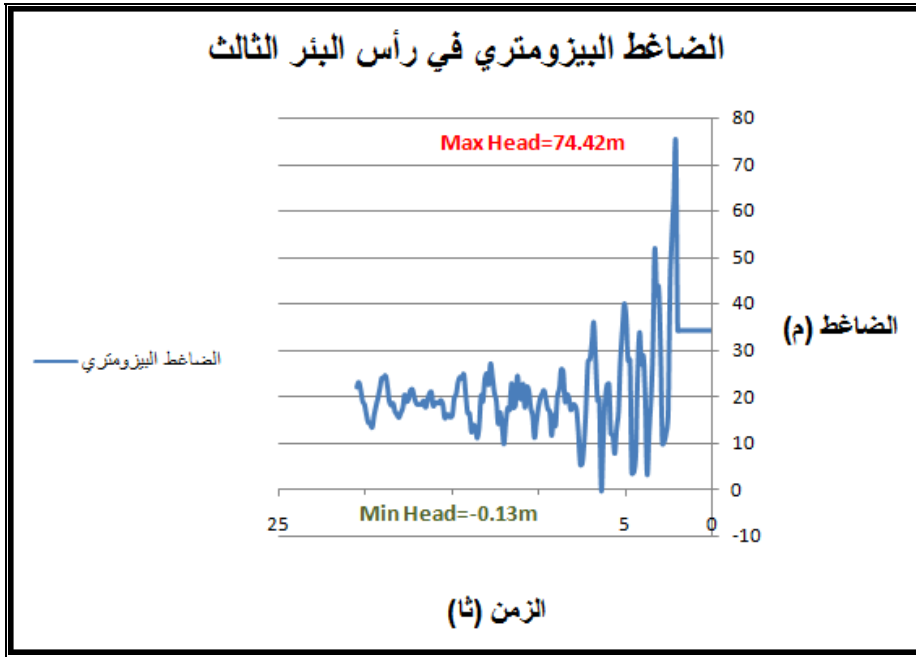
أما رأس البئر فيوضح الضاغط بالشكل ولم نصل إلى قيمة ضغط تبخر السائل (66):



شكل (66) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني. أيضاً نلاحظ أن قيم الضغط السالب لم تصل لقيم حرجة هذه الحالة. أما الضواغط في البئر الثالث لمنطقة ما بعد المضخة مباشرة فهي مبينة بالشكل (67):

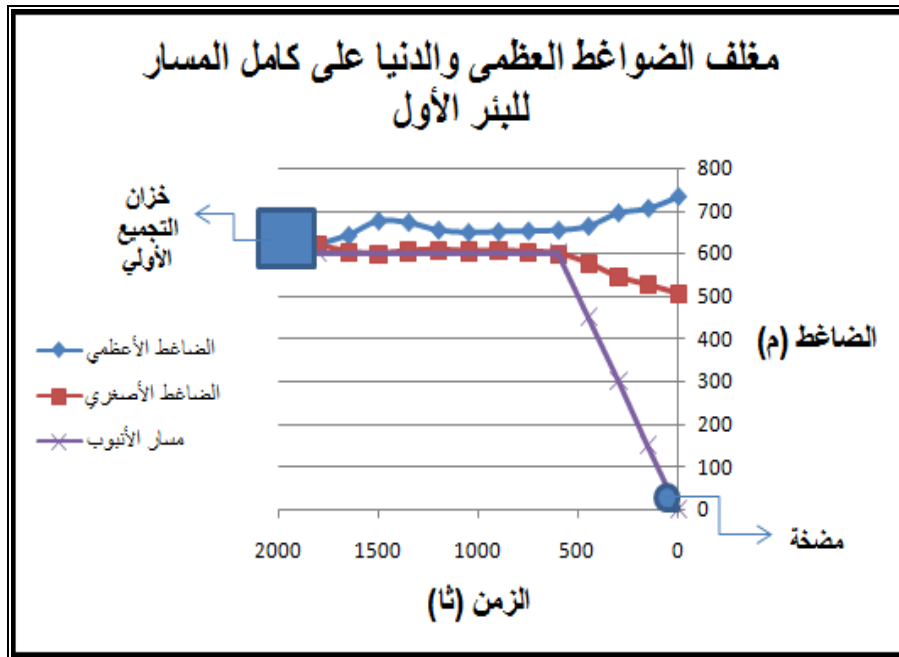


شكل (67) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث. أما الضاغط في رأس البئر فهو مبين بالشكل (68):



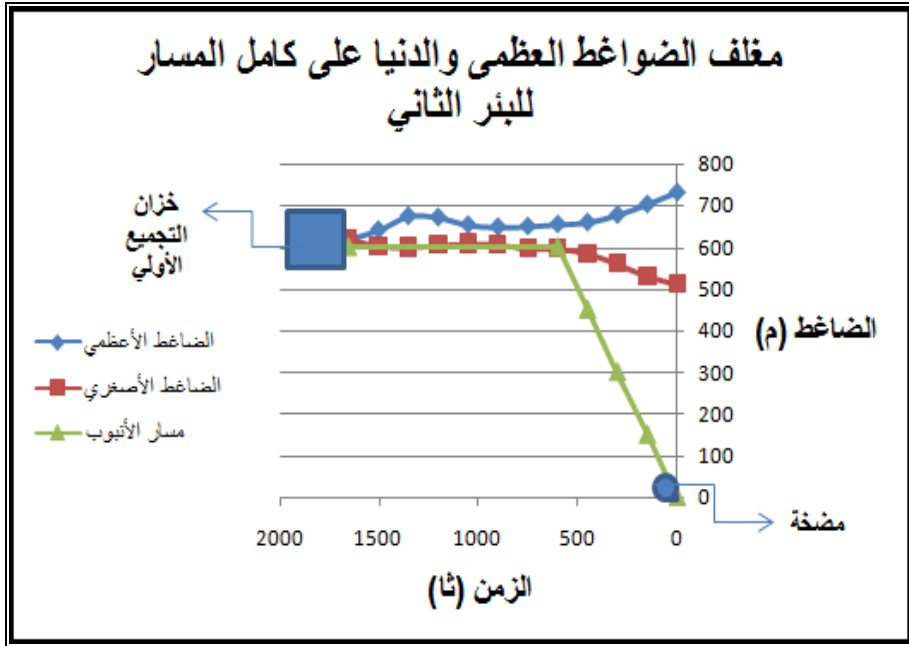
شكل (68) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.

يمثل الشكل (69) قيم الضاغط الأعظمي والأدنى على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول:



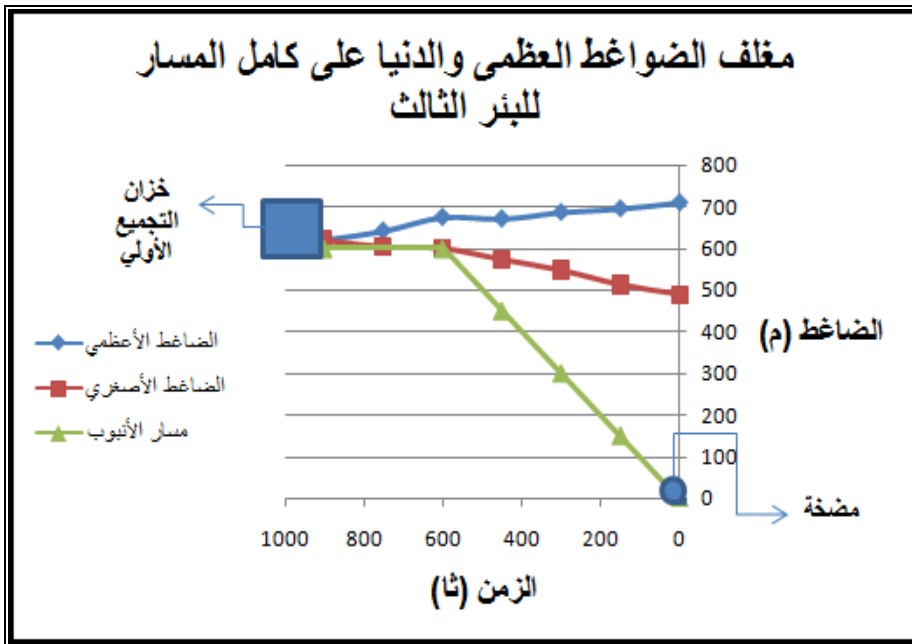
شكل (69) الضاغط الكلي على كامل المسار للبئر الأول.

أما الضواغط العظمى والدنيا على كامل المسار للبئر الثاني فهي موضحة بالشكل (70):



شكل (70) المضاغطة الكلي على كامل المسار للبيتر الثاني.

أما الضواغط العظمى والدنيا على كامل المسار للبيتر الثالث فهي موضحة بالشكل (71):



شكل (71) المضاغطة الكلي على كامل المسار للبيتر الثالث.

نتيجة:

يمكن أن نلاحظ أن مشاركة الخزان في الجريان العكسي أفضل حيث ترفع من الضواغط

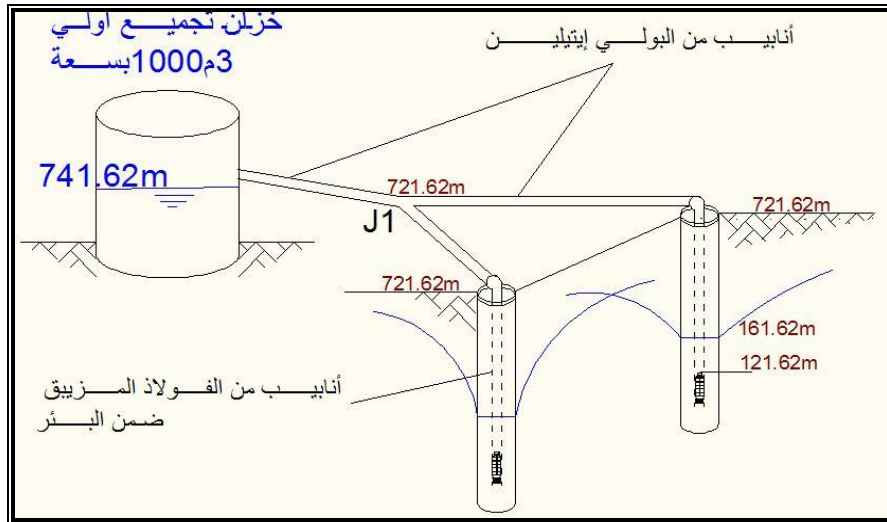
في رأس البئر الأبعد عن الخزان، إذ أنها تساهم في رفع المضاغطة عند رأس العقدة التي يتصل فيها كلا البئرين حيث تصل قيمة المضاغطة إلى (637.20م)، في حين أن القيمة في حالة الضخ قبل

الانقطاع كانت (634.25م). وإذا قارناها مع الضاغط في العقدة عند عدم مشاركة الخزان سنجدها (627.29م)، وهي قيمة أصغر من تلك في الحالة المستقرة للجريان. إذاً هذا الفرق في الضاغط يوضح أثر الموجة المنعكسة على الضاغط وعلى حدوث التكيف في رأس البئر، أما البئر الثالث الأقرب إلى الخزان فإن أثر الموجة المنعكسة يكون في لحظة زمنية معينة قليلاً حيث وصلت قيمة الضاغط إلى (596.98م) في حين أثرت عدم مشاركة الخزان في الجريان العكسي بشكل إيجابي على البئر الثالث حيث لم يتعدى الانخفاض (-0.13م) حيث كانت قيمة الضاغط (599.87م). نلاحظ أن هذه الحالة تعطي تفاوتاً واضحاً حيث من المفروض عند ازدياد طول الأنبوب تعرضه للتكيف بشكل أكبر مما لو كان قريباً. ولعل التفسير الأبرز لذلك هو وجود عقدتين على نفس الخط، حيث يلتقي البئران الأبعد أولاً ثم البئر الثالث لوحده، فإن أثر الموجة المنعكسة يتذبذب حول قيم صغرى وعظمى وهي غير متوافقة زمنياً مع القيم الصغرى والعظمى التي تصل إلى رأس باقي العقد، وذلك حسب ورود موجة الضاغط من كل بئر واندماجها مع باقي الأجزاء من الناقل.

الحالة الثالثة:

وهي تمثل حالة بئرين متصلين بذات النقطة فقط وهنا أخذنا البئرين الثاني والثالث الأبعد

عن الخزان ولم ندخل البئر الأقرب إلى الخزان كما يوضح الشكل (72):

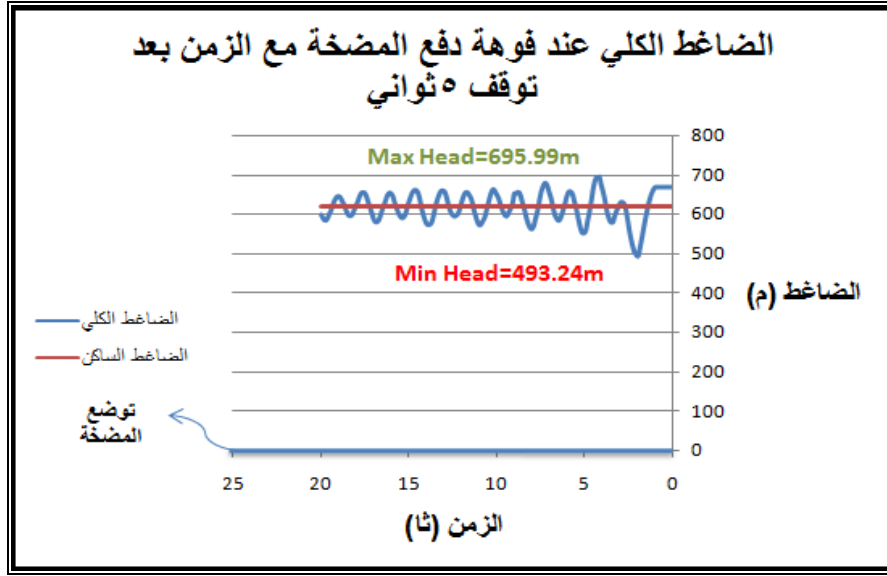


شكل (72) وصل بئرين إلى نفس العقدة.

وكالعادة تمت دراسة المقطع بعد المضخة مباشرةً في كل بئر إضافة إلى منطقة رأس البئر

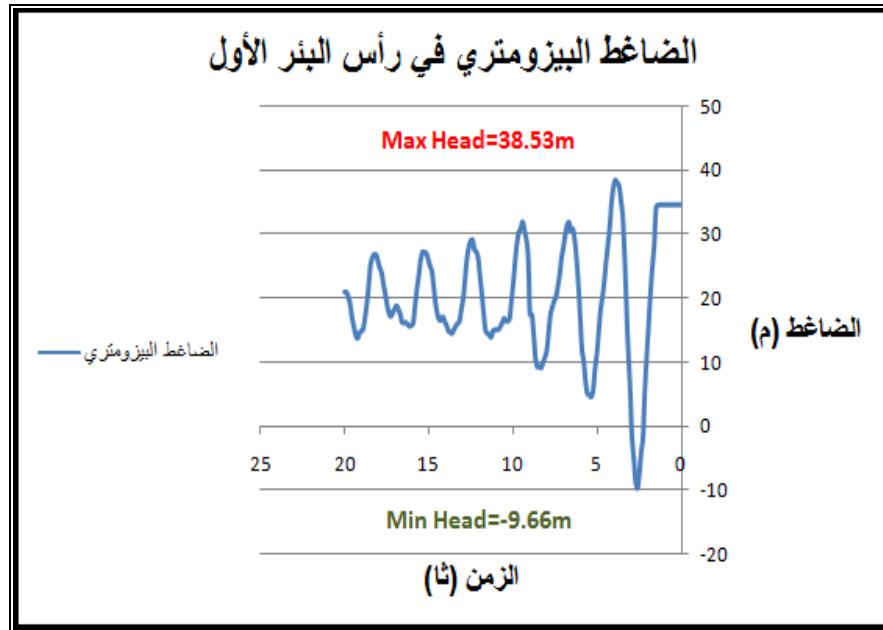
في البئر الأول الأبعد عن الخزان مسافة مقدارها (900م).

1- على اعتبار مشاركة الخزان بالجريان العكسي عند انقطاع التيار عن محرك المضخة:



شكل (73) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.

أما الضاغط المتشكل في رأس البئر في هذه الحالة يعطى بالشكل (74):

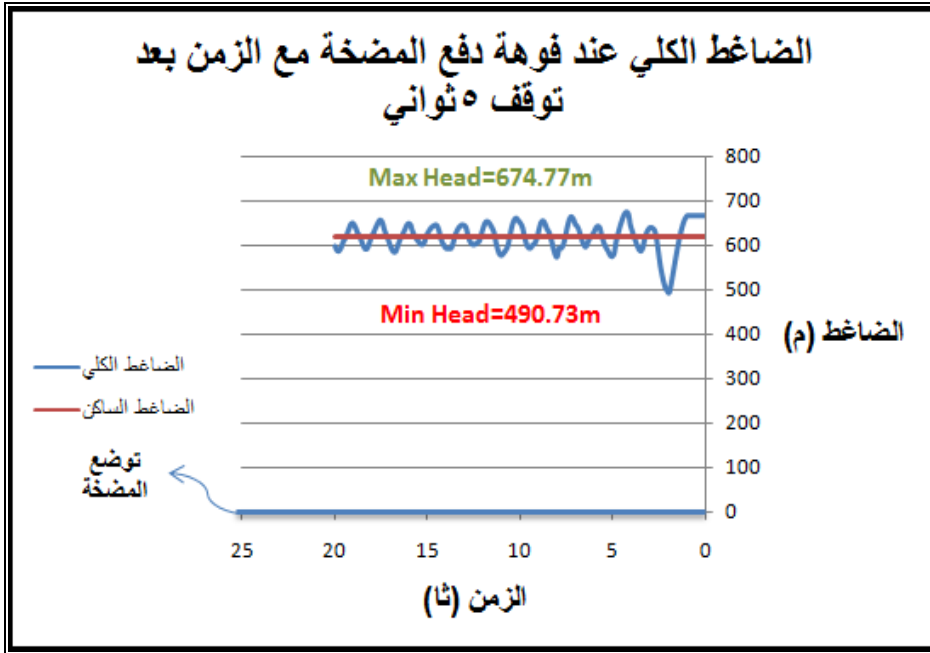


شكل (74) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

نلاحظ التكيف بشكل واضح في البئر الأول مع ازدياد البعد عن الخزان.

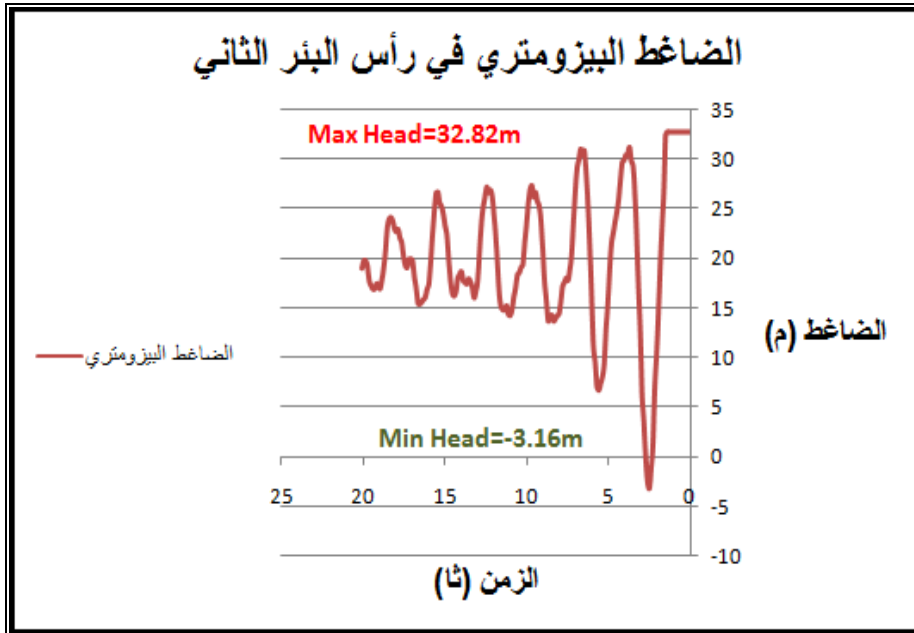
أما الضواغط المتشكلة في البئر الذي يبعد (300م) عن الخزان في منطقة ما بعد المضخة

بالشكل (75):



شكل (75) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.

أما الضاغط المتشكل في رأس البئر الثاني يعطى بالشكل (76):



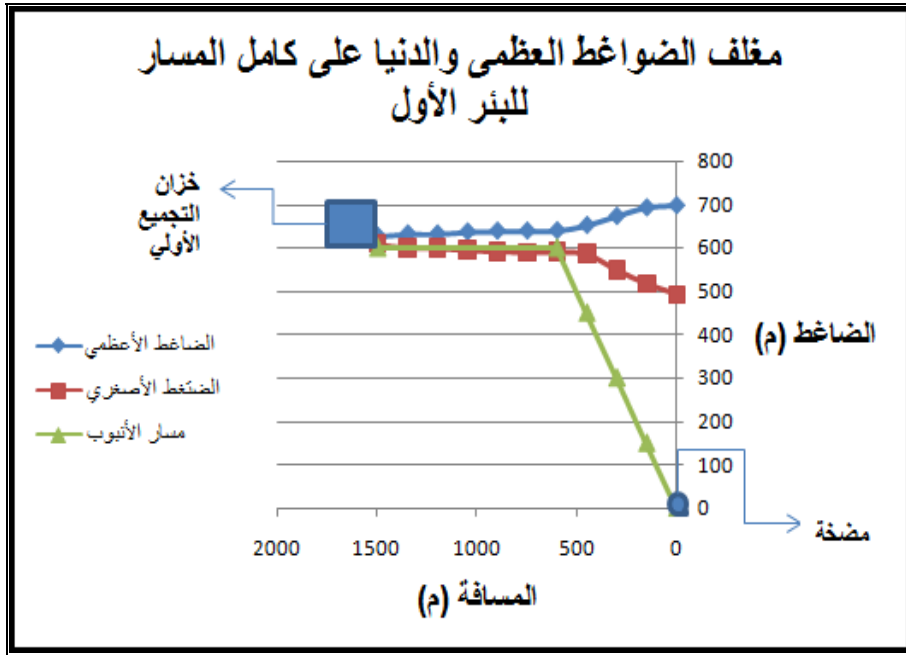
شكل (76) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

طبعاً نلاحظ أن التكهف وصل إلى قيمة قليلة في رأس البئر لهذه الحالة ويلعب انعكاس

الموجة إضافة إلى قرب البئر من الخزان إضافة إلى مشاركة الخزان في الجريان العكسي الذي

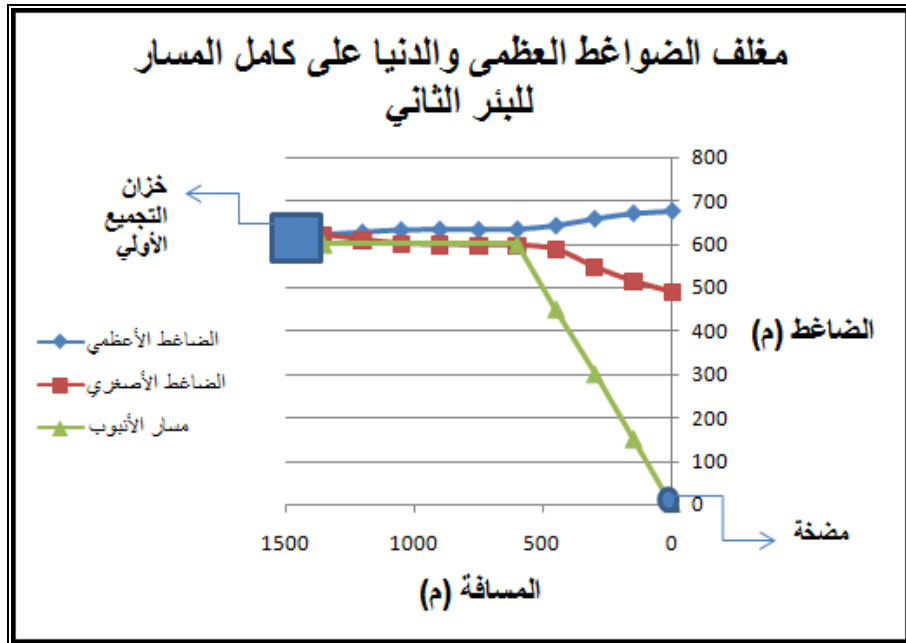
يرفع القيم المنخفضة للضاغط دوراً في انعدام تقريبي للتكهف.

في حال درسنا الضواغط على كامل المسار سنجد للبئر الأول الشكل (77):



شكل (77) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبيئر الأول.

أما الضواغط الدنيا والعظمى للبيئر الثاني سنجدها على كامل المسار بالشكل (78):

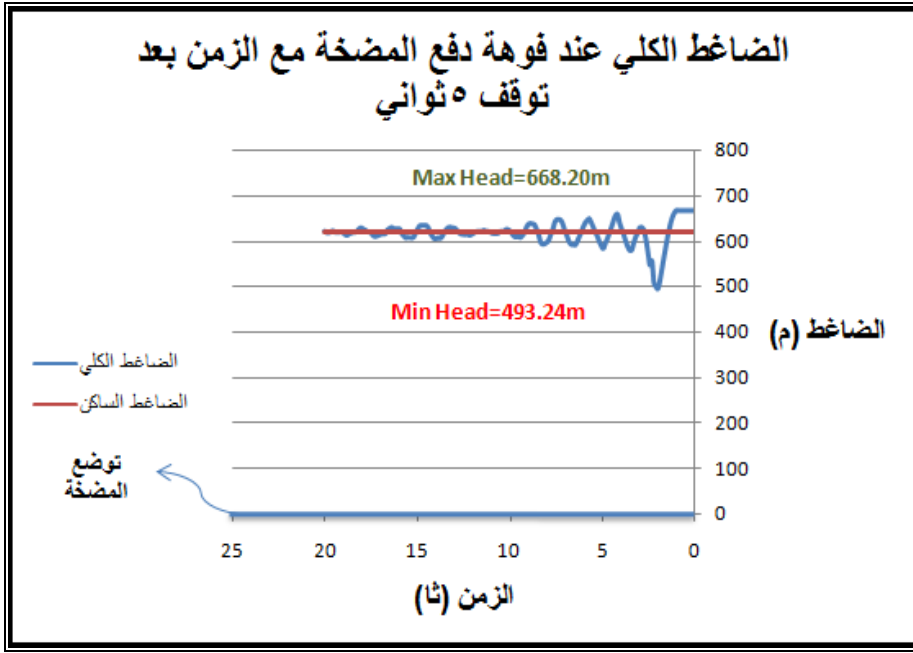


شكل (78) الضاغط على كامل مسار الأنبوب للبيئر الثاني.

ومن خلال الشكل نجد الأثر الطفيف للتكهف بالنسبة لمنسوب رأس البيئر الأساسي.

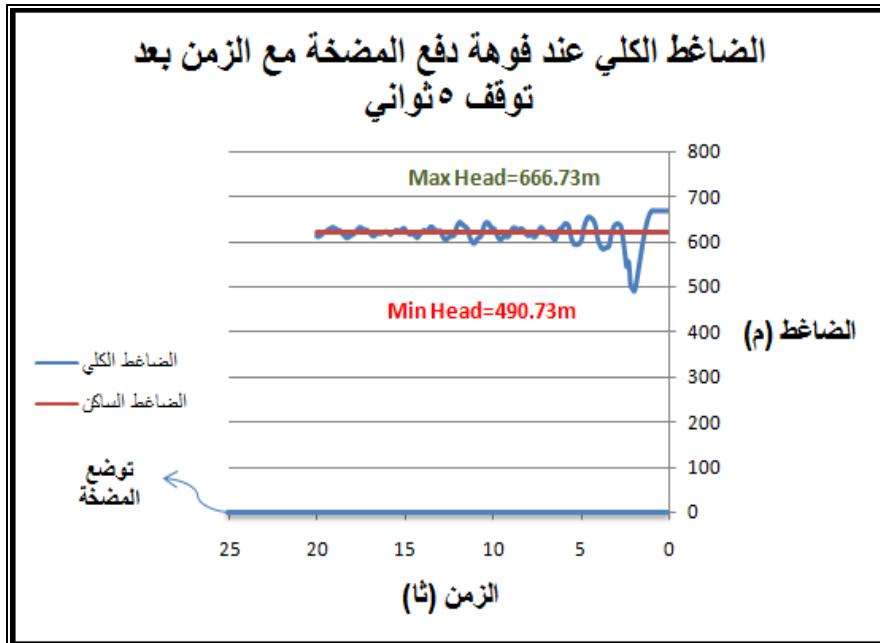
2- على اعتبار عدم مشاركة الخزان في الجريان العكسي:

بالنسبة للضاغط في البيئر الأول بعد المضخة مباشرة سنجد في البيئر الأبعد الأول:



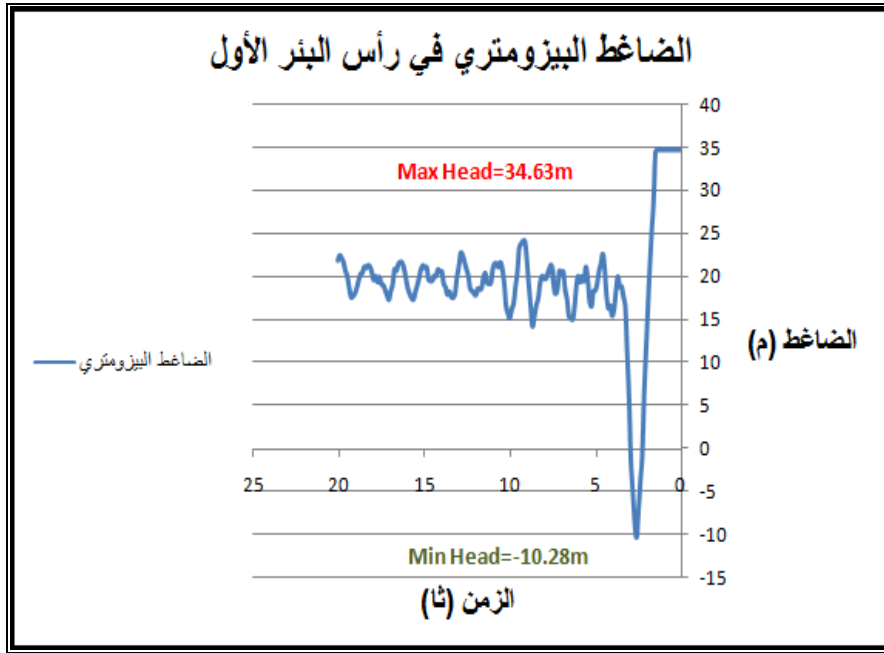
شكل (79) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.

أما الضواغط في البئر الثاني للمقطع بعد المضخة مباشرة كما في الشكل (80):



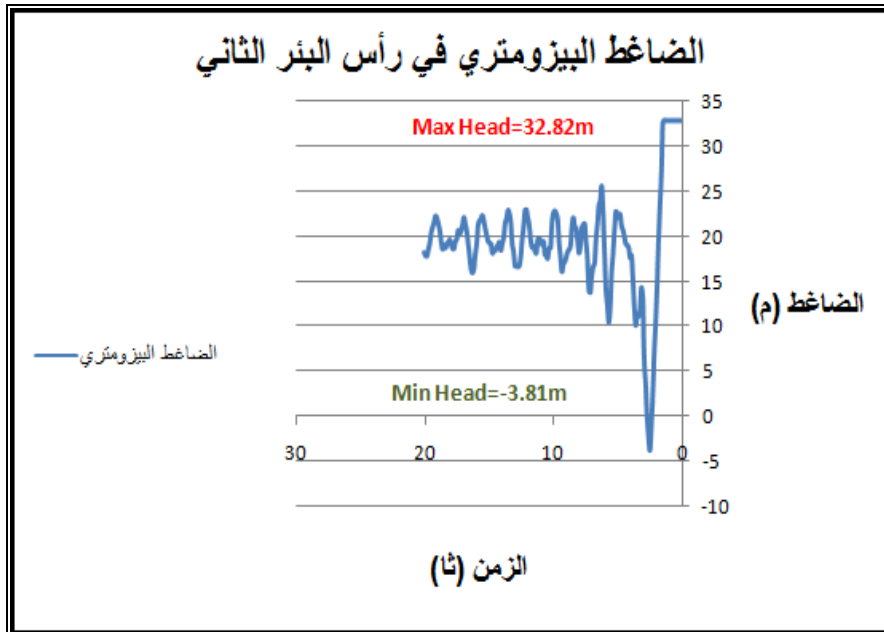
شكل (80) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.

أما الضواغط في رأس البئر الأول فهي مبينة في الشكل (81):



شكل (81) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

أما الضواغط في رأس البئر الثاني فهي مبينة بالشكل (82):

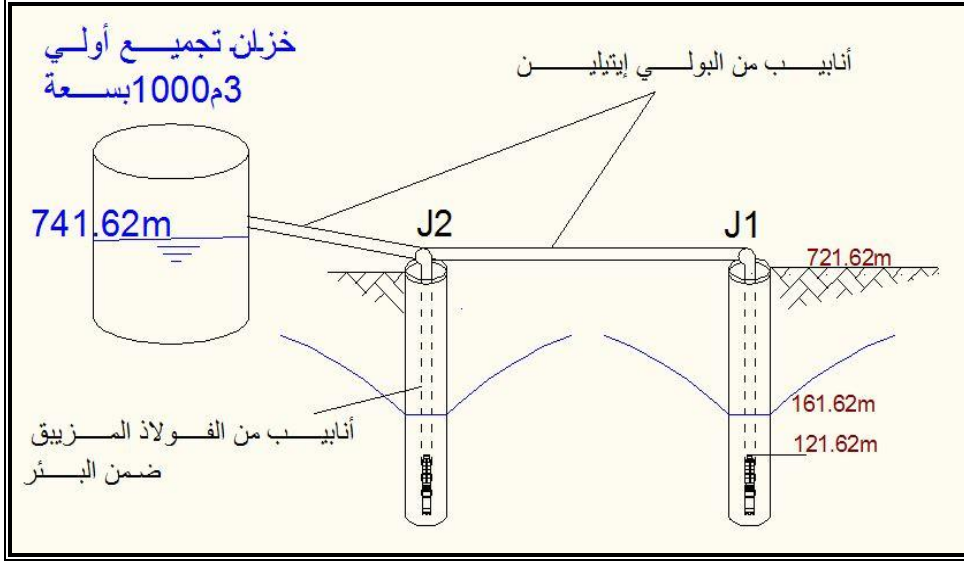


شكل (82) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

نلاحظ تماماً مدى أثر مشاركة الخزان على رفع قيمة موجة الضغط الموجبة المتشكلة بعد المضخة مباشرةً كما نلاحظ مساهمتها في الضاغط السالب تماماً ومن الملاحظ في هذه الحالة أن التكهف يصل فيها لقيم حرجة من الضغط السالب في منطقة رأس البئر.

الحالة الرابعة:

سنأخذ هنا حالة بئرين متصلين لكن على التسلسل مباشرةً إلى البولي إيثيلين كما في الشكل (83):



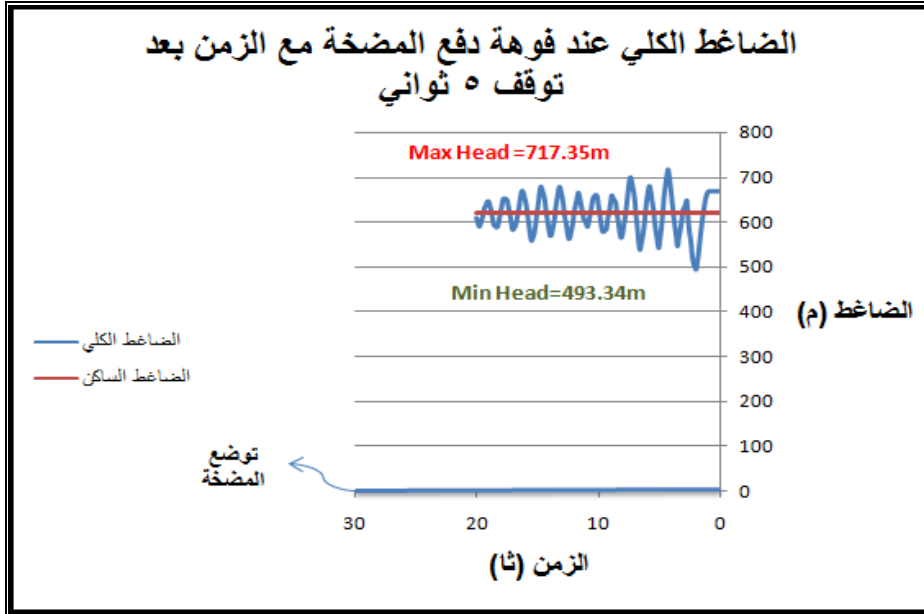
شكل (83) وصل بئرين إلى رأس أحدهما الآخر.

باستخدام الإكسل سنحصل على قيم الضواغط المتشكلة في البئرين الأول والثاني في

المنطقة بعد المضخة مباشرةً.

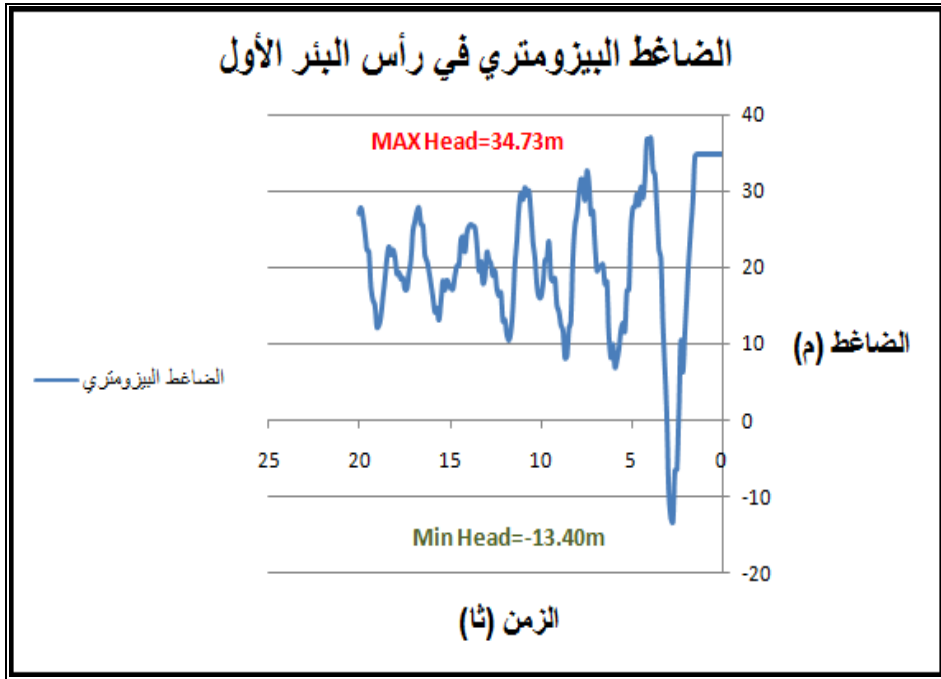
1- بمشاركة الخزان في الجريان العكسي:

سنجد الضاغط في البئر الأول على بعد (900م) بعد المضخة مباشرةً مبين بالشكل (84):

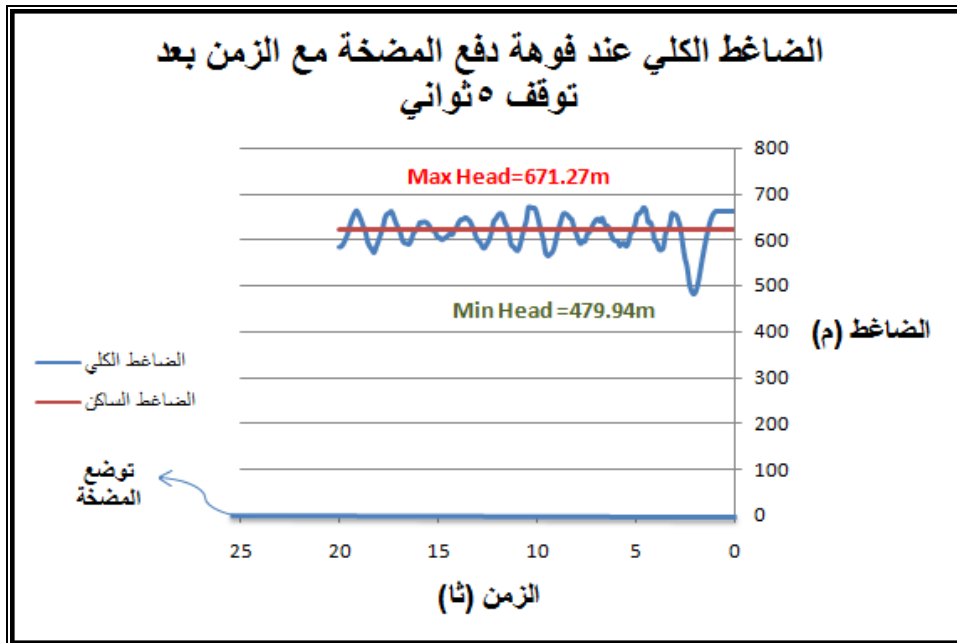


شكل (84) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرةً في البئر الأول.

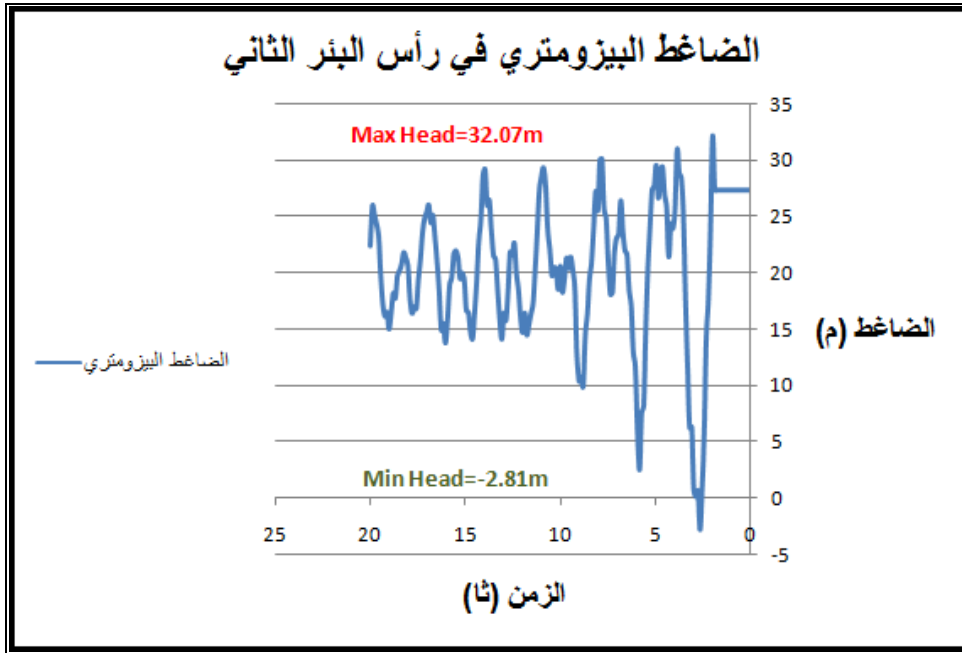
أما لحالة رأس البئر سنجد الضواغط مبينة في الشكل (85):



شكل (85) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
 و في البئر الثاني أي البئر الأقرب على خزان التجميع الأولي بمقدار (300م) سنجد
 الضواغط في منطقة ما بعد المضخة بالشكل (86):



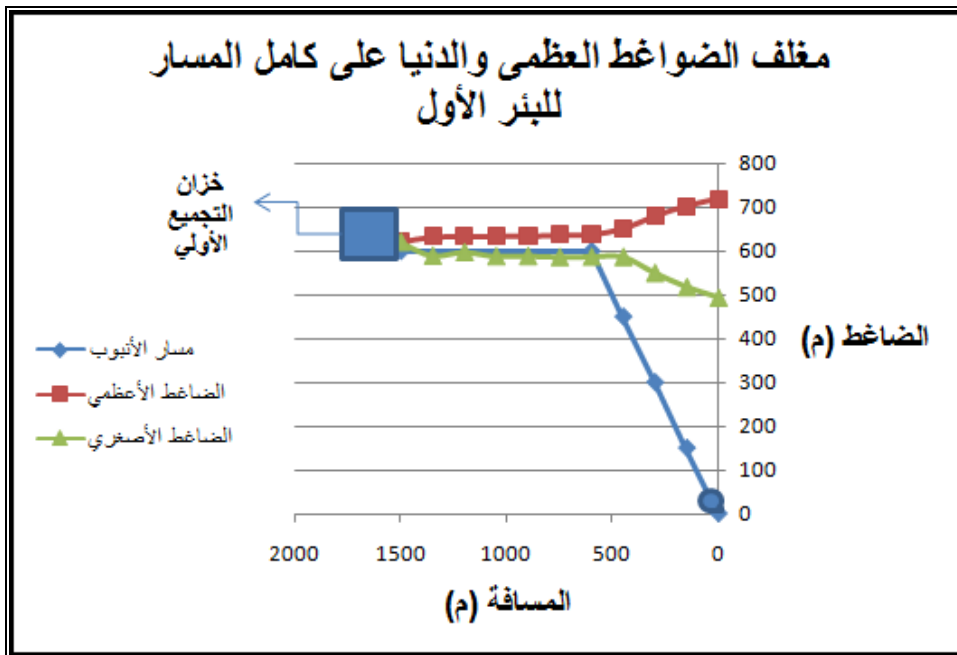
شكل (86) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
 أما بالنسبة لرأس البئر فيعطى الضاغط بالشكل (87):



شكل (87)الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

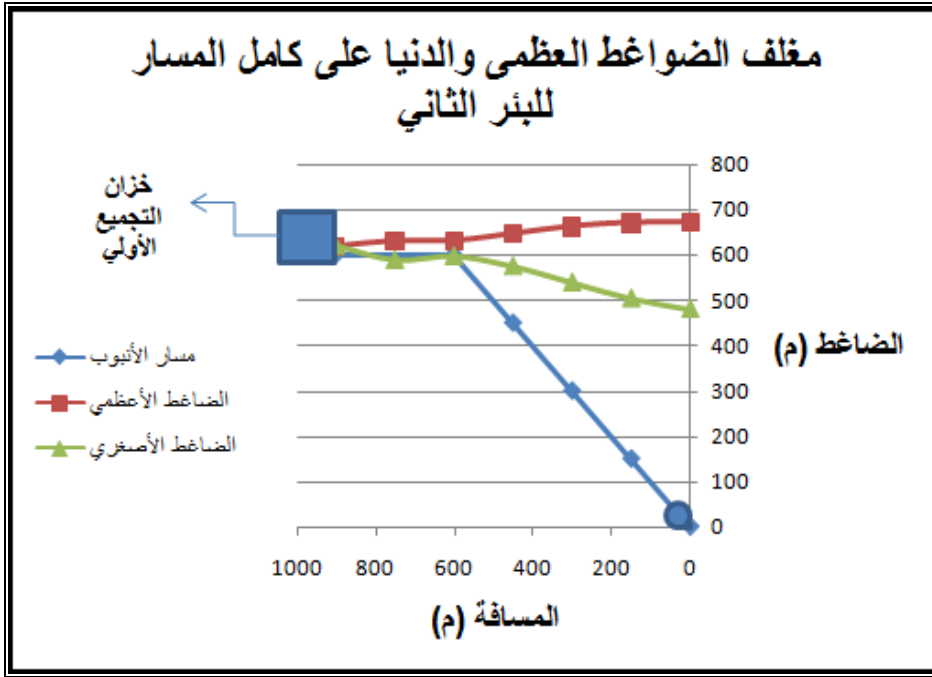
وبالنسبة للضواغط على كامل المسار سنجد قيم الضاغط العظمى والدنيا ممثلة بالشكل

(88):



شكل (88) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبنر الأول.

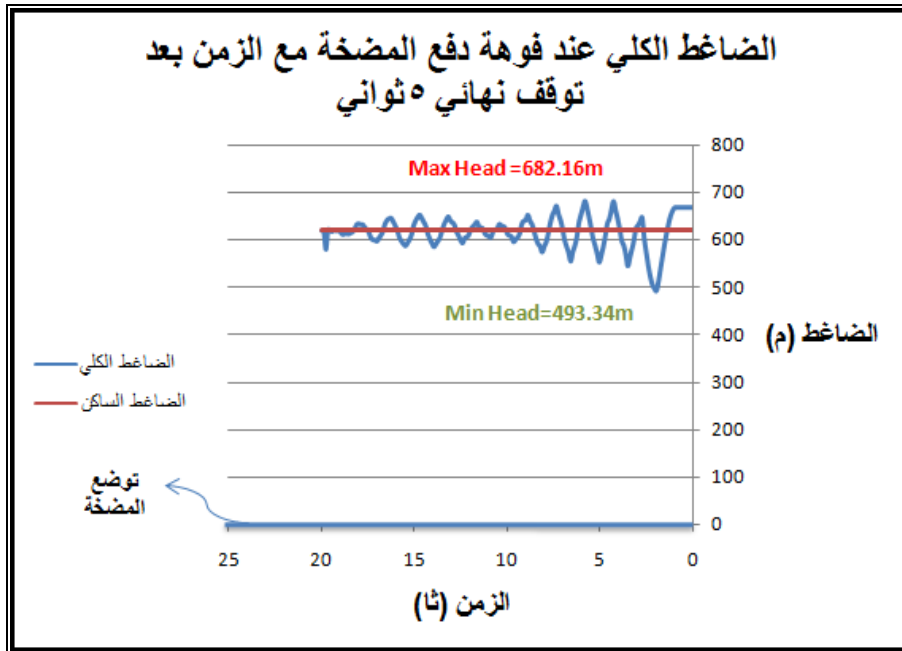
أما في البئر الثاني سنجد الضواغط على كامل المسار ممثلة بالشكل (89):



شكل (89) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبيتر الثاني.

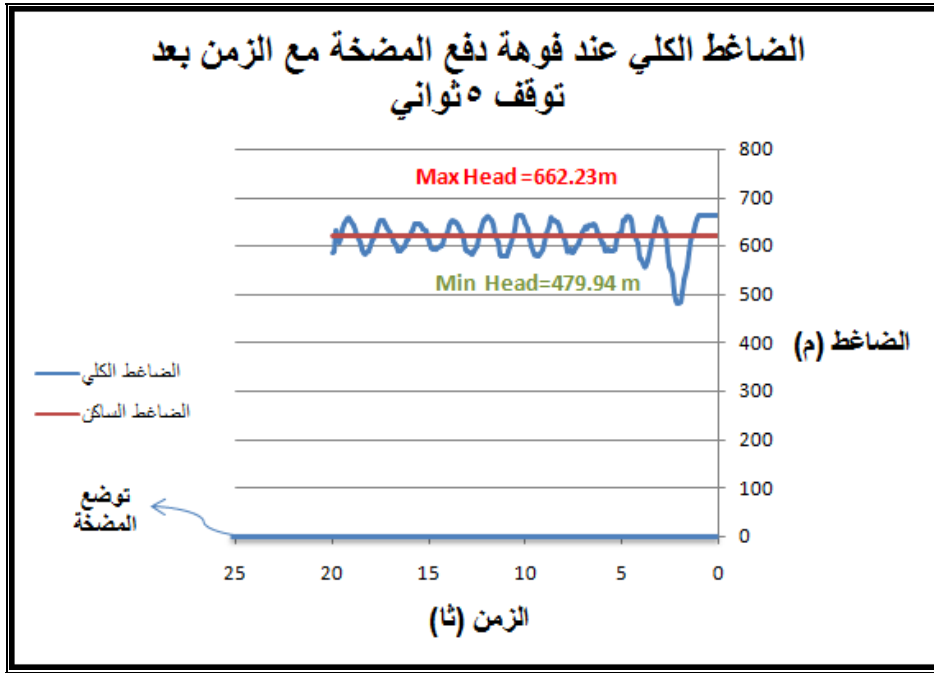
2- بعدم مشاركة الخزان في الجريان العكسي:

سنجد الضواغط في البيتر الأول بعد المضخة مباشرةً بالشكل (90):



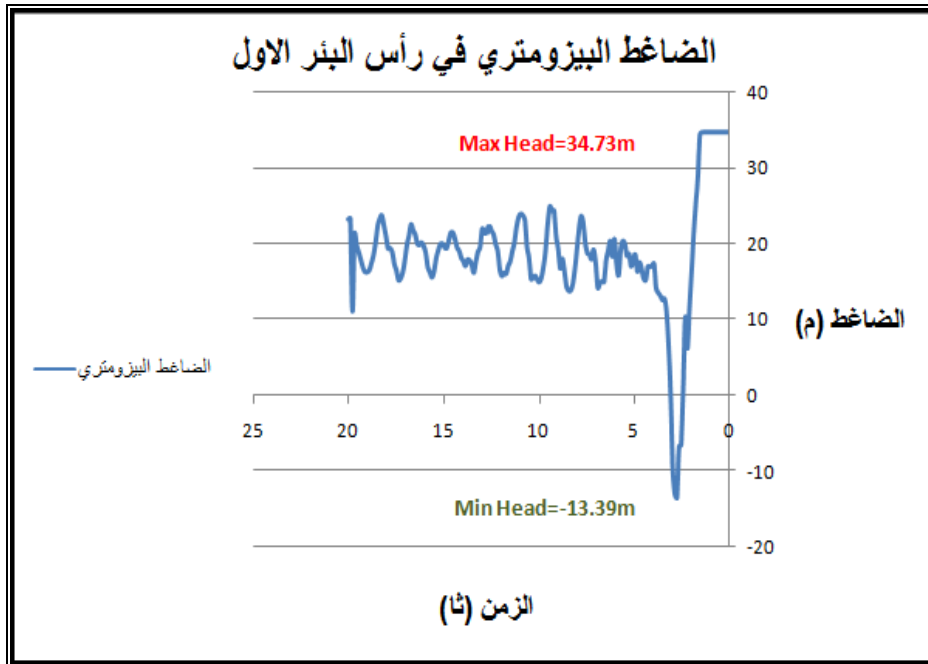
شكل (90) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرةً في البيتر الأول.

أما بالنسبة للبيتر الثاني والضاغط المتشكلة بعد المضخة سنجد الشكل (91):



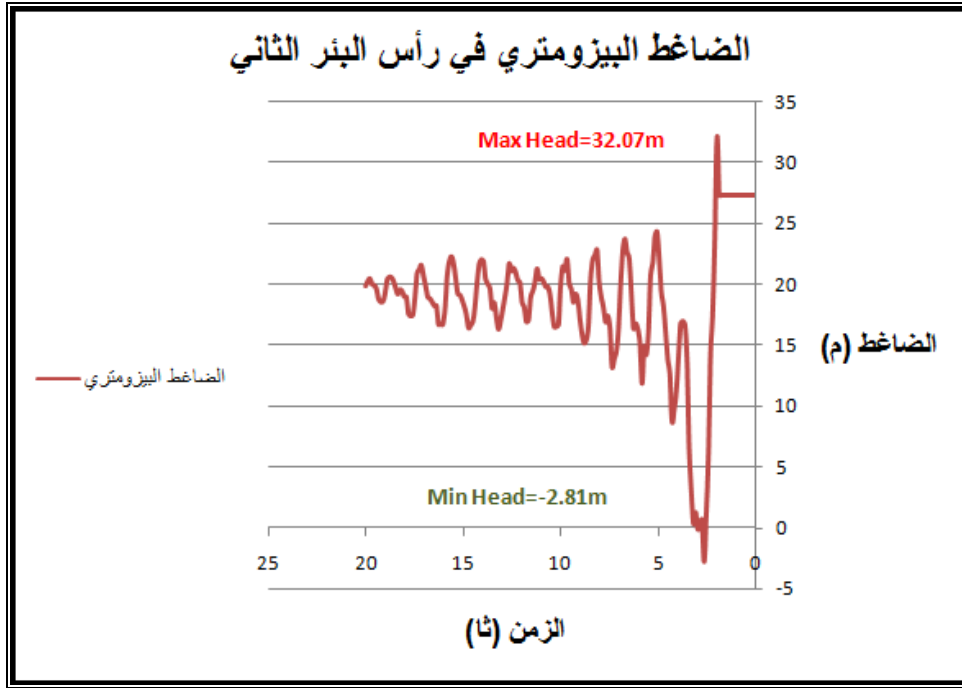
شكل (91) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.

و بالنسبة لرأس البئر الأول سنجد الضواغط التي وصلت إلى حد التبخر وتجاوزته بالشكل (92):



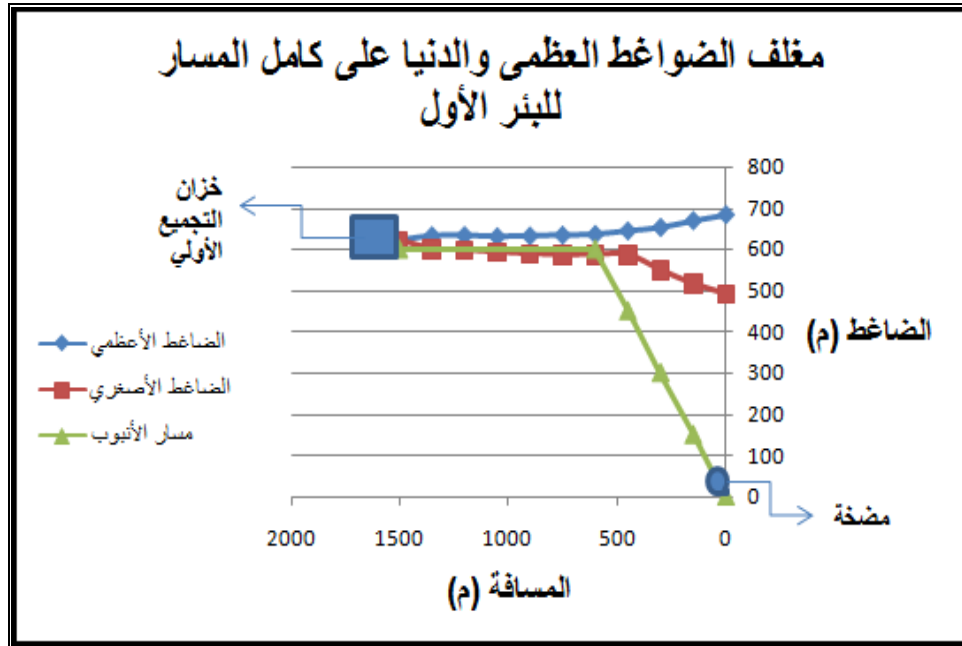
شكل (92) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

أما رأس البئر الثاني سنجد الضواغط وصلت لقيم سالبة لكن ليست بالخطيرة:



شكل (93)الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

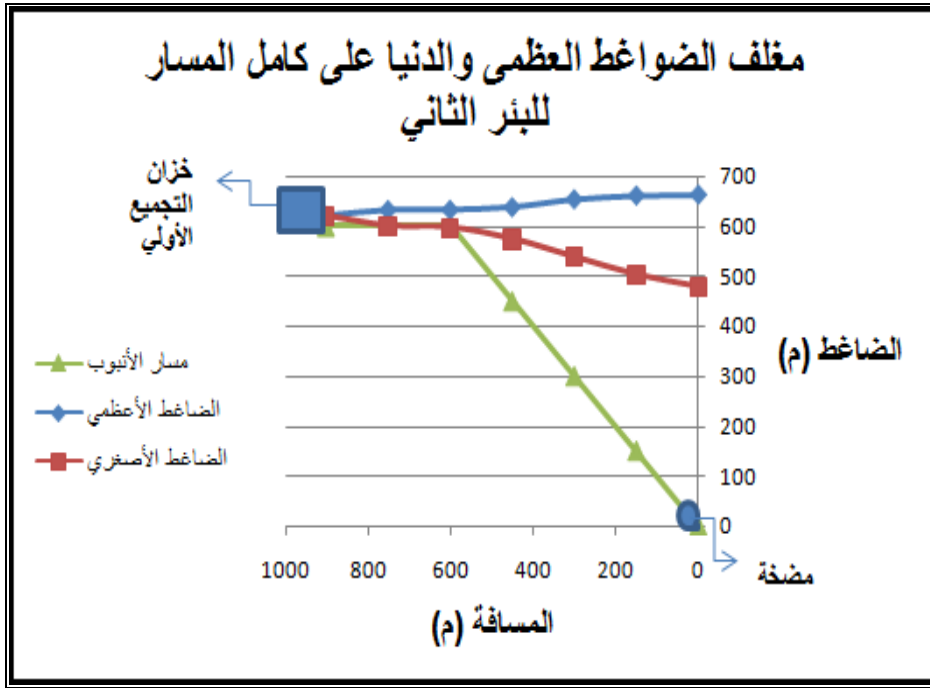
يمثل الشكل (94) قيم الضواغط العظمى والدنيا على كامل المسار للبئر الأول:



شكل (94)الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.

أما في البئر الأقرب إلى خزان التجميع سنجد الشكل (95) يمثل قيم الضواغط العظمى

والدنيا على كامل المسار:



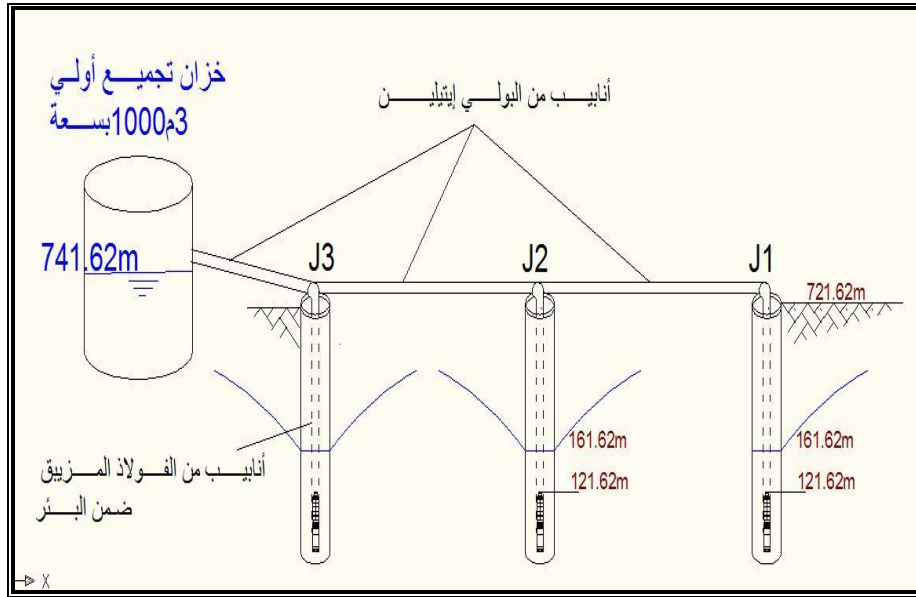
شكل (95) الضغوط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبنر الثاني.

نلاحظ أنه في هذه الحالة لم تؤثر مشاركة الخزان من عدم مشاركته في الجريان العكسي على الضواغط السالبة المنتشرة، والتكهف الحاصل في منطقة رأس البئر، في حين كان أثرها الأكبر لهذه الحالة على الضواغط الموجبة المتشكلة في منطقة ما بعد المضخة مباشرة. حيث نلاحظ أن مشاركة الخزان رفعت الضغوط فوق القيمة الستاتيكية للضح بمقدار حوالي (34م) في حين أن عدم مشاركته رفعت القيمة فوق قيمة الضخ الستاتيكي بمقدار (14م) وهنا يلاحظ مدى أهمية الوصل العلوي في التخفيف من حدة موجات الضغط الراجعة والناجمة عن التوقف المفاجئ.

الحالة الخامسة:

وهي حالة ربط ثلاثة آبار على التسلسل وذلك باستخدام أنابيب من البولي إيثيلين بين

الآبار:



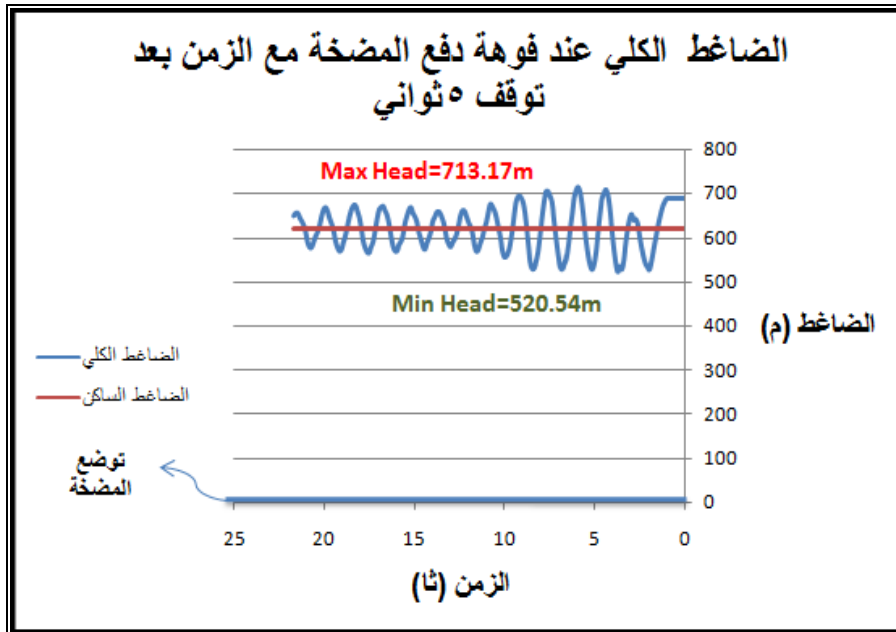
شكل (96) وصل ثلاثة آبار إلى رأس أحدها الآخر.

1- الخزان لا يشارك في التغذية العكسية:

وسنجد لهذه الحالة قيم الضواغط العظمى والصغرى لكل بئر في المقطع الأخطر

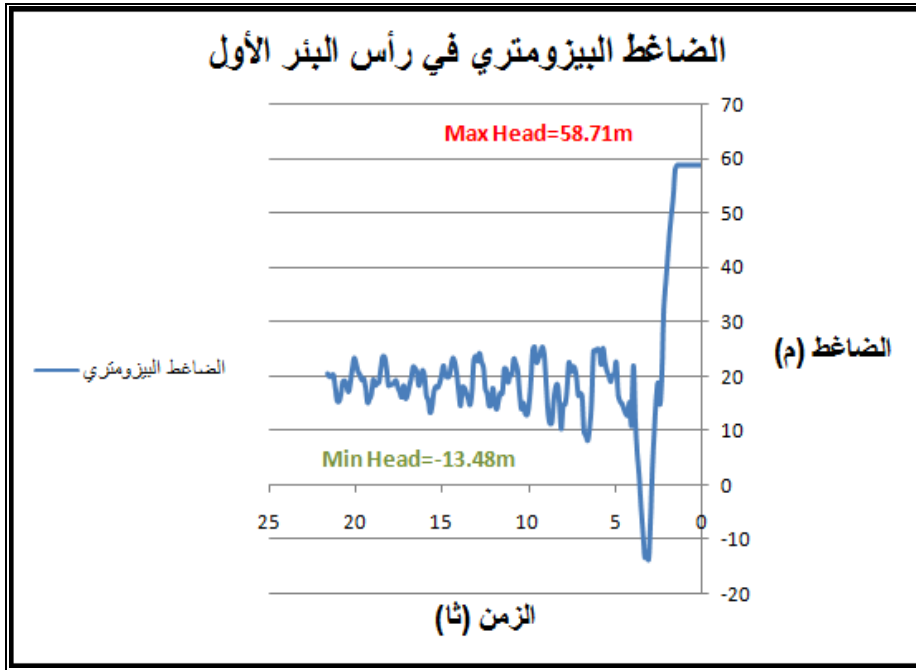
المدرّوس بعد المضخة مباشرة نتيجة انقطاع التيار عن محركها بالتتالي حيث للبئر الأول الذي

يبعد مسافة (1350م) عن الخزان، فنجد الشكل (97):



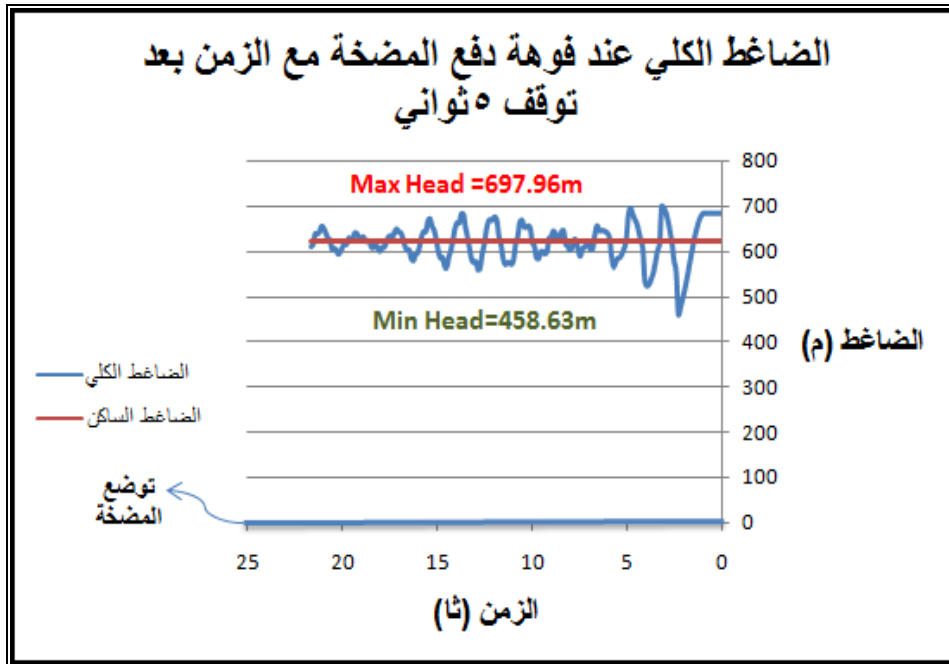
شكل (97) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.

أما الضاغط في رأس البئر فهو مبين في الشكل (98):



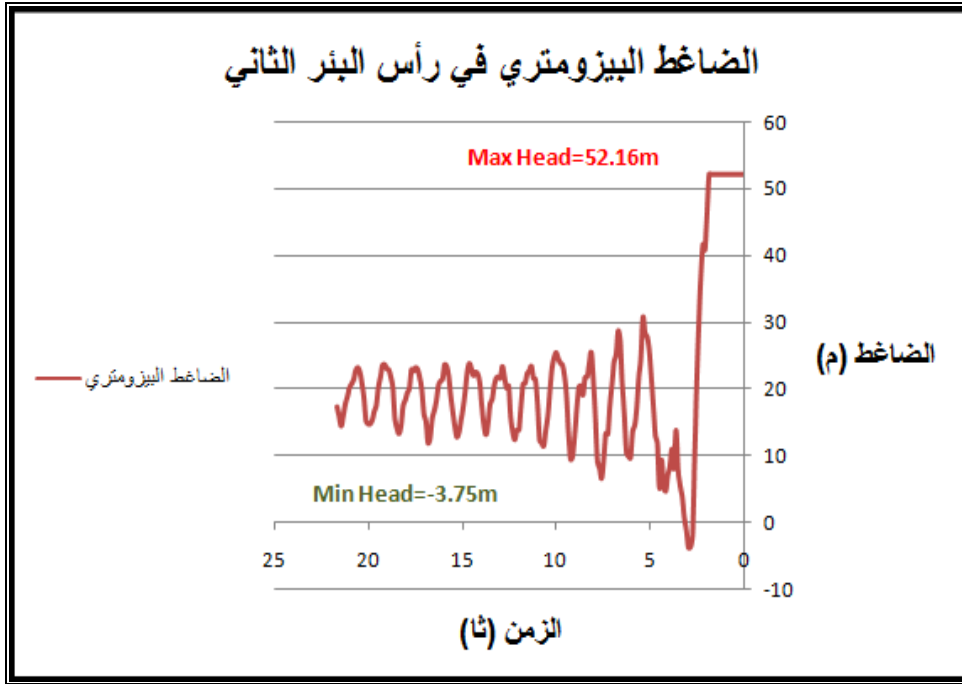
شكل (98) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

ولحالة البئر الثاني الذي يبعد عن خزان التجميع (1350م) الضاغط بعد المضخة مباشرة:



شكل (99) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.

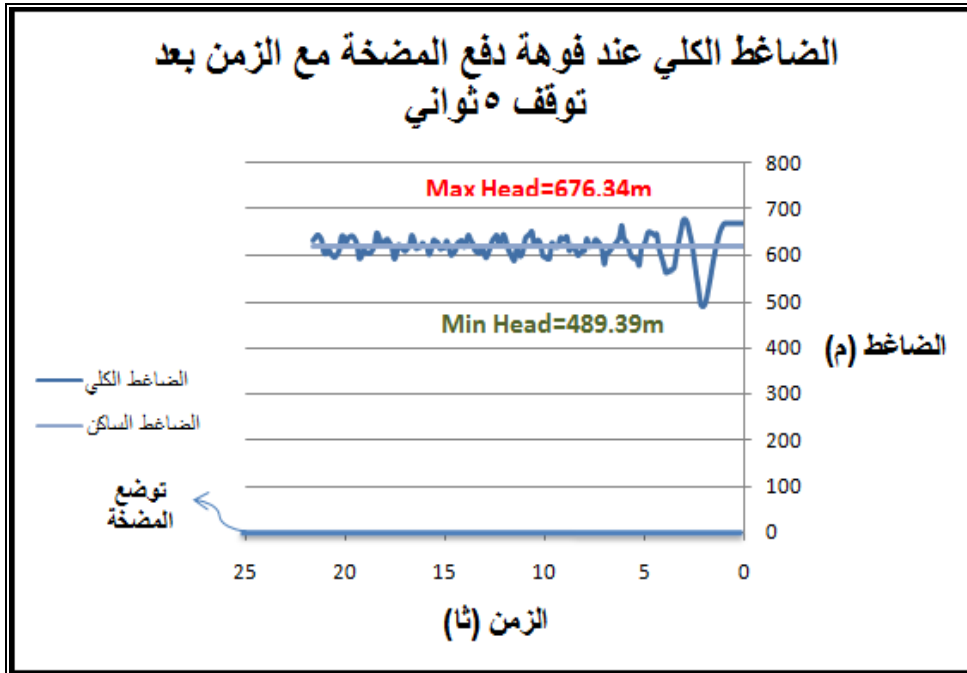
أما الضاغط البيزومتري في رأس البئر فيعطى بالشكل (100):



شكل (100) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

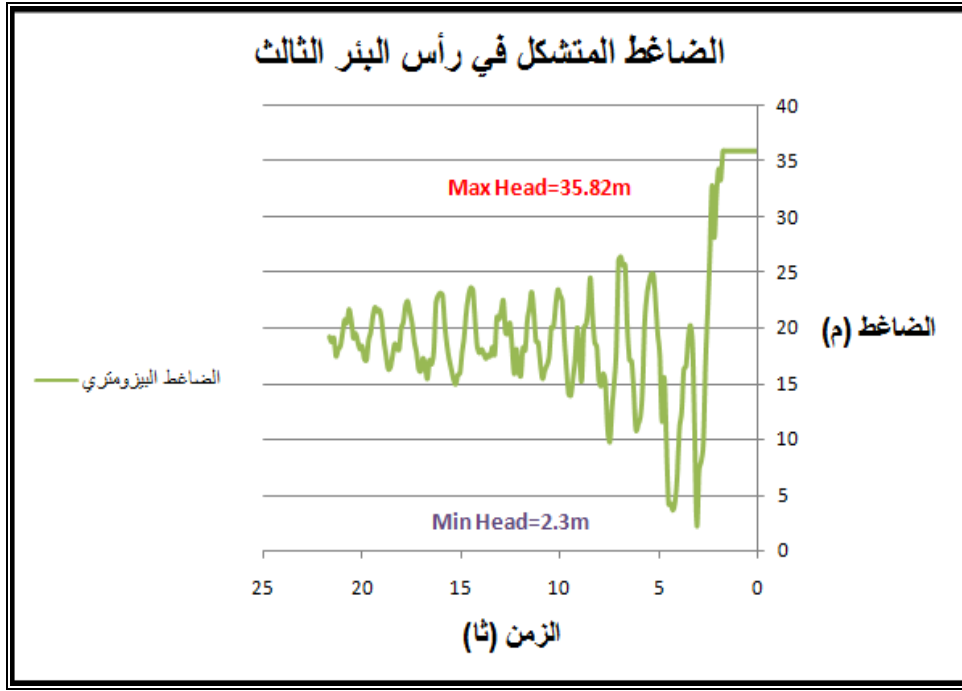
أما الضاغط بعد المضخة للبئر الثالث الذي يبعد عن الخزان فقط (300م) فهو بالشكل

(101):



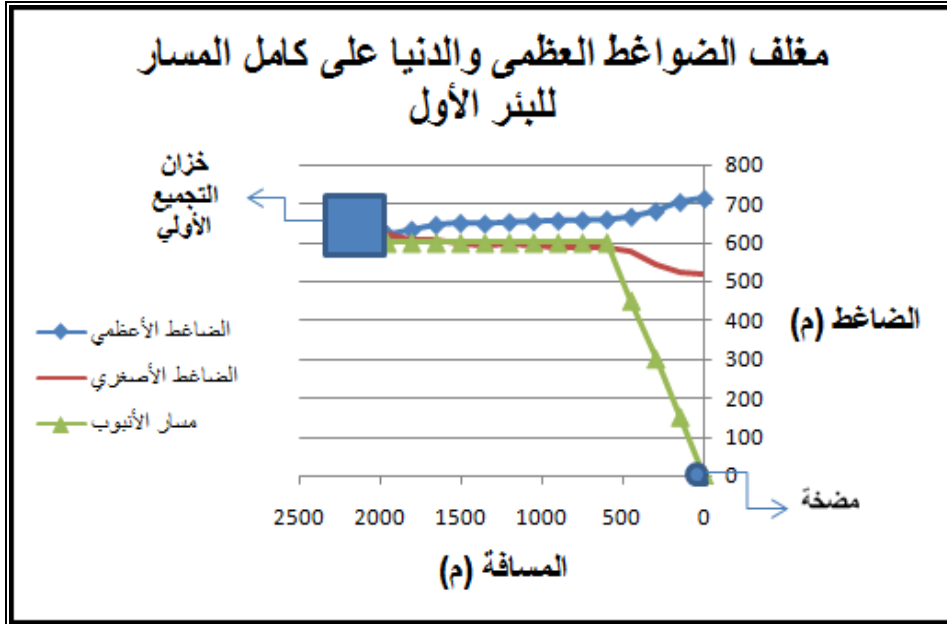
شكل (101) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.

أما رأس البئر الثالث فتعطى قيمة الضاغط البيزومتري بالشكل (102):



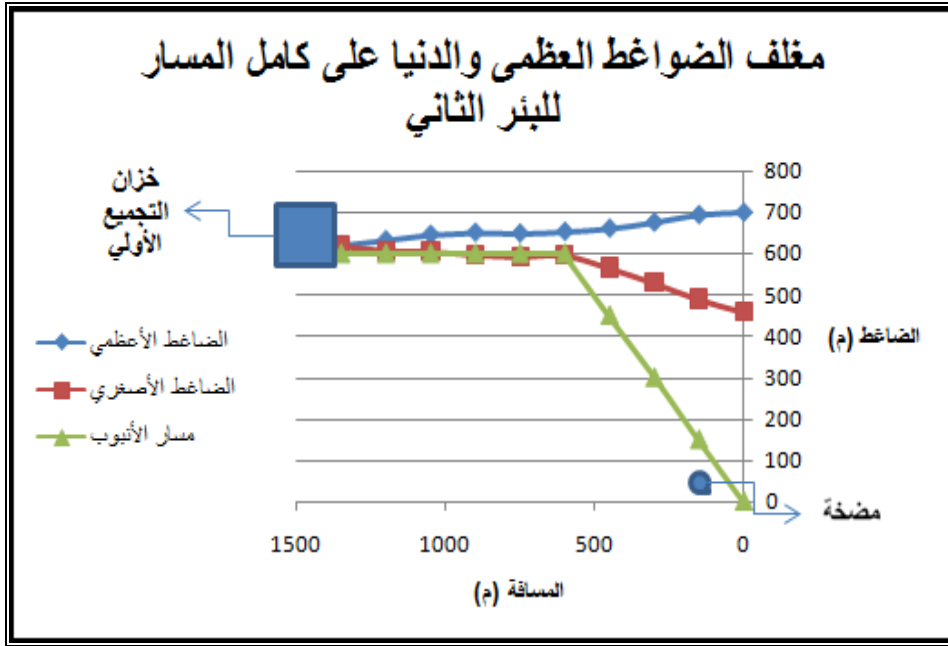
شكل (102) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.

أما الضواغط الدنيا والعظمى على كامل المسار لكل بئر على حدة تعطى بالأشكال (103)، (104)، (105):



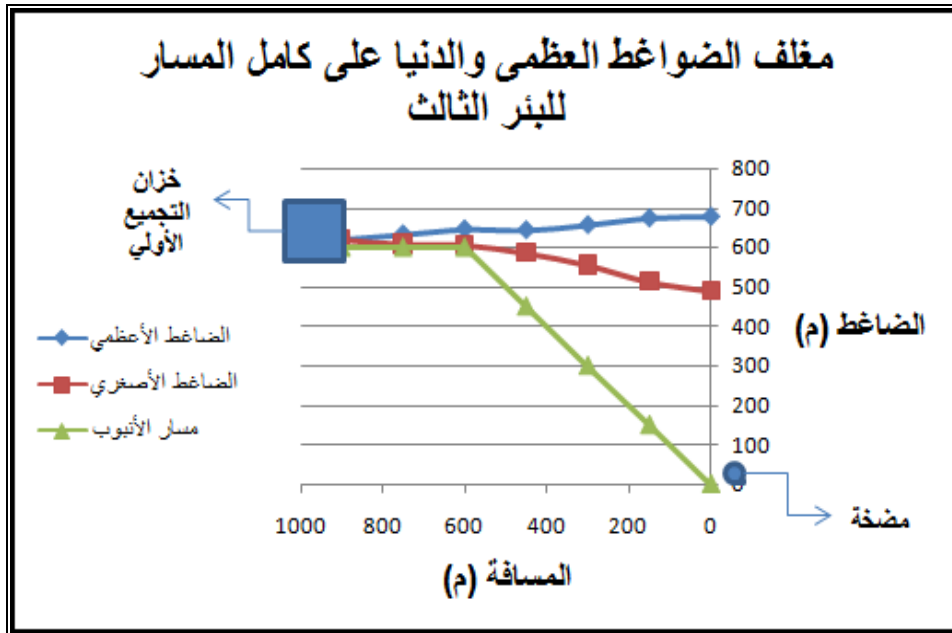
شكل (103) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.

أما الضواغط العظمى والدنيا للبئر الثاني تعطى بالشكل (104):



شكل (104) الضواغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبنر الثاني.

أما الضواغط العظمى والدنيا للبنر الثالث تعطى بالشكل (105):

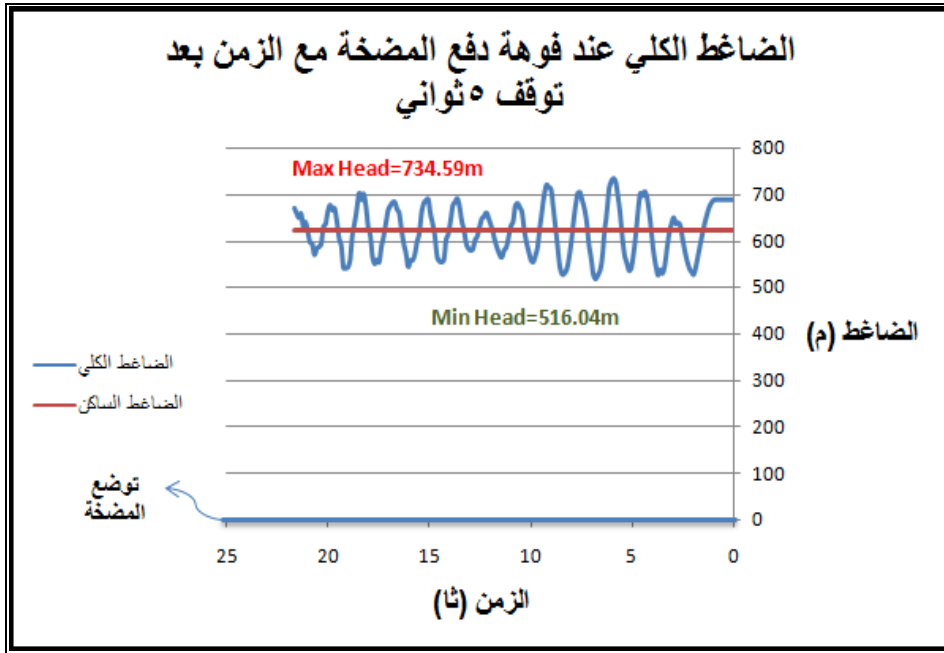


شكل (105) الضواغط الكلي على كامل مسر الأنبوب للبنر الثالث.

2- بمشاركة الخزان في الجريان العكسي:

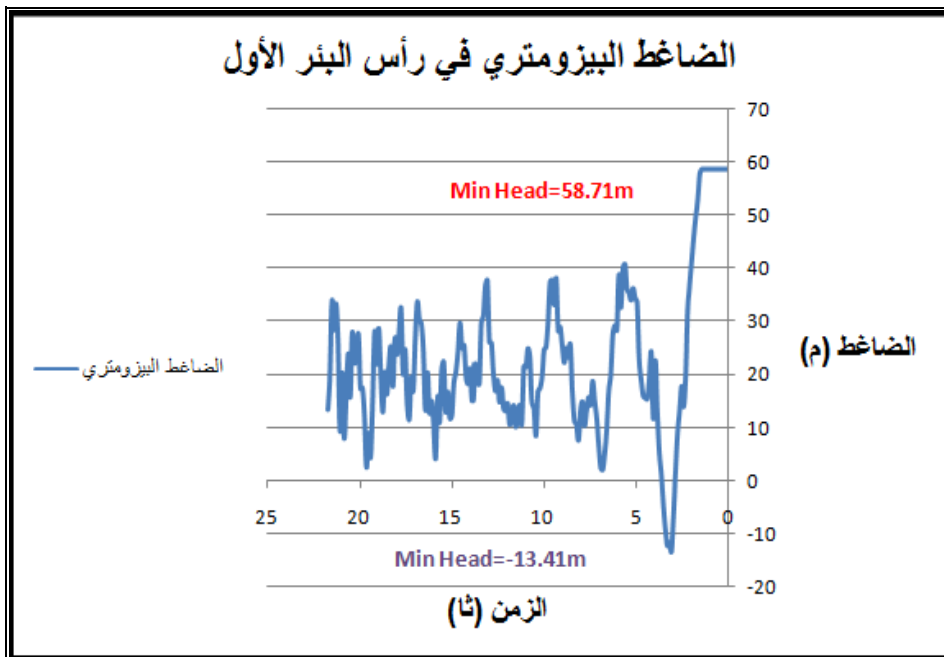
سلاحظ في هذه الحالة ازدياد في الضواغط المتشكلة فنجد مثلاً الضواغط العظمى

والصغرى للبنر الأول في المقطع بعد المضخة كما في الشكل (106):



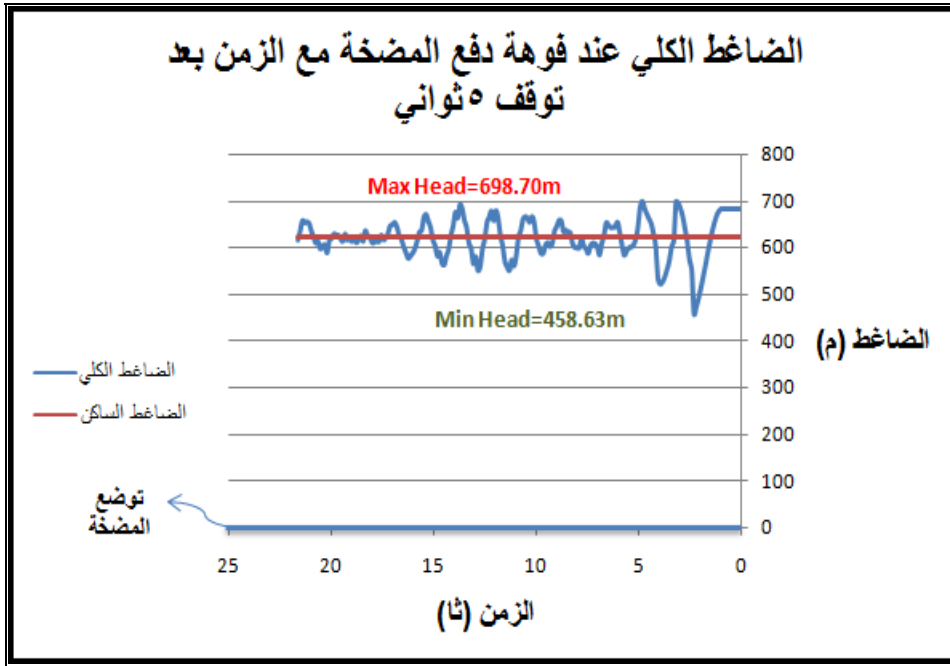
شكل (106) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.

أما الضاغط البيزومتري في رأس البئر:



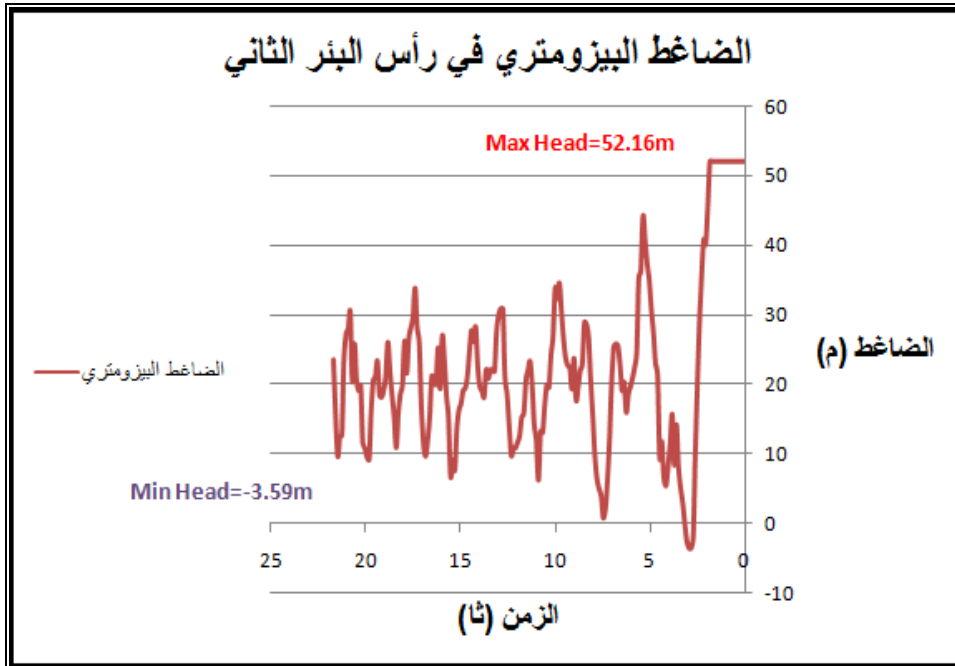
شكل (107) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.

أما الضاغط في البئر الثاني بعد المضخة:



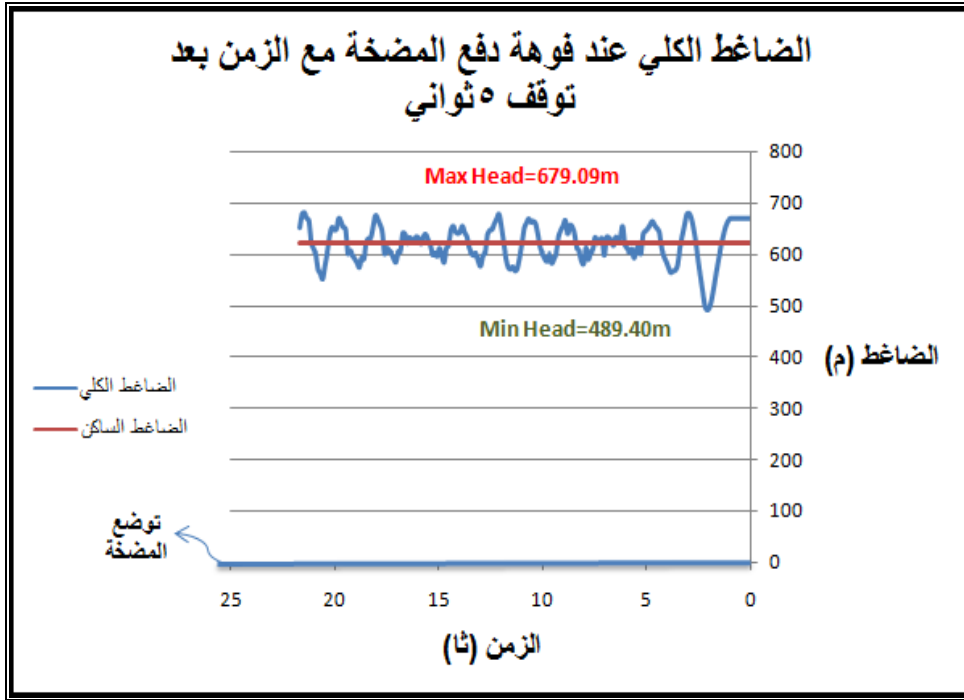
شكل (108) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.

أما الضاغط البيزومتري في رأس البئر فيعطى بالشكل (109):



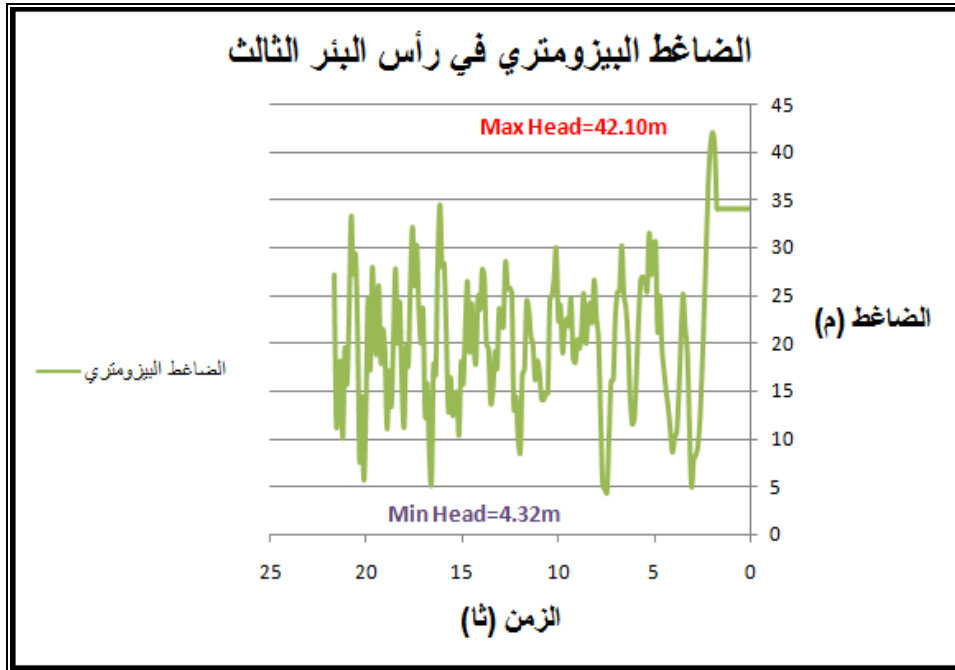
شكل (109) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.

أما للبئر الثالث سنجد القيم التالية للضاغط بعد المضخة مباشرة في الشكل (110):



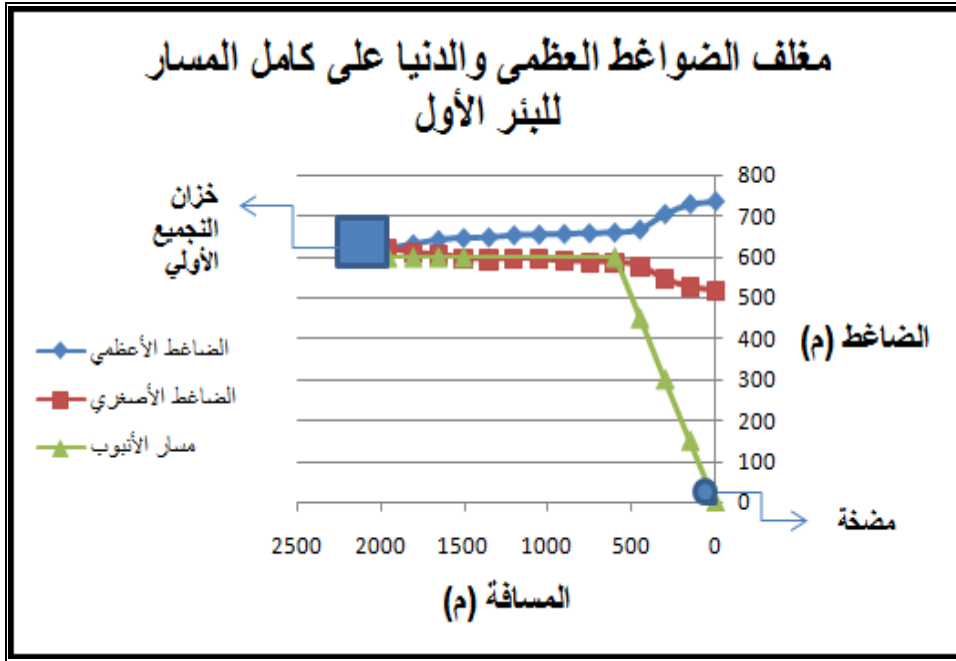
شكل (110) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.

أما الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث فيعطى بالشكل (111):

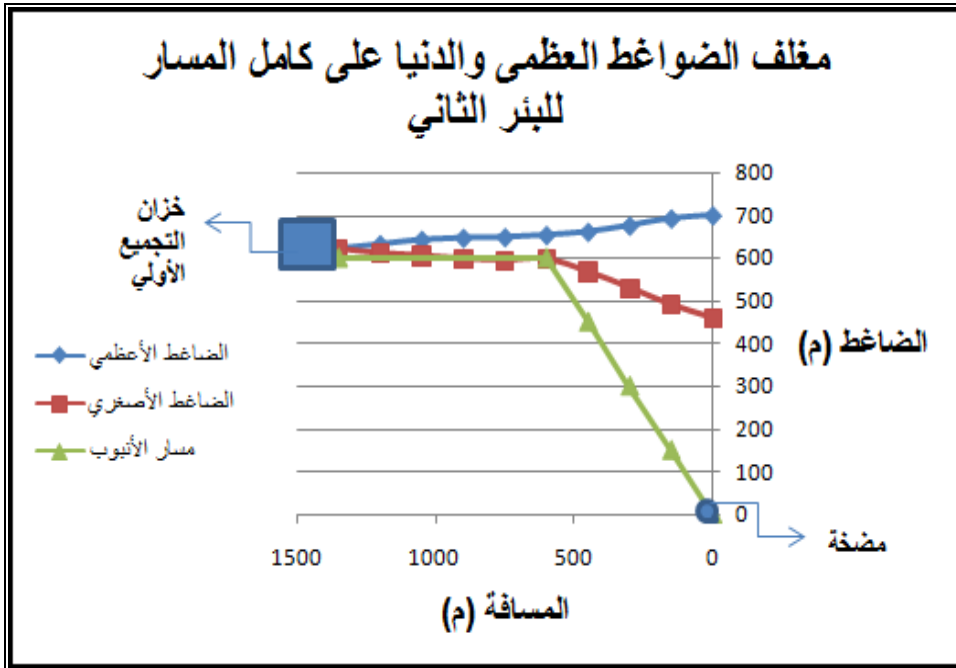


شكل (111) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.

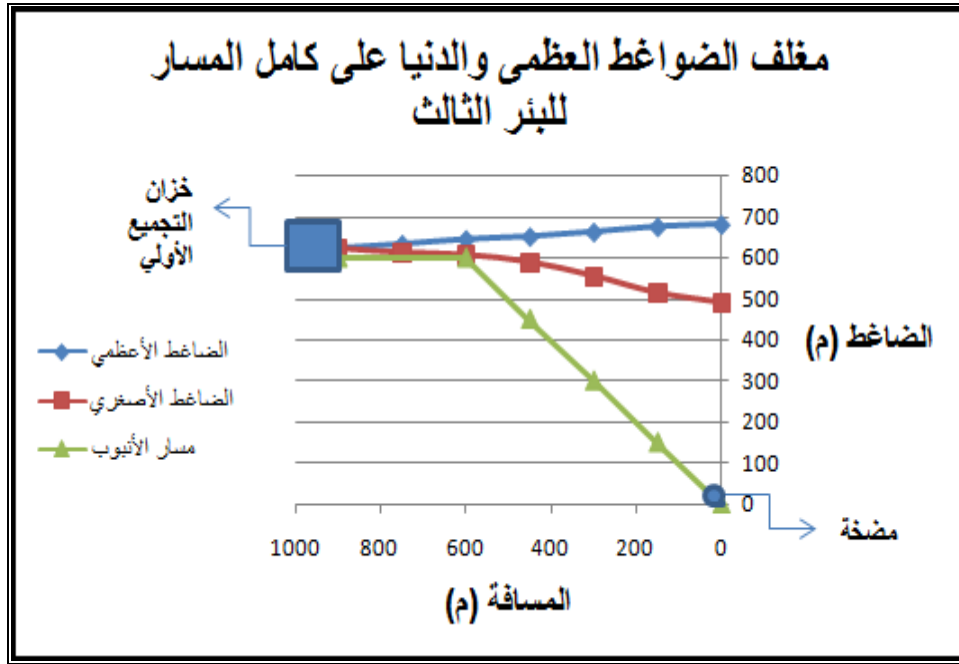
أما الضواغط العظمى والدنيا على كامل المسار للبئر الأول يمثلها الشكل (112):



شكل (112) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنابيب للبيئر الأول.
 أما في البيئر الثاني سنجد قيم الضواغط العظمى والدنيا بالشكل (113):



شكل (113) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنابيب للبيئر الثاني.
 وفي البيئر الثالث الأقرب إلى الخزان سنجد الضواغط بالشكل (114):



شكل (114) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البنر الثالث.

بالتالي سنجد أن مشاركة الخزان في الجريان العكسي تساهم بشكل واضح في رفع قيمة الضاغط الموجب المتشكل بعد المضخة مباشرة، أما تأثيرها على القيم السالبة يظهر جلياً في رفعها ولعلنا لاحظنا الأثر ولو كان طفيفاً في البنر الثاني حيث كانت الأقل قيمة في رأس البنر (-3.75م) في حين ارتفعت عند مشاركة الخزان ولو بشكل طفيف إلى (-3.59م).

ملاحظة:

نلاحظ من خلال الحالتين السابقتين أن تأثير الوصل التسلسلي إذا صح التعبير لا يؤثر بشكل كبير على القيم السالبة للضاغط البيزومتري، مع العلم أن مشاركة الخزان ترفع بشكل واضح القيم الموجبة للضاغط في منطقة ما بعد المضخة.

3-4. نتائج وتوصيات.

- 1- يفضل ضمن البئر استخدام أنابيب من الفولاذ المزيبق لأنها قادرة على احتمال الضغوط المرتفعة إضافة إلى مقاومتها للكسر والانحناء أثناء التركيب خصوصاً أن الآبار عميقة، لكن تبقى مشكلتها بكلفتها المرتفعة وقصر عمرها، طبعاً إضافة إلى تعرضها للصدأ وازدياد مقاومتها الهيدروليكية مع الزمن.
- 2- أفضل نوعية أنابيب تصل بين الآبار هي من نوع البولي إيثيلين لأن كلفتها منخفضة نسبياً خصوصاً في حالتنا التي نضطر فيها إلى أطوال كبيرة فيصبح استخدام الفولاذ مكلفاً.

كما أن مقاومتها الهيدروليكية لا تتناقص مع الزمن، إضافة إلى خفة وزنها، كما تمتاز بمعامل مرونة منخفض، لكن لها أيضاً سيئات أبرزها: قلة مقاومتها للضغط الخارجي ومعامل تمددها الطولي الكبير.

3- إن معرفة طريقة الربط الأفضل بين الآبار مرهون بتحقيق الاقتصادية وتخفيف تشكل التكهف عند منطقة رأس البئر، التي تمثل أعلى نقطة في الناقل ينخفض عندها الضاغط نتيجة الارتفاع. وطبعاً يؤخذ بعين الاعتبار تحقيق ضاغط أعظمي مقبول. والمقصود بالضاغط الأعظمي الناتج عن انعكاس موجة الضغط حتى لا تتشكل ظاهرة انفصال عمود السائل ثم إعادة الالتحام، والتي قد تسبب للناقل أضراراً جسيمة.

4- بناءً على ما سبق سنجد أن هناك عدة طرق قابلة للاستخدام وتحقق الشروط السابقة، فمثلاً يمكن أخذ حالة الربط التي تجمع الآبار الثلاثة في عقدة واحدة حيث أبرز ما يمكن ملاحظته كنتيجة على الإكسل أن هذه الطريقة تخلصنا من الضغط السالب المتشكل عند رأس البئر نتيجة ربط الآبار معاً، وذلك لأن كل بئر يؤثر على باقي الآبار حسب الضاغط الأولي وحسب موقعه من خزان التجميع الأولي وحسب وصول موجة الضغط إلى العقدة، ذلك أن البئر الأقرب إلى خزان التجميع الأولي سيكون الأول في وصول موجة الضغط وانخفاض الضاغط عند المضخة، لكن الآبار الأخرى تؤثر على عملية التوازن ويبقى الضاغط مرتفعاً عند العقدة وبعد وصول الموجة من البئر الأخير يتم الانخفاض عند العقدة بشكل مشترك لكل الآبار ولكن بتوازن يجعل الضاغط مرتفعاً عند العقدة ويؤثر على كامل المسار، ونحو منطقة رأس البئر التي تبقى محمية من انخفاض الضغط، كما نلاحظ أن قيم الضاغط الأعظمي الموجب الناتجة عن انعكاس الموجة ليست بقيم خطيرة على الأنابيب المستخدمة.

5- نلاحظ أن مشاركة الخزان في الجريان العكسي تزيد من قيمة الضاغط الموجب إضافة إلى الضاغط السالب، أي التكهف وذلك عندما يتم الوصل من أسفل الخزان، في حين إن عدم مشاركة الخزان في الجريان العكسي من خلال وصل الأنبوب من الأعلى تساهم في خفض قيمة الضاغط الموجب المتشكل نتيجة ارتداد موجة الضغط وهذه تعتبر حسنة لكنها ترفع من القيم السالبة المتشكلة نتيجة انخفاض الضغط في منطقة رأس البئر، والتي قد تمتد على كامل مسار الأنبوب حتى خزان التجميع، وهذه سيئة وبالتالي يوصى إلى

مؤسسة المياه في السويداء وطبعاً جميع الحالات المشابهة باتباع طريقة الوصل من الأعلى لكن مع مراعاة إجراءات الحماية من التكهف في منطقة رأس البئر.

الفصل الرابع

طرق الحماية من المطرقة المائية

4-1. مقدمة.

يمكن من حيث المبدأ تصميم الناقل أو أي مجموعة من الأنابيب بحيث تتحمل جميع الضغوط العظمى والدنيا التي يمكن أن تنشأ تحت أي ظروف تشغيلية ممكنة خلال فترة عمر المشروع.

إلا أن مثل هذا التصميم يكون في معظم الحالات غير اقتصادي للغاية، لذا كان لا بد من اتباع طرائق حماية تعتمد على استخدام تجهيزات خاصة ، أو القيام بإجراءات تحكم في التشغيل مهمتها منع حدوث موجات الضغط العالية أو المنخفضة التي يمكن أن تلحق بالناقل أو المجموعة أضراراً جسيمة. المرجع [1].

إن طرق الحماية الخاصة بالمطرقة المائية متنوعة وتختلف باختلاف الحالة المدروسة والمناسبة للمنطقة ولوضع المنظومة بشكل عام والحل الأنسب لها.

وبناءً على هذا نميز جملة من طرق الحماية أبرزها:

1- الإغلاق البطيء للسكور.

2- زيادة عطالة المضخة باستخدام الدولاب المعدل.

3- خزانات الحماية.

4- خزانات الضغط.

5- سكور إدخال الهواء.

6- سكور تنفيس الضغط.

7- وصلات التحويل.

8- خزانات التغذية.

9- الحماية بتخفيض سرعة انتشار الموجة.

وأخيراً الإقلاع والتوقف التدريجي للمضخات. عندما يكون هناك وثوقية عالية بالتيار الكهربائي.

إنه من حيث المبدأ أفضل الطرق المتبعة في الحماية من المطرقة المائية هي خزانات الحماية وخزانات الضغط فهي تعطي نتائج مضمونة بشكل كافٍ لكن لابد من أخذ الناحية الاقتصادية بعين الاعتبار وبالتالي يمكن اقتراح أجهزة ووسائل تخفف من الظاهرة بل وتمنعها قدر الإمكان وباقتصادية أكبر..

إن كل حالة من حالات الحماية المذكورة سابقاً لها جملة من الشروط الحدية التي تفرض نفسها عند التركيب، وسنناقش كل منها بالتفصيل إضافة إلى فوائدها ومحاسنها كما يلي:

1- الإغلاق البطيء للسكر:

يلعب زمن إغلاق السكر دوراً هاماً في التحكم في ارتفاع الضغط المتشكل ففي بعض الأحيان عندما نغلق السكر ببطء وينخفض الضاغط المتشكل لأن قسماً من المياه يتسرب ولا يتراكم خلف السكر وبالتالي ينخفض الضغط، ويمكن تمثيل العلاقة بين الضاغط المتشكل وزمن الإغلاق للسكر فيكون بشكل منحنى وهو يختلف حسب نوع السكر فهناك سكر فراشة أو سكر بوابة أو.... إلخ.[1].

2- زيادة عطالة المضخة باستخدام الدوالب المعدل:

تهدف هذه الزيادة إلى تخفيض معدل تباطؤ المضخة بعد انقطاع التيار الكهربائي عن محركها. فإذا كان معدل التباطؤ منخفضاً بشكل كافٍ فمن الممكن أن يسمح هذا لموجات الضغط المنعكسة من نهاية الناقل بالوصول إلى المضخة ثانية، ومنع أي مزيد من الانخفاض في الضغط عند طرف دفع المضخة.

اقترح العالم ستيفنسون (Stephenon) قاعدة مبسطة لتحديد الحالات التي من الممكن أن تؤدي فيها زيادة عزم العطالة للمضخة إلى الحماية من المطرقة المائية الناتجة عن توقف المضخات وهي :

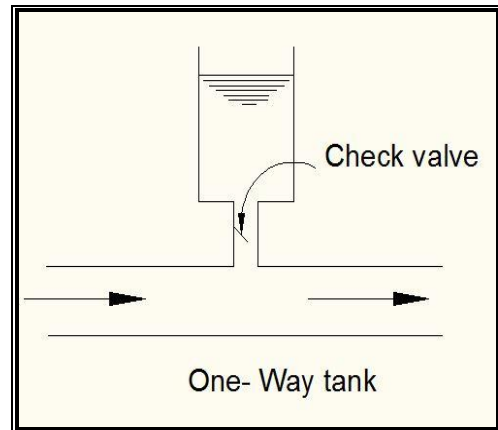
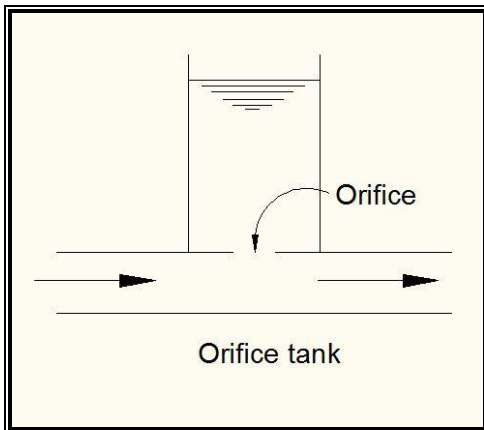
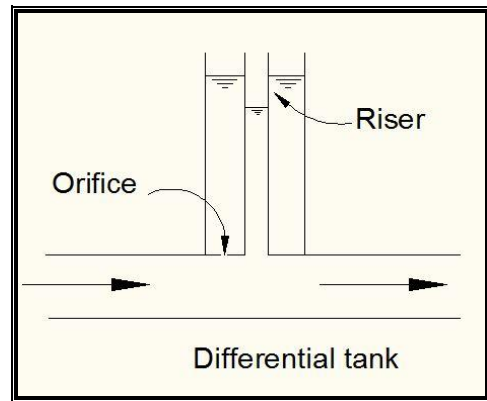
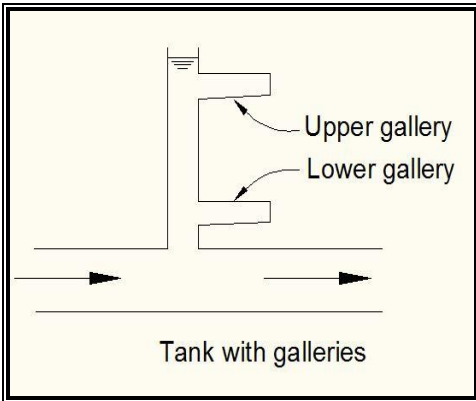
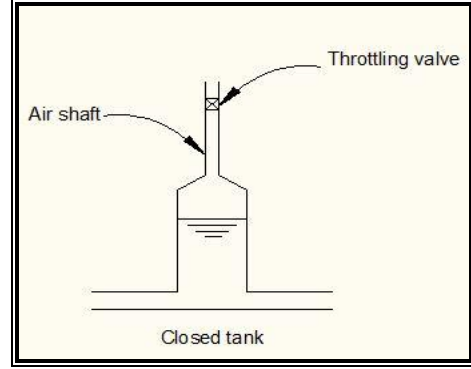
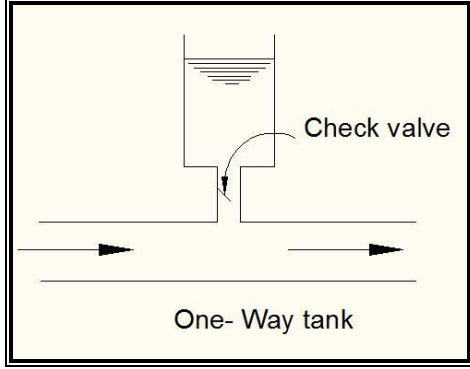
$$\frac{I \cdot N^2}{\rho ALH_0^2} > 0.01 \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right)^2$$

المرجع [1].

3- خزانات الحماية: (Surge Tanks)

يتم استخدامها في الحالات التي لا يمكن فيها التحكم في قيم الضغوط العابرة في الناقل أو المجموعة بالطرق السابقة نستخدم خزانات الحماية. وهناك العديد من أشكال هذه الخزانات يمكن

استخدامها كما في الشكل (115):



شكل (115) أنواع خزانات الحماية.

المرجع [1]، [2]، [12].

4- خزانات الضغط: (*Pressure Vessels*)

كما يمكن أن نطلق عليها اسم (*Bladder Tank*) يستخدم هذا النوع من الخزانات في الحالة التي لا يمكن فيها استخدام خزانات الحماية المفتوحة من الأعلى لأسباب اقتصادية أو عملية. وخزان الضغط هو عبارة عن وعاء يحتوي على غاز مضغوط في جزئه العلوي (في الغالب هو الهواء) وسائل في جزئه السفلي ، وغالبية استخدام هذا النوع يكون في المطرقة المائية المتشكلة نتيجة توقف المضخات.

إن استخدام هذه الخزانات أصبح شائعاً لمكافحة أو منع تشكل ظاهرة المطرقة المائية الناتجة عن ظاهرة انهيار المضخة، وهي بالفعل اقتصادية أكثر من استخدام خزانات الحماية لكنها أيضاً يمكن أن تكون غير اقتصادية عند اضطرارنا إلى حجوم كبيرة منها، إضافة إلى ضرورة استبدال الهواء الموجود ضمنها بشكل دوري كما إن أحد الأضرار البارزة فيها هي الإغلاق القسري للسكر المتوضع بعد المضخة مباشرة.

يوضح الشكل (116) صورة حقيقية لغرف الحماية:



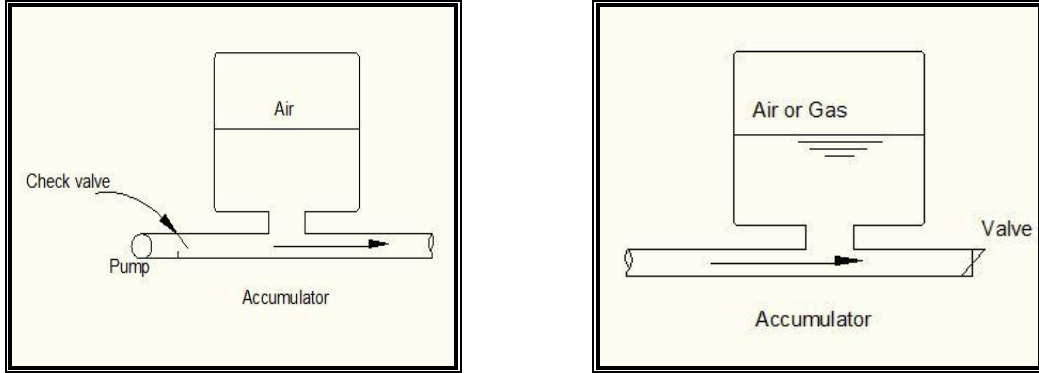
شكل (116) صورة حقيقية لغرفة حماية.

وإن استخدام مثل هذه الخزانات عملي جداً عند حدوث انهيار المضخة وهي الحالة التي ينخفض فيها الضغط عند طرف دفع المضخة مما يؤدي إلى تمدد الهواء ضمن الخزان في حال

تركيبه وبالتالي يدفع السائل في الأنبوب معوضاً عن تشكيل هذه الفجوات الهوائية على طول الأنبوب نتيجة انخفاض الضغط.

يتم تزويد هذه الخزانات بسكر عدم رجوع من أجل حالة انعكاس موجة الضغط وبالتالي

عند انعكاس الجريان يغلق هذا السكر بشكل تلقائي كما في الشكل (117):



شكل (117) خزان ضغط عادي.

يفضل إعاقة الجريان نحو الخزان كوسيلة للتخفيف من حجم الخزان اللازم ويتم ذلك

باستخدام فوهة تفاضلية (*Differential Orifice*) أو باستخدام وصلة تحويل حيث يتم تحويل

الجريان نحو الخزان عبر أنبوب صغير المقطع تكون فيه الفواقد كبيرة نسبياً.

هناك نوع آخر من هذه الخزانات التي تسمى (*Bladder air chamber*) وهي نفس مبدأ

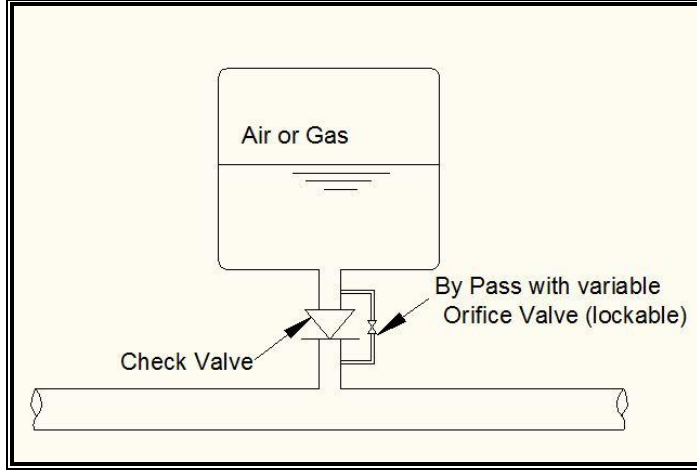
غرف الحماية لكن هناك فصل بين الهواء والسائل ضمن الغرفة بواسطة حاجز والهواء محكم

الانضغاط وهذا أسهل من ناحية أن الشركات حالياً هي التي تقوم بعملية ضغط الهواء مسبقاً، كما

يتم استخدام هذا النوع من أجل الحماية من المطرقة المائية الناتجة عن انقطاع التيار الكهربائي

عن محرك المضخة، لكنها أيضاً قد تكون مكلفة في حالات الغرف الكبيرة الحجم.

يوضح الشكل (118) غرفة هوائية مضافاً إليها فوهة تفاضلية كما يلي:



شكل (118) خزان ضغط مزود بتحويله للجريان نحو الخزان.

لاستخدام هذه الطريقة ميزات عديدة أهمها الحجم الصغير للخزان الذي يخفف من الكلفة الاقتصادية لاستخدام هذا النوع من الأجهزة كما يمكن وضعها بشكل أفقي بجانب المضخة على عكس خزانات الحماية التي تتصف بكبر حجمها أم أ أبرز سيئاتها فهي حاجتها إلى ضواغط هواء للتعويض عن الهواء المنحل في السائل وبالتالي صيانة دورية للضواغط.

5 سكرة إدخال الهواء:

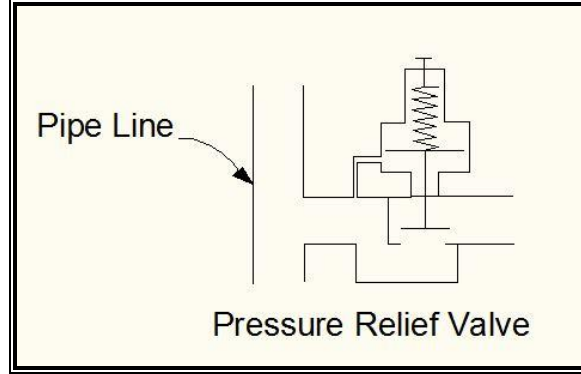
عندما ينخفض الضغط في الناقل في بعض المناطق إلى ما دون قيمة الضغط الجوي ما يؤدي إلى التكهف وانفصال عمود السائل ثم إعادة التحامه وبالتالي تشكل ضغوط عالية تؤثر على الناقل فيكون من المناسب استخدام سكرة الهواء في تلك النقاط المعرضة للضواغط المنخفضة حيث يقوم هذا السكر بإدخال الهواء إلى الناقل عند انخفاض الضغط إلى ما دون الضغط الجوي ثم يسمح بإخراجه عند زوال موجة الضغط ويجب أن يضمن عملية الالتحام التدريجي لعمود السائل والتخفيف من الصدمة الناتجة.

يعتمد معدل جريان الهواء خلال السكر على قيمة الضغط الجوي المطلق (P_a) ودرجة الحرارة المطلقة (T_a) خارج الناقل بالإضافة إلى درجة الحرارة المطلقة (T) والضغط المطلق (P) داخل الناقل.

6 سكرة تنفيس الضغط:

وهي مفيدة في حالات موجات الضغط العالية حيث يحتوي مثل هذا السكر على فتحة مغلقة بواسطة مكبس يرتكز على نابض أو بواسطة مثقلة بوزن خارجي فإذا زاد ضغط السائل في

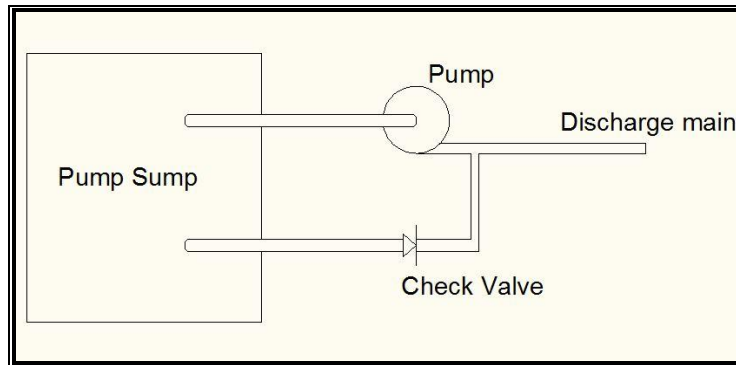
الناقل عن حد معين يتحرك المكبس بفعل القوة الضاغطة، التي تفوق قوة النابض أو وزن المثقلة، ويفتح الصمام ويسمح بطرد كمية معينة من السائل، ما يؤدي إلى تخفيض الضغط في الناقل. يمكن أن يوضح الشكل (119) نموذجاً عن هذه الحالة:



شكل (119) سكر تنفيس ضغط.

7 وصلات التحويل:

يمكن استخدام وصلات التحويل لمنع الضغط عن طرف تصريف المضخة من الانخفاض بشكل كبير وذلك عوضاً عن استخدام سكرة إدخال الهواء. وتحتوي هذه الوصلات على سكر عدم رجوع مهمته أن يفتح عندما ينخفض الضغط عند طرف تصريف المضخة إلى ما دون الضغط في حوض الامتصاص مما يسمح للسائل بالجريان من الحوض إلى أنبوب الدفع مانعاً بذلك أي استمرار الانخفاض في الضغط.

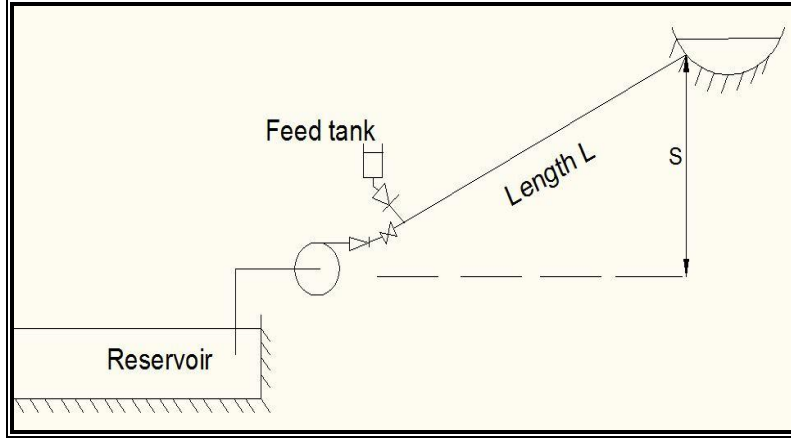


شكل (120) وصلة تحويل مع سكر عدم رجوع.

8 خزانات التغذية: (Feed tanks)

تستخدم خزانات التغذية للحماية من موجات الضغط السالبة في المواقع التي يكون فيها استخدام سكرة الهواء غير مناسب. وغالباً ما تستخدم لحماية أنابيب دفع المضخات من موجات الضغط السالبة التي يمكن أن تنشأ بعد توقفها بشكل طارئ وهي بذلك تؤدي المهمة نفسها التي

تقوم بها وصلات التحويل السابقة الذكر ويطلق عليها أحياناً اسم خزانات الحماية ذات الاتجاه الواحد ويجب التأكد عند استخدام هذه الخزانات لحماية أنابيب دفع المضخات من إعادة ملئها قبل عودة المضخات إلى العمل.



شكل (121) خزانات التغذية.

9 الحماية بتخفيض سرعة انتشار الموجة:

ذلك إن هذه الضغوط المتشكلة في الناقل مرتبطة بشكل أساسي بقيمة سرعة انتشار موجة الضغط وذلك بالنسبة لمعدل ثابت لسرعة الجريان في الناقل، وبالتالي إذا تمكنا من تخفيض قيمة سرعة انتشار موجة الضغط نتمكن من تخفيف موجة الضغط.

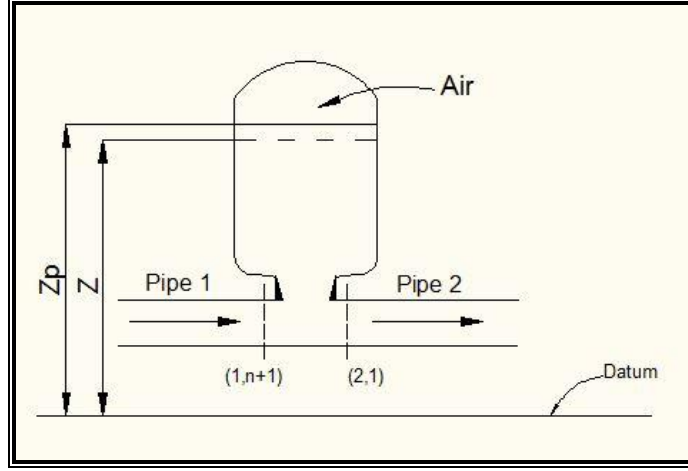
وكما نعلم تتعلق سرعة انتشار موجة الضغط بعدة عوامل أهمها مرونة الناقل و انضغاطية السائل ومدى احتواء السائل على فقاعات غازية.

وأبرز الطرق المستخدمة في هذه الحالة هي حقن الهواء في الناقل أو تمديد خرطوم مرن داخل الناقل يحصر بين جدرانها وجدران الناقل وسادة هوائية، أو اختيار أنبوب من مادة ذات معامل مرونة منخفض. إلا أنه تبقى مع ذلك طرائق الحماية المبنية على هذه الحالة محدودة الاستخدام بالمقارنة مع وسائل الحماية الأخرى.

4.2 الشروط الحدية في وسائل الحماية.

A الشرط الحدي في خزانات الضغط:

يوضح الشكل (122) الحالة المدروسة لخزان الضغط:



شكل (122) خزان ضغط مع فوهة تفاضلية.

لدينا أولاً معادلة المميزة الموجبة (C^+) من الأنبوب الأول عند المقطع (NS):

$$H_{P1,NS} = C_P - B_1 \cdot Q_{P1,NS}$$

كما لدينا معادلة المميزة السالبة (C^-) عند المقطع (1) من الأنبوب الثاني:

$$H_{P2,1} = C_M - B_1 \cdot Q_{P2,1}$$

يمكن بإهمال الفواقد المحلية في العقدة يمكن أن نكتب:

$$H_{P1,NS} = H_{P2,1}$$

ولدينا معادلة الاستمرار عند العقدة التي تعطي:

$$Q_{P1,NS} = Q_{P2,1} + Q_{P3}$$

والمقصود ب Q_{P3} هو الجريان نحو الخزان (وهو يعتبر موجباً عندما يتجه نحو الخزان).

نفترض أن الهواء الموجود في الجزء العلوي من الخزان يتبع للعلاقة البوليتروبية من أجل غاز

مثالي:

$$H_{P\text{ air}} \cdot V_{P\text{ air}}^n = C$$

يمثل الثابت n أس المعادلة البوليتروبية وتعتمد قيمته على العملية التيرموديناميكية التي يتبعها

الغاز في الخزان أثناء نقله وتمده.

$n = 1$ إذا كانت العملية تتم بتبادل حراري.

$n = 1.4$ إذا تم التبادل الحراري وهي الحالة الأكثر أماناً.

C هو ثابت تحدد قيمته من الشروط الابتدائية.

في معظم الحالات تؤخذ قيمة وسطية ل n تبلغ عادة 1.2 من أجل إجراء الحسابات الأولية.

يعطى الفاقد خلال الفوهة بالمعادلة التالية:

$$\Delta H_{orf} = H_{P1,NS} - H_{P3} = C_{orf} \cdot Q_{P3} \cdot |Q_{P3}|$$

حيث (C_{orf}) ثابت فاقد الفوهة.

يعطى الضغط المطلق للهواء في الخزان بدلالة الضاغط (H_{P3}) بالمعادلة التالية:

$$H_{P_{air}} = H_{P3} + H_b - Z_p$$

حيث (H_b) هو الضاغط البارومتري و (Z_p) هو منسوب الماء في الخزان عن مستوى المقارنة.

إن التغير الحاصل في حجم الهواء في الخزان بدلالة التغير في منسوب الماء بالعلاقة التالية:

$$V_{p_{air}} = V_{air} - A_C(Z_p - Z)$$

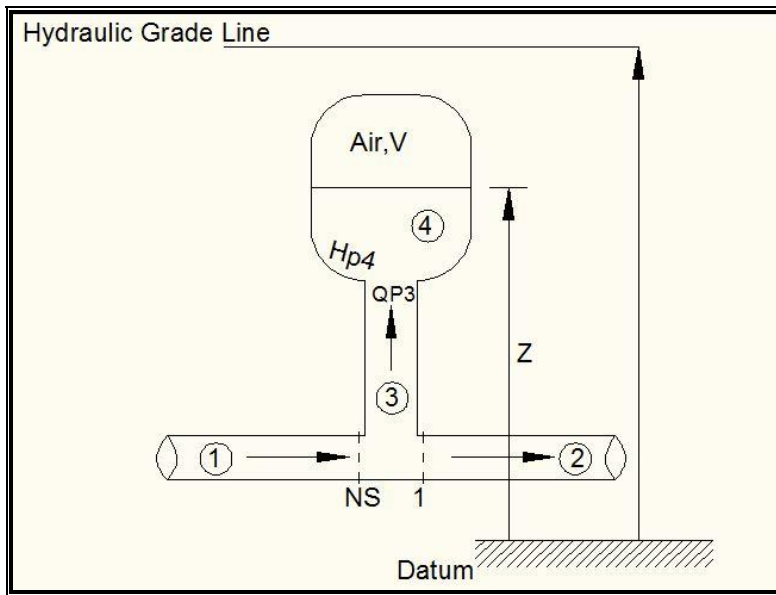
كما ويعطى التغير في منسوب الماء في الخزان بدلالة الغزارة الجارية نحو الخزان خلال ا لفترة

الزمنية (Δt) بالمعادلة التالية:

$$Z_p = Z + \left(\frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \right) \frac{\Delta t}{A_C}$$

المراجع [1]، [2].

في بعض الحالات يتصل خزان الضغط مع الناقل عبر أنبوب قصير نسبياً كما في الشكل (123):



شكل (123) خزان ضغط مع أنبوب قصير.

يمكن في هذه الحالة تطبيق نظرية العمود الصلب على السائل الجاري في هذا الأنبوب نظراً لقصره النسبي:

$$H_{P3} - H_{P4} = \frac{L_3}{g} \frac{dV_3}{dt} + \lambda \frac{L_3}{D_3} \frac{V_3^2}{2g}$$

بكتابة المعادلة السابقة بطريقة الفروق المحدودة خلال الخطوة الزمنية (Δt) مع الاستعاضة عن السرعة الوسطية (V_3) ب (Q_3/A_3) نحصل على:

$$\frac{H_{P3} + H_3}{2} - \frac{H_{P4} + H_4}{2} = \frac{L_3}{gA_3 \Delta t} (Q_{P3} - Q_3) + \frac{\lambda L_3}{2gD_3 A_3^2} Q_3 |Q_3|$$

حيث (H_{P3} & H_3) هما الضغط في بداية الأنبوب (3) في بداية الخطوة الزمنية ونهايتها.
 (H_{P4} & H_4) هما الضغط في الخزان في بداية الخطوة الزمنية ونهايتها.
 (Q_{P3} & Q_3) هما الغزارة في الأنبوب (3) في بداية الخطوة الزمنية ونهايتها.
 يمكن كتابة المعادلة السابقة بالشكل التالي:

$$H_{P3} - H_{P4} = C_1 + C_2 Q_{P3}$$

حيث:

$$C_1 = H_4 - H_3 + \frac{\lambda L_3}{gD_3 A_3^2} Q_3 |Q_3| - C_2 Q_3$$

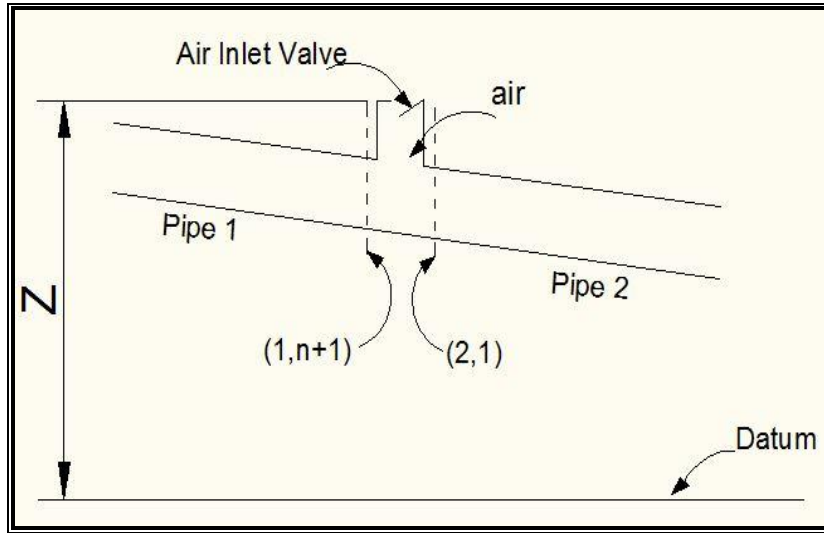
$$C_2 = \frac{2L_3}{gA_3 \Delta t}$$

يعطى الضغط المطلق للهواء في الخزان بدلالة الضاغط (H_{P4}) بالمعادلة التالية:

$$H_{P \text{ air}} = H_{P4} + H_b - Z_p$$

B الشرط الحدي عند سكور إدخال الهواء:

يوضح الشكل (124) مبدأ دراسة هذه الحالة كما يلي:



شكل (124) سكر إدخال الهواء.

سنجد المعادلة الأولى هي معادلة المميز الموجبة (C^+) في المقطع 1 من الأنبوب 1 إضافة على معادلة المميز السالبة (C^-) في الأنبوب 2 على التالي كما يلي:

$$H_{P1} = C_{P1} - B_1 Q_{P1}$$

$$H_{P2} = C_{M2} + B_2 Q_{P2}$$

في حال إهمال الفوائد المحلية في السكر فإن:

$$H_{P1} = H_{P2}$$

يتم الاعتماد على الفرضيات التالية في تحديد الشرط الحدي:

- 1 أن يكون الجريان الهوائي إلى الناقل بدون تبادل حراري مع الوسط المحيط.
- 2 يتم المحافظة على الهواء ضمن منطقة السكر ولا ينتشر عبر الناقل.
- 3 تتمدد وتقلص الهواء ضمن الناقل يتم بتبادل حراري مع الوسط المحيط.

إنّ مبدأ عمل هذه السكر هو أنه عندما تهبط قيمة الضغط إلى ما دون قيمة مسبقة

التحديد يبدأ جريان الهواء إلى الناقل ثم بعد أن يعود الضغط إلى الارتفاع ويصبح أعلى من قيمة الضغط الجوي خارج الأنبوب تبدأ عملية طرد الهواء من الناقل إلى أن يخرج الهواء كلياً ويغلق السكر وبالتالي يمكن أن يتم فتح وإغلاق السكر مرات متعددة خلال فترة مرور الموجة حسب انخفاض أو ارتفاع الضغط عبر الناقل.

إذا كانت الفترة الزمنية (Δt) صغيرة وكان (m_a) حجم الهواء المحصور في الناقل في بداية الفترة الزمنية يصبح حجم الهواء (m_{pa}) في نهاية الخطوة الزمنية كما يلي:

$$m_{pa} = m_a + m \frac{dm_a}{dt} \Delta t$$

حيث يمثل الحد $\frac{dm_a}{dt}$ المعدل الزمني لجريان الهواء خلال السكر.

ويجب على الهواء المحصور ضمن الناقل أن يحقق معادلة الاستمرار أي:

$$V_{p \text{ air}} = V_{\text{air}} + 0.5\Delta t + [(Q_{P1,NS} + Q_{1,NS}) - (Q_{P2,1} + Q_{2,1})]$$

بتعويض المعادلات السابقة في معادلة شرط الاستمرار نحصل على المعادلة التالي:

$$V_{p \text{ air}} = V_{\text{air}} + 0.5\Delta t \left[\left(\frac{C_{P1} - H_{P1,NS}}{B_1} + Q_{1,NS} - \frac{H_{P1,NS} - C_{M2}}{B_2} + Q_{2,1} \right) \right]$$

أو بالشكل التالي:

$$V_{p \text{ air}} = C_{\text{air}} - 0.5\Delta t \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right) H_{P1,NS}$$

حيث:

$$C_{\text{air}} = V_{\text{air}} + 0.5\Delta t \left(\frac{C_{P1}}{B_1} + \frac{C_{M2}}{B_2} + Q_{1,NS} - Q_{2,1} \right)$$

في حال كون تمدد وتقلص الهواء المحصور في الناقل يتم دون تبادل حراري يمكن كتابة:

$$P \cdot V_{\text{air}} = m_{pa} \cdot R \cdot T$$

حيث (R) ثابت الغاز و ($P \& T$) هما الضغط والحرارة المطلقة للهواء المحصور داخل الناقل. يرتبط

الضغط المطلق (P) بالضاغط ($H_{P,NS}$) عبر العلاقة التالية:

$$P = \gamma (H_{P1,NS} - Z + H_b)$$

حيث (Z) ارتفاع عنق السكر عن مستوى المقارنة و (H_b) الضاغط البارومتري.

بتعويض ($V_{\text{air}}, H_{P1,NS}$) في معادلة الضغط السابقة إضافة إلى المعادلة التي تعطي قيمة

(C_{air}) نحصل على المعادلة التالية:

$$m_{pa} \cdot R \cdot T = P \cdot \left[C_{\text{air}} - 0.5\Delta t \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right) \cdot \left(\frac{P}{\gamma} - H_b + Z \right) \right]$$

واختصار قيمة (m_{pa}) يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$\left(m_a + \frac{dm_a}{dt} \Delta t \right) R \cdot T = P \cdot \left[C_{\text{air}} - 0.5\Delta t \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right) \cdot \left(\frac{P}{\gamma} - H_b + Z \right) \right]$$

يعتمد معدل جريان الهواء خلال السكر على قيمة الضغط الجوي المطلق (P_a) ودرجة الحرارة المطلقة (T_a) خارج نطاق الناقل بالإضافة إلى درجة الحرارة المطلقة (P) والضغط (T) داخل الناقل.

وبناءً على ذلك نميز الحالات الأربعة التالية:

1. جريان الهواء خلال السكر بسرعة صوتية نحو الناقل:

تحدث هذه الظاهرة عندما يكون الضغط داخل الناقل أقل من الضغط الجوي (P_a) وأكبر من ($0.53P_a$). يعطى معدل جريان الهواء إلى داخل الناقل في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$\frac{dm_a}{dt} = C_{in}A_{in} \sqrt{7P_a\rho_a \left(\frac{P}{P_a}\right)^{1.43} \left[1 - \left(\frac{P}{P_a}\right)^{0.286}\right]}$$

2. جريان الهواء نحو الداخل بسرعة صوتية (جريان حرج):

تحدث هذه الحالة عندما يكون ($P < 0.53P_a$) في هذه الحالة يعطى المعدل الزمني لجريان الهواء خلال السكر بالعلاقة التالية:

$$\frac{dm_a}{dt} = C_{in}A_o \frac{0.686}{\sqrt{RT_a}} P_a$$

3. جريان الهواء نحو الخارج بسرعة تحت صوتية:

تكون قيمة الضغط (P) في الناقل في هذه الحالة أعلى من قيمة الضغط الجوي خارج الناقل (P_a) وأقل من ($P_a/0.53$) يعطى معدل جريان الهواء في هذه الحالة بالمعادلة التالية:

$$\frac{dm_a}{dt} = -C_{out}A_{out}P \sqrt{\frac{7}{RT} \left[\left(\frac{P_a}{P}\right)^{1.43} - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{1.714} \right]}$$

4. جريان الهواء نحو الخارج بسرعة صوتية (جريان حرج):

تحدث هذه الحالة عندما يكون ($P > P_a/0.53$) عندها يعطى المعدل الزمني لجريان الهواء خلال السكر بالعلاقة التالية:

$$\frac{dm_a}{dt} = -C_{out}A_{out}0.686P\sqrt{RT}$$

بعد الحصول على قيمة $\left(\frac{dm_a}{dt}\right)$ من إحدى المعادلات السابقة حسب الحالة

المناسبة فنحصل على معادلة غير خطية بمجهول واحد هو الضغط (P). يمكن حل هذه المعادلة

بإحدى طرائق التقريب المتتالي كطريقة نيوتن رافسون على سبيل المثال تحدد بعد ذلك قيم كل من

$$H_{P1,NS} و \forall P_{air} و m_{pa} و H_{P2,1} و Q_{P1,NS} و Q_{P2,1}$$

4.3 حالات الحماية المناسبة للمنظومة.

1. وضع مجموعة من سكور عدم الرجوع على طول الناقل أو عند تقسيمات مختلفة في الأنبوب.

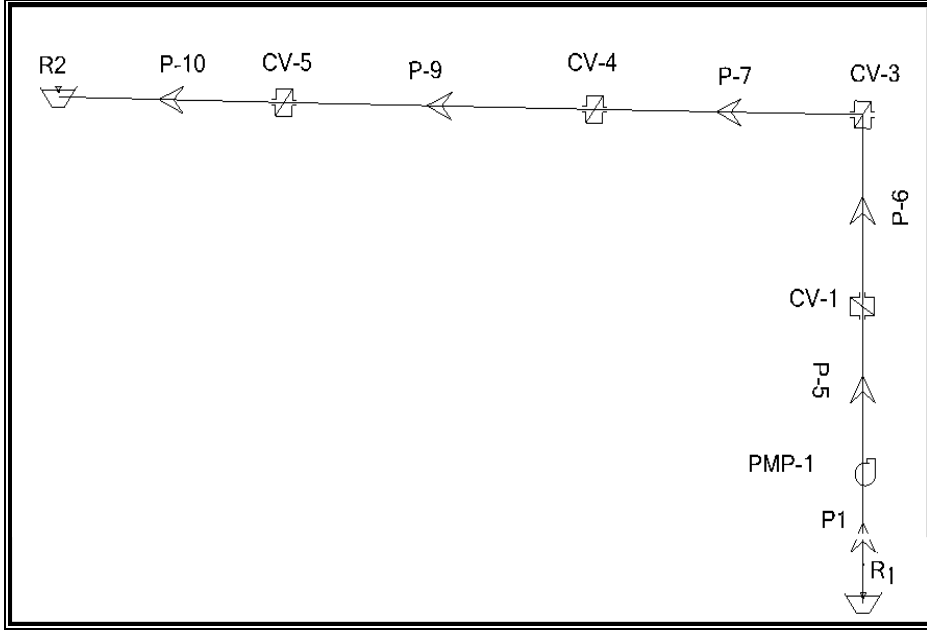
2. اقتراح وجود خزان حماية عند منطقة رأس البئر واقتراح الحجم الاقتصادي.

3. اقتراح سكر إدخال الهواء في رأس البئر.

سنناقش كل حالة من هذه الحالات بالتفصيل لحالتنا المدروسة.

1. وضع مجموعة من سكور عدم الرجوع على طول مسار الناقل:

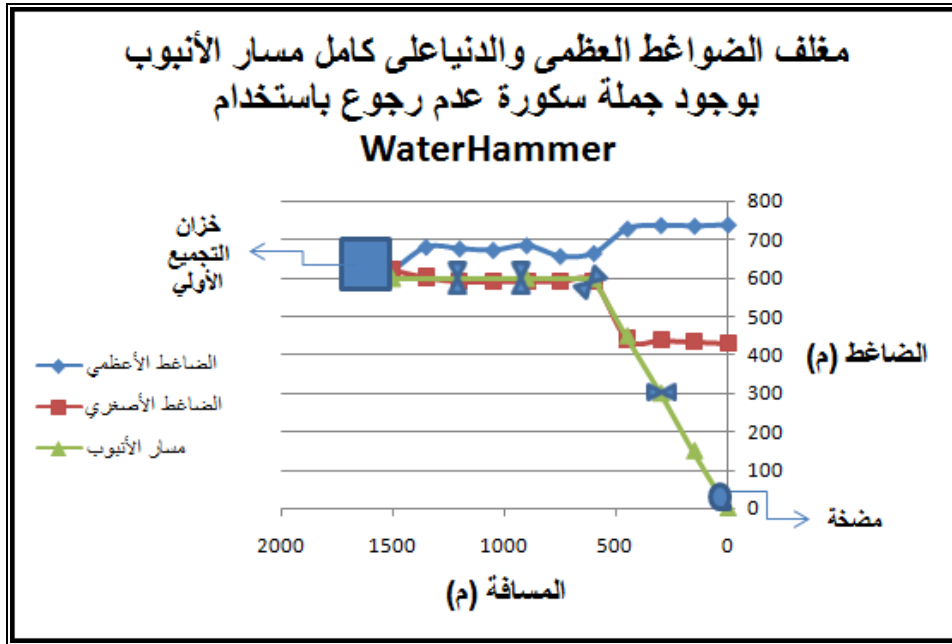
طبعاً إن الغاية من هذا النوع من السكور هو منع عودة موجة الضغط الراجعة من الخزان إلى المضخة، حيث إن انقطاع التيار الكهربائي عن المضخات المستخدمة في حالتنا الدراسية التي تضخ إلى ارتفاع عالٍ نسبياً يؤدي إلى عودة الموجة خلال لحظات إلى المضخة، وبالتالي للتخفيف من أثر هذه الموجات على المضخات نستخدم هذا النوع إضافة إلى تخفيف الضغوط المتشكل. يمكننا الاستعانة بالحل اليدوي باستخدام الإكسل كما يمكننا وضع هذه السكور في مناطق مختلفة على طول الناقل عند عودة الموجة باستخدام برنامج الـ *Water-Hammer* الذي ذكرناه للاستعانة به في مجال العمل كما يبين الشكل التالي حيث سنظهر النتائج الخاصة بمشروعنا بوضع سكور في مناطق معينة على الناقل مثلاً الشكل التالي يبين حالة وضع سكور على ارتفاع (1200+900+600+300)م عن المضخة باستخدام *WaterHammer* سنجد الشكل (125):



شكل (125) مقطع جبهى مع سكورة عدم رجوع باستخدام *WaterHammer*.

في هذه الحالة سنجد قيم الضواغط الصغرى والعظمى على كامل مسار الأنبوب في هذه

الحالة ممثلة بقيمتها على الإكسل وذلك باستخدام *WaterHammer*:



شكل (126) الضواغط العظمى والصغرى بوجود سكورة عدم رجوع باستخدام *WaterHammer*.

نلاحظ مما سبق النتيجة المبدئية انخفاض الضواغط الأعظمية على كامل مسار الأنبوب

بدءاً من بعد المضخة وانتهاءً بخزان التجميع، مع العلم أن الحساب اعتمد على أن زمن إغلاق

السكر 1 ثانية.

◆ إن هذا العمل هو برمجي باستخدام الحاسب وسنقارن القيم التي حصلنا عليها باستخدام

الإكسل مع مناقشة الشرط الحدي الذي ينتج عن استخدام مثل هذا السكر:

◆ طبعاً الغزارة عند عودة الموجة تنعدم كون السكر سيغلق مباشرةً بعد عودتها بالتالي:

$Q = 0$ عند السكر بعد عودة الموجة.

◆ أما الضاغط المتشكل فهو ناتج عن المميّزة السالبة C^- وبالتالي يكون الشرط الحدي عندها

هو:

$$H_p = C_M + BQ_p$$

عملياً يصل هذا السكر الموجود عند أي منطقة على الناقل مميّزتان إحداهما موجبة C^+ والأخرى

سالبة C^- وبالتالي نجد:

$$H_{p1} = C_p - BQ_{p1}$$

$$H_{p2} = C_M + BQ_{p2}$$

وكما نعلم فإن الاستمرار محقق عند العقدة وبالتالي يكون لدينا:

$$Q_{p1} = Q_{p2}$$

ويمكن حسب المرجع [1] أن نكتب بدلالة السرعة في الناقل:

$$H_{p1} = H_{p2} + K_{LPRV} \cdot \frac{V_{p2}^2}{2g}$$

مع مراعاة أنه في حالة العمل الاعتيادية للسكر يكون $H_{p2} = H_{PRV}$ وذلك لأنه يغلق السكر عد

عودة الموجة وبالتالي يمكن أن نحسب:

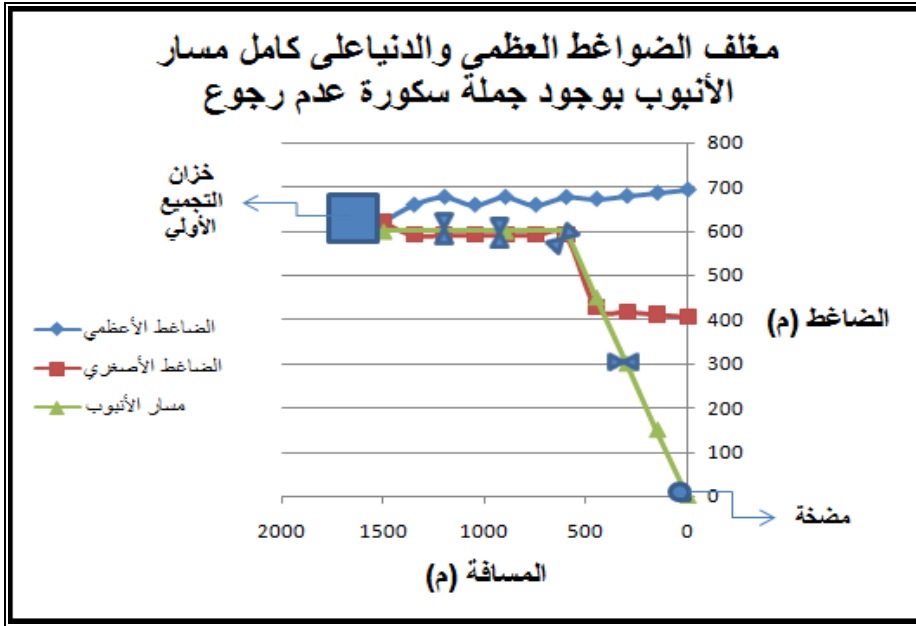
$$H_{PRV} = C_M + BQ_{p2}$$

أما الضاغط قبل السكر فيكون باستخدام العلاقة التالية:

$$H_{p1} = C_p - BQ_{p1}$$

وبالتالي سنجد قيم الضواغط العظمى والصغرى بوجود مجموعة السكورة على بعد

: $1200+900+600+300$ م من المضخة ممثلة على الإكسل بعد الحساب بالشكل (127):

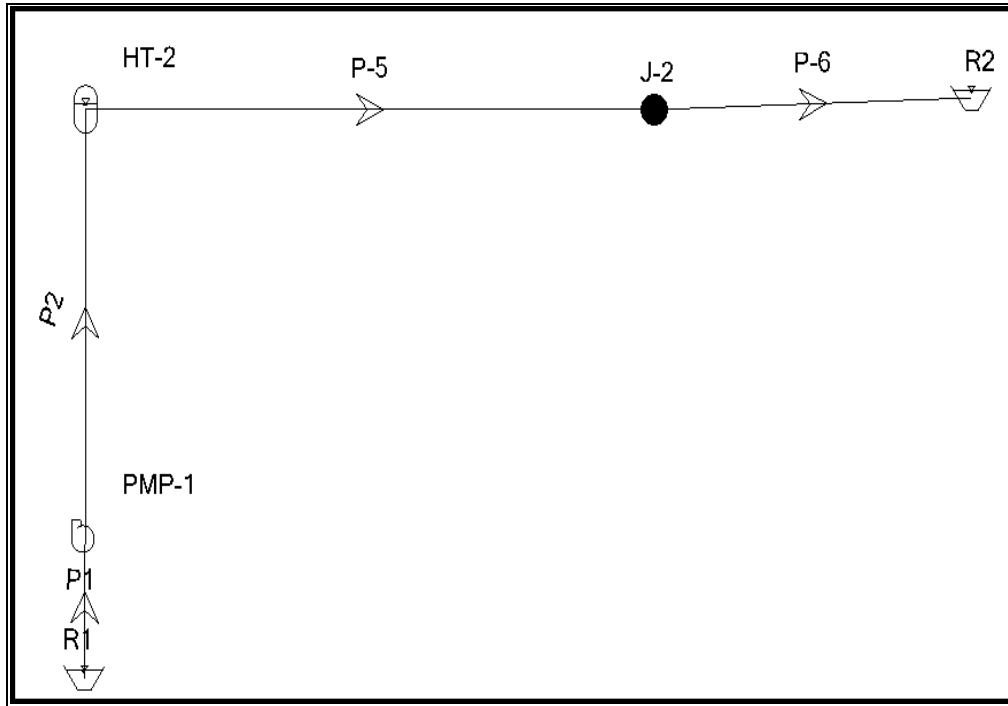


شكل (127) الضواغط العظمى والصغرى بوجود سكورة عدم رجوع باستخدام EXCEL.

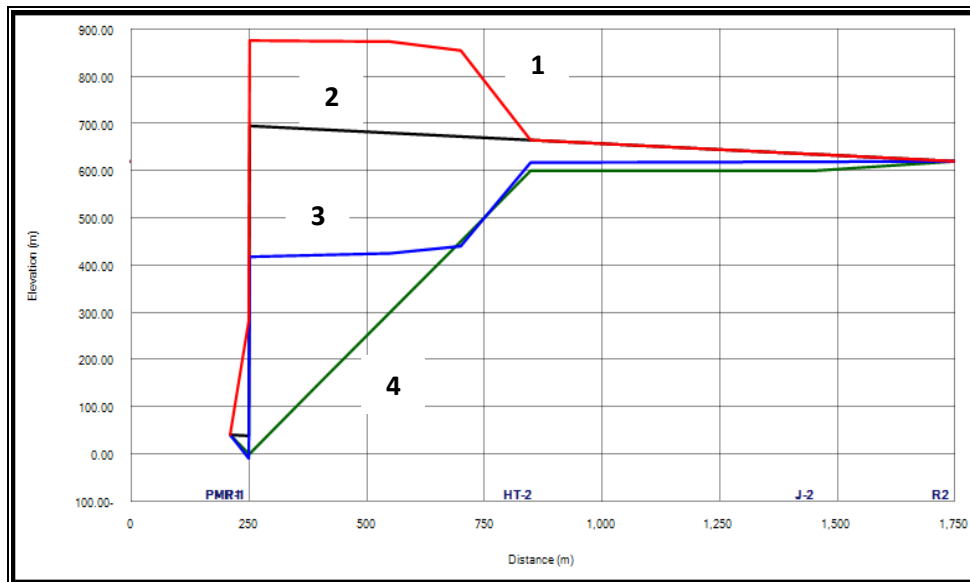
بمقارنة النتائج التي حصلنا عليها في الإكسل مع تلك التي حسبها البرنامج سنجد تطابقاً كبيراً في العمل في الحالتين.

2. وجود خزان حماية في رأس البئر:

إن منطقة رأس البئر من المناطق الهامة التي يجب دراستها بسبب تشكل الضغط السالب عندها وانتشاره إلى باقي الأنبوب لذلك يستوجب الحذر من الموجات السالبة المنتشرة واتخاذ الإجراءات اللازمة للحد منها ويمكن باستخدام خزانات الحماية الحد منها قدر الإمكان، وقد تم الشرح سابقاً عن كيفية الحساب اليدوي والشروط المحيطة التي يتم استخدامها في العمل، لكن سنركز على استخدام البرامج المتوفرة التي تقدم سهولة في العمل وإمكانيات متعددة وسريعة. سنستخدم برنامج WaterHammer من إنتاج شركة Bently حيث تم وضع الخزان في رأس البئر كما يوضح المقطع الطولي في الشكل (128) مقطوعاً في البئر والمضخة والخزان الموجود في رأس البئر وكيف يتم الضخ إلى خزان التجميع:



شكل (128) مقطع جبهى في المنظومة البئرية بوجود خزان حماية باستخدام *WaterHammer*.
 لقد افترضنا في البداية حجماً أولياً مقداره 1 م^3 من أجل التحقق من إمكانية تغطية القيم
 السالبة وإزالة التكيف، كما فرضنا حجماً أولياً للهواء ضمن الخزان مقداره (0.5 م^3) وبالفعل ارتفع
 الضاغط فوق منسوب الأرض الطبيعية بمقدار (18 م) وبالتالي نكون قد حققنا المطلوب بالتخلص
 من التكيف كما يوضح الشكل (129):



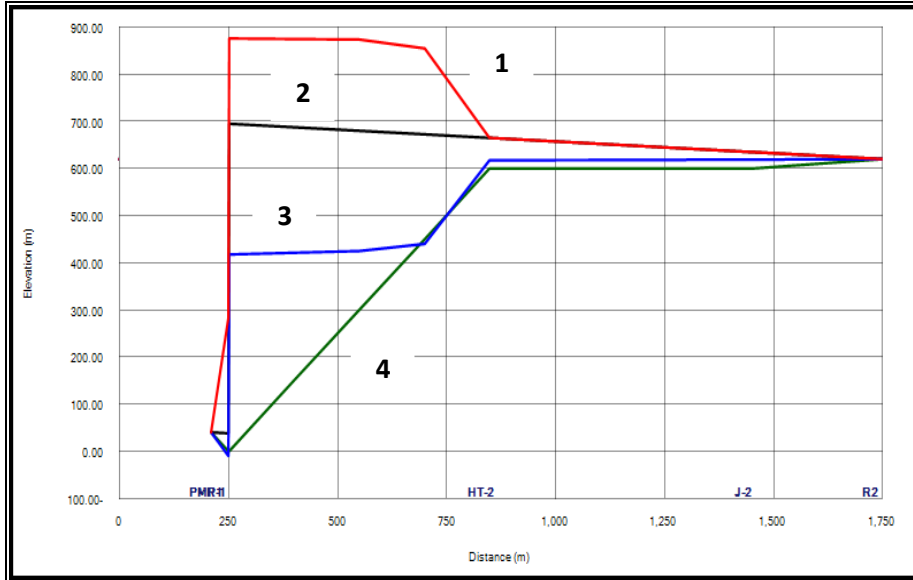
شكل (129) الضاغط الناتج على اعتبار حجم الهواء 500 باستخدام *WaterHammer*.

من الشكل نجد الأرقام التالية:

- 1 خط الضاغط الأعظمي.
- 2 خط الضاغط في الحالة المستقرة.
- 3 خط الضاغط الأدنى.
- 4 مسار الأنبوب.

وطبعاً هذه الأرقام سترافقنا نفسها في جميع الأشكال التالية التي سنحصل عليها.

إن ما يهمنا بشكل أساسي عند تصميم خزان الحماية هو الحجم الهوائي المفروض وفي حالتنا السابقة وجدنا أن حجم الهواء كان نصف الحجم الكلي للخزان، وقد حصلنا على قيمة ضغط موجب حر مقبولة ولكن يتم التصميم عادة بحيث لا تزيد هذه القيمة عن (3-5م) عند تذبذب الضاغط المتشكل فقط، ولهذا سنعيد الحساب باستخدام *WaterHammer* لتحديد الضاغط الحر المتبقي من خلال التحكم بقيمة حجم الهواء في الخزان. حيث سنعتبر أن حجم الخزان نفسه لم يتغير ونغير حجم الهواء ونتيجة الحساب وجدنا أن أقل قيمة هواء يمكن بقاؤها في الخزان هي (0.1 م³) حيث تصل قيمة الضاغط الحر (617.4م) فنحصل على الشكل التالي الذي يمثل قيم الضواغط على كامل المسار من المضخة وحتى الخزان حيث اللون الأحمر يمثل الضاغط الأعظمي والأزرق أدنى ضاغط حر موجب متبقي بوجود الخزان واللون الأسود يمثل القيم الستاتيكية أثناء الضخ، كما هو مبين في الشكل (130):



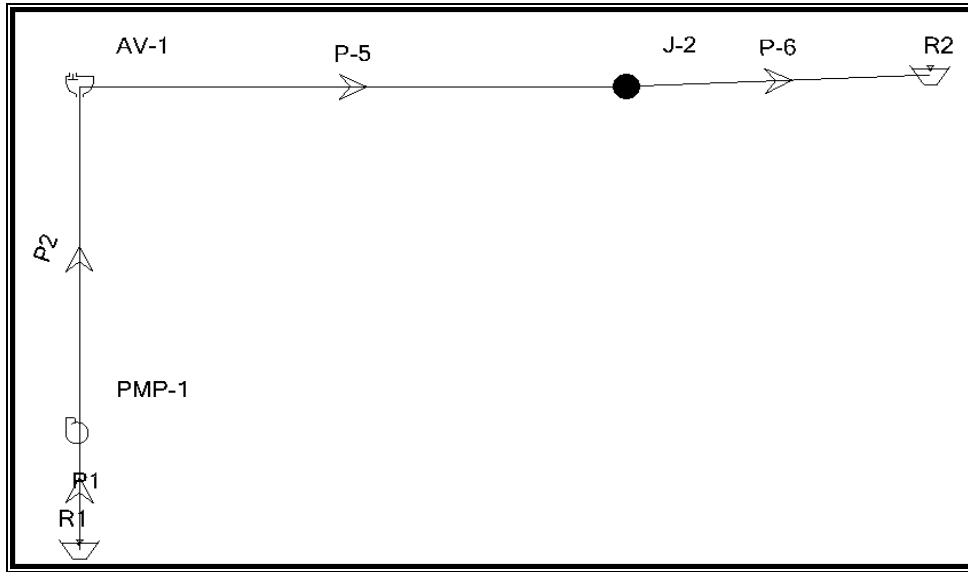
شكل(130)الضاغط الناتج على اعتبار حجم الهواء100ل باستخدام *WaterHammer*.

وبالتالي الدور الأساسي هو لحجم الهواء ضمن الخزان بغض النظر عن حجمه ولذلك نجد أن أصغر حجم هوائي ضمن الخزان يصل إلى (100ليتر)، أما تحديد حجم الخزان المناسب فيجب العودة إلى الكودات العالمية وبشكل عام يجب ألا يقل حجم الخزان ال (0.5م³) وحسب حالتنا يجب ألا يقل عن (100ليتر).

3. اقتراح وجود سكرة إدخال الهواء:

يمثل الشكل (131) وجود سكر إدخال هواء في رأس البئر كما هو موضح باستخدام برنامج

:WaterHammer



شكل (131) وجود سكر إدخال الهواء في أعلى الناقل باستخدام *WaterHammer*.

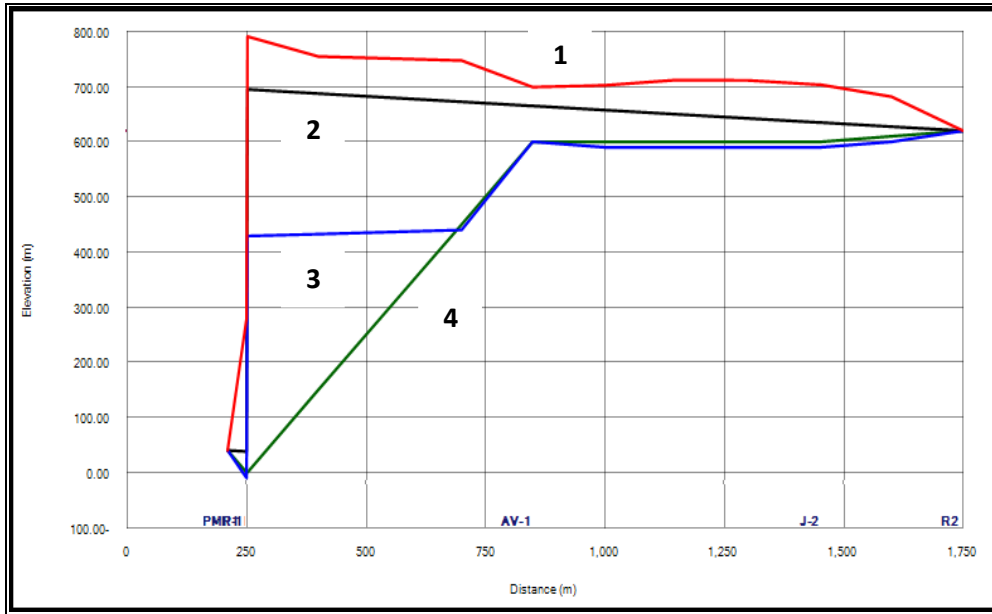
إن استخدام هذه الطريقة مناسب في المناطق المرتفعة من الناقل كما هي الحال في منطقة رأس البئر عندنا، حيث يسمح هذا السكر بإدخال الهواء وخروجه عند ذهاب وعودة موجة الضغط.

وقد ناقشنا الشروط الحدية لوجود هذه السكرة سابقاً، وقد تم باستخدام

WaterHammer استخدام هذا النوع من السكرة في رأس البئر حيث يحدث التكيف، وقد اعتبرنا أن

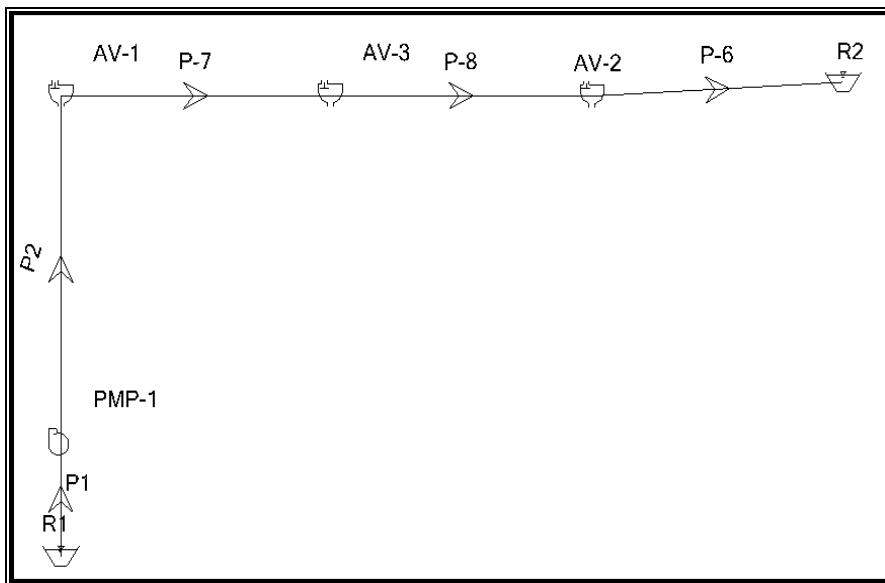
فوهتي الدخول والخروج ذات قطر 65مم حسب التصنيف البريطاني سنجد النتائج في الشكل

(132) على اعتبار زمن إغلاق 1ثا للسكر:



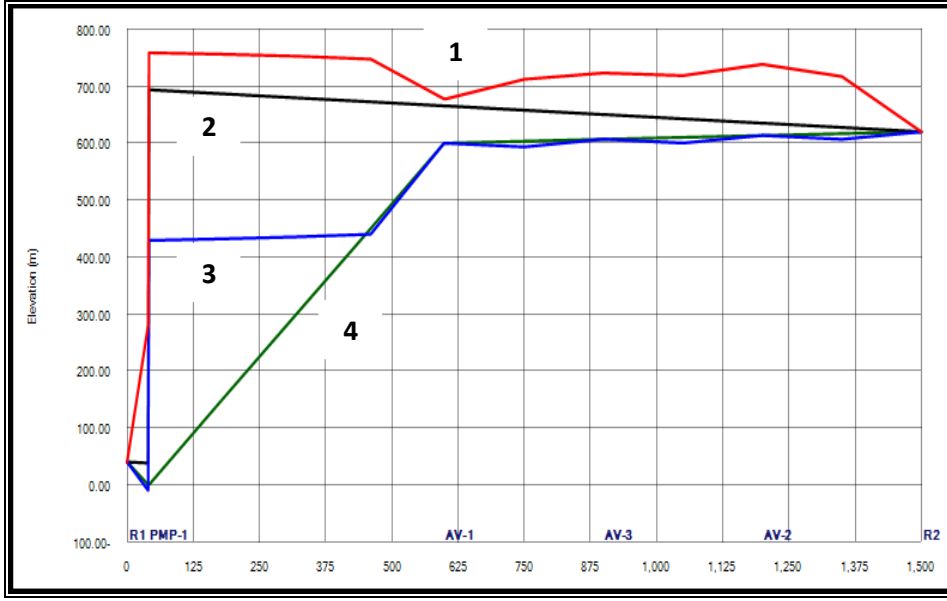
شكل (132) الضاغط الناتج على اعتبار وجود سكر إدخال الهواء باستخدام *WaterHammer*. نلاحظ من النتائج أن الضغط السالب اختفى فقط في منطقة وجود السكر، أما باقي نقاط الناقل فلم يتغير ضاغطها، وفي حال زيادة زمن إغلاق السكر ستزيد قيمة المناطق المتكيفة على طول الناقل، وبالتالي يجب التفكير عند استخدام مثل هذه الأجهزة بزمن إغلاقها إضافة إلى عدد سكورة الهواء الواجب استخدامها، فمثلاً في حال زيادة عدد السكورة سيرتفع الضاغط في مناطق وجودها.

لقد جربنا وجود سكور على بعد (300م) من رأس البئر وآخر على بعد (600م) عن رأس البئر كما يمثل الشكل (133):



شكل (133) وجود مجموعة سكورة إدخال الهواء باستخدام *WaterHammer*.

وبالتالي سنحصل على النتيجة المبينة في الشكل (134):



شكل (134) الضاغط الناتج بوجود مجموعة سكورة إدخال هواء باستخدام *WaterHammer*.

نلاحظ من الشكل كيف يرتفع الضاغط في النقاط التي وضعنا فيها سكورة إدخال الهواء

عند رأس البئر وعلى بعد (300 و 600م) من رأس البئر.

يمكن أن نستنتج من العمل السابق أن استخدام سكور إدخال الهواء ليس بالعملية الفعالة

جداً للقضاء تماماً على التكهف، حيث لا يزيل التكهف إلا في نقطة وضعه، ومشكلته الأساسية

هي في إدخال الهواء إلى الناقل الذي يكون أساساً منتشر فيه هذه الفجوات الهوائية فقد يزيد من

تشكلها أثناء الموجة السالبة وبالتالي يجب الحذر عند استخدام هذا النوع من الأجهزة.

◆ إن اختيار خزان الحماية هو إجراء أكثر فاعلية من استخدام سكورة إدخال الهواء، لكن

كما أثبت البحث أن طريقة الوصل تلعب دوراً هاماً في التخلص من القيم السالبة

للضاغط، فمجرد وصل الأنابيب بطريقة معينة يمكن أن نخفف من التكهف أو حتى إلغائه

بشكل كامل، وهذا يمكن أن يفيد بشكل أكبر من استخدام وسائل الحماية التقليدية المكلفة.

الملحق

1-5. الفهرس:

4	خلاصة البحث
5	محتويات البحث
6	الفصل الأول
6	1.1 مقدمة
7	1.2 الدراسة المرجعية
11	1.3 مشكلة البحث
12	1.4 هدف البحث
14	الفصل الثاني
14	2-1. تحليل المطرقة المائية
15	2-2. وصف لظاهرة المطرقة المائية
20	2-3. معادلات الجريان غير المستقر
21	2-4. طرائق حل معادلات المطرقة المائية
23	2-5. طريقة المميزات
28	2-6. سرعة انتشار موجة الضغط
32	2-7. الدراسة التحليلية والشروط الحدية
42	2-8. دراسة التكهف في الناقل
46	الفصل الثالث
46	3-1. مناقشة حالات تحميل مختلفة
47	3-2. دراسة حالة تحميل بسيطة
58	3-3. دراسة حالات وصل أكثر من بئر على مجمع رئيسي واحد
99	3-4. توصيات ونتائج
102	الفصل الرابع
102	4-1. تعريف بطرق الحماية بشكل عام

110	2-4. الشروط الحدية في وسائل الحماية
116	3-4. حالات الحماية المناسبة للمنظومة
125	الملحق
125	1-5. الفهرس
126	2-5. جدول المصطلحات
127	3-5. قائمة الأشكال
133	4-5. قائمة الجداول
134	5-5. المراجع

2-5. جدول المصطلحات:

<u>الواحدة</u>	<u>الاسم والتعريف</u>
m/sec	C سرعة انتشار موجة الضغط
Pa	P الضاغط
Pa	ΔP تغير الضغط
m	ΔH تغير الضاغط
m	e سماكة جدران الأنبوب
N/m ²	E معامل مرونة الأنبوب
N/m ²	K معامل انضغاطية السائل
m	D قطر الأنبوب
-	μ معامل بواسون
m ²	A مساحة مقطع الأنبوب
Sec	t الزمن
m	X المسافة
m/sec	V السرعة
N.m	T عزم الدوران
kg.m ²	I عزم عطالة الأجزاء الدائرة من المضخة والمحرك

m	H_r منسوب الماء في حوض الامتصاص عن مستوى مقارنة ثابت.
m	H_p الضاغط الذي تقدمه المضخة
m	H_{St} الضاغط الستاتيكي
-	K ثابت فاقد السكر
Rpm	N سرعة دوران المضخة
kg/m ³	r كثافة السائل
m	L طول الأنبوب
m	H_0 الضاغط في الحالة الستاتيكية
m ³	V_{air} حجم الهواء في الخزان في بداية الخطوة الزمنية
m ²	A_c مساحة مقطع الخزان
m	Z ارتفاع سطح الماء عن مستوى المقارنة في بداية الخطوة الزمنية
m	Z_p ارتفاع سطح الماء عن مستوى المقارنة في نهاية الفترة الزمنية
m	H_{Pair} الضغط المطلق مقدراً كضاغط
-	C_{in} ثابت تصريف السكر الموافق لحالة جريان الهوان نحو الداخل
m ²	A_{in} مساحة فتحة السكر
-	C_{out} ثابت تصريف السكر الموافق لحالة جريان الهواء نحو الخارج
m ²	A_{out} مساحة فتحة السكر
m ³ /sec	Q_0 الغزارة المستقرة للجريان
m ³ /sec	Q_i الغزارة في أي لحظة زمنية
Sec	ϵ جزء من الزمن

3-5. قائمة الأشكال:

الصفحة	الشكل
7	شكل (1) أثر المطرقة المائية على الأنايبب.
15	شكل (2) الحالة الستاتيكية (t=0).
16	شكل (3) المرحلة الأولى (t+ ϵ).
16	شكل (4) المرحلة الثانية (t=L/c).
17	شكل (5) المرحلة الثالثة (t=L/c+ ϵ).
17	شكل (6) المرحلة الرابعة (t=2L/c).

17	شكل (7) المرحلة الخامسة $(t=2L/c+\epsilon)$.
18	شكل (8) المرحلة السادسة $(t=3L/c)$.
18	شكل (9) المرحلة السابعة $(t=4L/c)$.
19	شكل (10) منحنى تغير ضاغط السائل عند السكر في ظروف الجريان المثالي.
19	شكل (11) منحنى تغير ضاغط السائل عند السكر في ظروف الجريان الحقيقي.
25	شكل (12) شبكة المميزات المعقدة.
27	شكل (13) شبكة المميزات البسيطة.
33	شكل (14) مميزة سالبة واصلة إلى المضخة أسفل البئر.
33	شكل (15) مضخة بالقرب من خزان ثابت.
36	شكل (16) المنحنى المميز للمضخة.
37	شكل (17) مميزة موجبة تصل إلى الخزان العلوي.
38	شكل (18) وصلة على التسلسل لناقلين.
38	شكل (19) وصلة تفرع.
41	شكل (20) تحديد الخطوة الزمنية.
41	شكل (21) تحديد الزمن.
43	شكل (22) الموجة الواردة في حالة التكهف.
43	شكل (23) الأنبوب في حالة تكهف.
46	شكل (24) توزيع الآبار على أرض الواقع.
48	شكل (25) بئر يضخ في الحالة الستاتيكية.
48	شكل (26) بئر يضخ في حالة انقطاع التيار عن محرك المضخة.
49	شكل (27) الضاغط الكلي بعد 3ثواني من انقطاع التيار عن محرك المضخة.
50	شكل (28) الضاغط الكلي بعد 5ثواني من انقطاع التيار عن محرك المضخة.
50	شكل (29) الضاغط الكلي بعد 10ثواني من انقطاع التيار عن محرك المضخة.
51	شكل (30) الضاغط المتشكل في رأس البئر بعد 5ثواني من انقطاع

	التيار عن محرك المضخة.
51	شكل (31) الضاغط الستاتيكي باستخدام برنامج <i>WaterHamm</i> .
52	شكل (32) مسقط يوضح الحالة المدروسة باستخدام <i>WaterHamm</i> .
52	شكل (33) المنحني المميز لمنحني المنظومة.
53	شكل (34) الضاغط في مقطعي رأس البئر وما بعد المضخة.
54	شكل (35) الضاغط الأعظمي و الأصغري على كامل مسار الأنبوب.
55	شكل (36) الضاغط الكلي باستخدام <i>WaterHamm</i> .
56	شكل (37) الضاغط في البئر على اعتبار عدم مشاركة الخزان في الجريان العكسي.
56	شكل (38) الضاغط في البئر نتيجة اختلاف الأنبوب على طول مساره.
57	شكل (39) الضاغط البيزومتري في رأس البئر.
59	شكل (40) وصل الآبار الثلاثة إلى نفس العقدة.
59	شكل (41) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.
60	شكل (42) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
60	شكل (43) الضاغط على كامل مسار الأنبوب من البئر الأول وحتى الخزان.
61	شكل (44) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
61	شكل (45) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.
62	شكل (46) الضاغط على كامل مسار الأنبوب من البئر الثاني وحتى الخزان.
62	شكل (47) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.
63	شكل (48) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
63	شكل (49) الضاغط على كامل مسار الأنبوب من البئر الثالث وحتى الخزان.
64	شكل (50) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة للبئر الأول.
64	شكل (51) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة للبئر الثاني.
65	شكل (52) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة للبئر الثالث.
67	شكل (53) وصل الآبار الثلاثة بشكل منفصل.
68	شكل (54) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة للبئر الأول.

68	شكل (55) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
69	شكل (56) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة للبئر الثاني.
69	شكل (57) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.
70	شكل (58) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.
70	شكل (59) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
71	شكل (60) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.
71	شكل (61) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثاني.
72	شكل (62) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثالث.
72	شكل (63) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول
73	شكل (64) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
73	شكل (65) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.
74	شكل (66) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
74	شكل (67) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.
75	شكل (68) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
75	شكل (69) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.
76	شكل (70) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثاني.
76	شكل (71) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثالث.
77	شكل (72) وصل بئرين إلى نفس العقدة.
78	شكل (73) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.
78	شكل (74) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
79	شكل (75) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
79	شكل (76) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.
80	شكل (77) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.
80	شكل (78) الضاغط على كامل مسار الأنبوب للبئر الثاني.
81	شكل (79) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.
81	شكل (80) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
82	شكل (81) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
82	شكل (82) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
83	شكل (83) وصل بئرين إلى رأس أحدهما الآخر.

83	شكل (84) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.
84	شكل (85) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
84	شكل (86) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
85	شكل (87) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.
85	شكل (88) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.
86	شكل (89) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثاني.
86	شكل (90) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.
87	شكل (91) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
87	شكل (92) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
88	شكل (93) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
88	شكل (94) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.
89	شكل (95) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثاني.
90	شكل (96) وصل ثلاثة آبار إلى رأس أحدها الآخر.
90	شكل (97) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.
91	شكل (98) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
91	شكل (99) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
92	شكل (100) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثاني.
92	شكل (101) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.
93	شكل (102) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
93	شكل (103) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.
94	شكل (104) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثاني.
94	شكل (105) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثالث.
95	شكل (106) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الأول.
95	شكل (107) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الأول.
96	شكل (108) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثاني.
96	شكل (109) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
97	شكل (110) الضاغط الكلي بعد المضخة مباشرة في البئر الثالث.
97	شكل (111) الضاغط البيزومتري في رأس البئر الثالث.
98	شكل (112) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الأول.

98	شكل (113) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثاني.
99	شكل (114) الضاغط الكلي على كامل مسار الأنبوب للبئر الثالث.
104	شكل (115) أنواع خزانات الحماية.
105	شكل (116) صورة حقيقية لغرفة الحماية.
106	شكل (117) خزان ضغط عادي.
107	شكل (118) خزان ضغط مزود بتحويل للجريان إلى الخزان.
108	شكل (119) سكر تنفيس ضغط.
108	شكل (120) وصلة تحويل مع سكر عدم رجوع.
109	شكل (121) خزانات التغذية.
110	شكل (122) خزان ضغط مع فوهة تفاضلية.
111	شكل (123) خزان ضغط مع أنبوب قصير.
113	شكل (124) سكر إدخال الهواء.
116	شكل (125) مقطع جبهي مع سكرة عدم رجوع باستخدام <i>WaterHammer</i> .
117	شكل (126) الضواغط العظمى والصغرى بوجود سكرة عدم رجوع باستخدام <i>WaterHammer</i> .
118	شكل (127) الضواغط العظمى والصغرى بوجود سكرة عدم رجوع باستخدام <i>EXCEL</i> .
119	شكل (128) مقطع جبهي في المنظومة البئرية بوجود خزان حماية باستخدام <i>WaterHammer</i> .
120	شكل (129) الضاغط الناتج على اعتبار حجم الهواء 500ل باستخدام <i>WaterHammer</i> .
121	شكل (130) الضاغط الناتج على اعتبار حجم الهواء 100ل باستخدام <i>WaterHammer</i> .
121	شكل (131) وجود سكر إدخال الهواء في أعلى الناقل باستخدام <i>WaterHammer</i> .
122	شكل (132) الضاغط الناتج على اعتبار وجود سكر إدخال هواء باستخدام <i>WaterHammer</i> .
123	شكل (133) وجود مجموعة سكرة إدخال الهواء باستخدام

	<i>.WaterHammer</i>
123	شكل (134) الضاغط الناتج بوجود مجموعة سكورة إدخال الهواء باستخدام <i>.WaterHammer</i>

4-5. قائمة الجداول:

30	الخصائص الفيزيائية للأنبوب	جدول (1)
30	الكتلة النوعية ومعامل الانضغاطية	جدول (2)
31	معامل بواسون والمرونة	جدول (3)
36	تحديد المنحني المميز للمضخة.	جدول (4)
45	معامل بواسون والمرونة حسب المرجع (2)	جدول (5)
45	معامل بواسون والمرونة حسب المرجع (1)	جدول (6)
54	الضاغط الناتجة باستخدام <i>.Waterhamm</i>	جدول (7)

5-5.المراجع باللغة العربية:

- [1] معلا.(1992-1993) الجريان غير المستقر في الأنابيب.
[2] سابا، جهاد.النمذجة الرياضية لظاهرة المطرقة المائية في شبكات الأنابيب بمساعدة الحاسوب. بإشراف الأستاذ الدكتور المهندس وائل جميل معلا.

المراجع باللغة الانكليزية:

- [1]Bruce E.Larock, Roland W.Jeppson, Gary Z.Watters(2000).
HYDRAULICS of PIPELINES SYSTEMS.
- [2] M.Hanif Chaudhry, Ph.D(1979). Applied Hydraulic Transients.
- [3]CHAUDHRY MOHAMMAD HANIF(1968). Boundary Conditions For
Analysis of WaterHammer In Pipe Systems.
- [4]D.Stephenson,F.ASCE.(2002). Simple Guide For Design of Air Vessels for
Water Protection of Pumping Lines.
- [5]Mohamed S.Ghidoui, Ming Zhao, Duncan A.Mclnnis, David
H.Axworthy.(2005). A Review of WaterHammer Theory and Practice.
- [6]ArrisS.Tijsseling.(2007) Johannes Von Kries and History of Water
Hammer.
- [7]Lorenzo Allievi.(1925).Theory of Water Hammer.
- [8]A.R.Lohrasbi and R.Attarnejad.(2008).Water Hammer Analysis by
Characteristic Method.
- [9]Anton Bergant, Angus R.Simpson and Esad Sijamhodzic.(2012).Water
Hammer Analysis of Pumping Systems for Control of Water in
Underground Mines.
- [10]Gilberto E.Urroz.(2004). Hydraulic Pipe Transient by the Method of
Characteristics.
- [12]E.Benjamin Wylie, Victor L.Streeter.(1978). Fluid Transients.
- [13]E.CABRERA,R.DOLZ,J.IZQUIERDO.(1976).Transient Analysis and
WaterHammer Protection A case Study.
- [14]ATEF M.KASSEM.(1976). Design for Protection Against Water
Hammer in Pump Discharge Lines.

[15]A.H.GIBSON,MSC,ASSOC,MEN,INST,CE.(1908).Water Hammer in Hydraulic Pipe Lines.

[16]Shawn Batterton.(2006).Water Hammer: an Analysis of plumbing Systems, Intrusion,and Pump Operation.

[17]ANCA CONSTANTIN, CLAUDIU STEFAN NITESCU.(2010).Numerical Simulation of Hydraulic Shock in a Water Pumping System Protected by Air.

[18]ROMM WICHOWSKI.(2006). Hydraulic Transient Analysis in Pipe Networks by the Method of Characteristics (MOC).

[19]Dinshaw M.Cntractor.(1963).The Effect of Minor Losses on WaterHammer Pressure Waves.

[20] AS.TIJSELING,A ANDERSON. On the Speed of Propagation of Waves in Elastic Tubes.

[21] JOHN K.VENNARD.(1940). Elementary Fluid Mechanics.

ABSTRACT

This research is specialised in studying the effect of water hammer phenomenon in pipes according to different ways of connections between pipes and how these ways affect high and low pressures as a result of water hammer that caused by pump failure.

A mathematical model has been designed by using Excel according to Characteristic Method (*MOC*) that depends on equations of motion and continuity and applied on group of wells in Swieda City.

This model has been checked by another computer programme that was designed by companies in order to solve and reduce this dangerous phenomenon like (*HAMMERBENTLY, WATERHAMM*).

As a result we have found according to the results by using EXCEL that some ways can be good not only for high pressures but also for reducing the negative pressures(*cavitations*) at the high points in the pipe.

Damascus University

Faculty of Civil Engineering

Department of Watery Engineering



**STUDY OF WATER HAMMER PHENOMENON IN PIPES USING
MATHEMATICAL SIMULATION**

CASE STUDY: ALRUSHAIDA WELLS IN ASWEIDA CITY

**Thesis submitted to Damascus University in partial fulfillment of
requirements for the degree of:**

MASTER OF SCIENCE

IN

CIVIL ENGINEERING

Prepared by: Eng.HAJAR EMAD ALSHOUFI

Supervisor: Dr.Eng.WISSAM NAKHLEH

2015