Araid Journal of Science and Technology
Higher Institute of Science and Technology-Shmokh

مجلة الرائد للعلوم والتقنية
المعهد العالي للعلوم والتقنية– الشموخ

استخدام وسائل كبح التموج لإحتواء المطرقة المائية بمنظومة شرق الحساونة ـ فزان

Use of Suppression Devices to Mitigate Water hammer in East Jebel Hassauna to Fezzan System

م / صلاح الدين عبد الله رفيع *
الهيئة الليبية للبحث العلمي
Salah_agouri@yahoo.com

*محاضر مساعد بديوان الهيئة الليبية للبحث العلمي

ABSTRACT

Pipelines are often designed based on steady state condition which is the case to which the pipes are subjected to during the design life period through the normal operation of the system. Although this steady state prevails most of the time, the change in operating condition, and hence the change from from steady to unsteady state imposes itself every now and then. This change in operating condition may include closing or opening valves, starting or stopping pumps or the like, which results change in the velocity of flow and leads to pressure fluctuations up and down, which is known as the phenomenon of waterhammer in pipelines.The waterhammer transients causes two unacceptable conditions:

- Pressures too high - exceeding the pipes' design pressure rates leading to permanent deformation or rupture of pipeline and components, damage to joints, leakage out of the pipelines causing wastage, environmental contamination, and fire hazards.
- Pressures too low - may cause collapse of pipelines, leakage into the pipelines at joints and seals under sub atmospheric conditions and if it reaches fluid vapour pressure it leads to cavitation and column separation.

The waterhammer pressure transients is a serious problem which can cause functional or actual failure of the pipeline system. This paper discusses the effects of waterhammer on pipelines and select the appropriate suppression devices. It also verifies the influence of pump and motor inertia on the propagation of pressure wave and estimation of surge vessel sizes.

Keywords: Steady state, unsteady state, waterhammer, cavitation and column separation, pump and motor inertia, pressure wave, surge vessels.

الملخص

تصمم خطوط الأنابيب في الغالب على أساس حالة الجريان المستقر STEADY STATE CONDITION وهي الحالة التي تخضع لها الأنابيب خلال فترة العمر التصميمي أثناء التشغيل الإعتيادي للمنظومة، وبالرغم من أن هذا الحالة المستقرة هي السائدة، إلا أن التغير في ظروف التشغيل (ومن ثم التغير من الجريان المستقر إلى الجريان غير المستقر) يفرض نفسه من حين إلى آخر.هذا التغير في ظروف التشغيل قد يتمثل في غلق أو فتح الصمامات، إيقاف أو بدء تشغيل المضخات أو ما شابه ذلك، مما يترتب عليه تغير في سرعة التدفق وينجم عنه تراوح في الضغط

صعوداً وهبوطاً او ما يعرف بظاهرة الطرق المائي في خطوط الأنابيب. إن تصميم خطوط الأنابيب لتحمل الضغوط الناتجة عن الطرق المائي يستلزم كبح هذا التراوح في الضغط و إحتوائه بحيث لا يتجاوز الضغط التصميمي للأنابيب من جهة، ولا ينخفض إلى الضغط البخاري أو يسبب حدوث ظاهرة التكهف أو إنفصال عمود الماء COLUMN SEPARATION من جهة أخرى. تناقش هذه الورقة ظاهرة المطرقة المائية في خطوط الأنابيب الناقلة للمياه وإختيار الأساليب والتجهيزات المناسبة لإحتواء الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية. الحالة الدراسية في هذه الورقة هي منظومة الحساونة سهل الجفارة بمشروع النهر الصناعي وتحديدا خط الأنابيب الناقل للمياه بالضخ والممتد من خزان تجميع مياه آبار حقل شرق الحساونة إلى خزان فزان لكسر الضغط.
الكلمات الإستدلالية: (الحالة المستقرة، الحالة غير المستقرة، المطرقة المائية، التكهف، إنفصال سريان الماء، عزم القصور الذاتي للمضخة والموتور، موجة الضغط، أوعية كبح التموج)

1. المقدمة

إن إجراء التحليل الهيدروليكي لظاهرة الطرق المائي بالمنظومات الناقلة للمياه يشكل أهم مراحل التصميم ويتضمن بشكل أساسي دراسة الحالات التالية:

- الإرتفاع المفاجيء في الضغط نتيجة حدوث الطرق المائي بما يتجاوز الضغط التصميمي للأنابيب ما يؤدي إلى الإنهيار الوظيفي او الفعلي للمنظومة.
- الإنخفاض في الضغط الى مستوى الضغط البخاري للمياه و ما ينتج عنه من حدوث ظاهرة التكهف (Cavitation) أو إنفصال عمود الماء (Column Separation).

2. الهدف من البحث

تهدف هذه الورقة إلى إلقاء الضوء على المخاطر التي تتعرض لها خطوط الأنابيب بسبب حدوث ظاهرة المطرقة المائية، خاصة في المنظومات الهيدروليكية الناقلة للمياه بالضخ نتيجة التغير في ظروف التشغيل. هذا التغير قد يتمثل في عدة ظروف منها:

- توقف المضخات بسبب إنقطاع الكهرباء عن محطة الضخ.
- بدء تشغيل المضخات.
- فتح او غلق الصمامات امام المياه المتدفقة في خطوط الأنابيب.
- غلق صمامات الهواء أثناء تعبئة خطوط الأنابيب.

وتجدر الإشارة إلى أن أخطر الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية هي تلك الناجمة عن التوقف المفاجيء للمضخات في محطات الضخ.

لذلك فإن إجراء الحسابات والتصاميم الهيدروليكية للمنظومات الناقلة للمياه تشمل:

- الحسابات الهيدروليكية للجريان المستقر المعبر عن التشغيل الإعتيادي للمنظومة.
- الحسابات الهيدروليكية للجريان غير المستقر المتمثل في ظاهرة المطرقة المائية.

3. الوسائل الممكنة لإحتواء الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية

1.3. الأساليب العملية المباشرة

- رفع الضغط التصميمي للأنابيب.

- تغيير مسار خط الأنابيب.
- إطالة الزمن الآمن لغلق الصمامات.
- إجتناب الغلق العنيف المفاجيء للصمامات الغير مرجعة.
- زيادة عزم القصور الذاتي للمضخات.

2.3. إستخدام التجهيزات الخاصة

- أوعية الهواء AIR CHAMBER
- أبراج التموج SURGE TOWER
- خزانات التغذية FEEDER TANK
- صمامات كسر الفراغ VACUUM BREAKING VALVE
- صمامات تخفيف الضغط PRESSURE RELIEF VALVE
- خطوط التجاوز الجانبية BY PASS LINE

4. حالة الدراسة - منظومة الضخ الممتدة من محطة ضخ بشرق الحساونة إلى خزان فزان

تتجمع المياه المنتجة بحقل آبار شرق الحساونة في خزان محطة الضخ ثم تُنقل إلى خزان الموازنة بفزان.

جدول (1) بيانات منظومة شرق الحساونة - فزان

مناسيب التشغيل بخزان شرق الحساونة	485	متر	الأقصي
	480	متر	الأدنى
مناسيب التشغيل بخزان فزان	545	متر	الاقصى
	540	متر	الأدنى
طول خط الأنابيب	47.189	كيلومتر	
قطر خط الأنابيب	4.0	متر	
معدل التدفق التصميمي	1.40 مليون متر مكعب/يوم = 16.20 متر مكعب / ثانية		
سمك خشونة الأنبوب	**0.10** ملم كحد أدنى	**إلى 0.267** ملم كحد أقصى	

1.4 برنامج الحاسوب المستخدم

لقد تم إستخدام برنامج الحاسوب (WANDA 4.6) و ذلك لإجراء الحسابات الهيدروليكية للجريان المستقر المعبر عن التشغيل الإعتيادي للمنظومة ، و كذلك القيام بالحسابات الهيدروليكية للجريان غير المستقر المعبر عن ظاهرة المطرقة المائية. برنامج (WANDA 4.6) هو برنامج حاسوب متطور ومتخصص تم تطويره وإختباره لسنوات عديدة من قبل مؤسسة دلفت هيدروليك (DELFT HYDRAULICS) الهولندية ، وهو برنامج الحاسوب المعتمد في إجراء التصاميم والتحاليل الهيدروليكية بجهاز تنفيذ وإدارة مشروع النهر الصناعي.

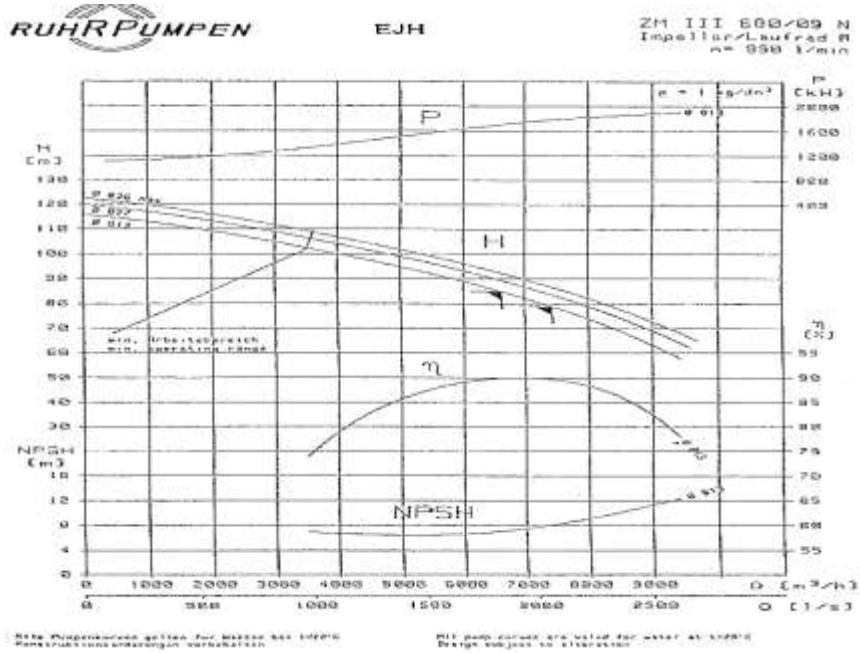
2.4. المدخلات إلى برنامج الحاسوب

1.2.4. المدخلات المتعلقة بحسابات الجريان المستقر

لمحاكاة سيناريو تشغيل المنظومة الممتدة بين خزان التجميع بحقل شرق الحساونة وخزان فزان وإختبار حالة إنقطاع الكهرباء عن محطة ضخ شرق الحساونة وتوقف جميع المضخات بالمحطة.

- **خزان التجميع بشرق الحساونة**
  - **أقصى منسوب للتشغيل = 485 متر**
  - **أدنى منسوب للتشعيل = 480 متر**

- **محطة ضخ شرق الحساونة** EJH - EAST JEBEL HASSAUNA
  - معدل التدفق التصميمي = 1.40 مليون متر مكعب / يوم
    = 58,333 متر مكعب / ساعة
    = 16.20 متر مكعب / ثانية
  - ضغط المضخة = 85 متر
  - عدد المضخات = 9 مضخات عاملة
  - سرعة دوران المضخة = 990 لفة / دقيقة
  - منحنى خصائص المضخة = أنظر الشكل (2)
- **خزان فزان لكسر الضغط**
  - أقصى منسوب للتشغيل = 545 متر
  - أدنى منسوب للتشعيل = 540 متر
- **خط الأنابيب**
  - طول خط الأنابيب = 47,189 متر
  - قطر خط الأنابيب = 4000 ملم
  - نوع الانابيب = أنابيب خرسانية سابقة الإجهاد
  - ارتفاع خشونة الأنابيب = 0.267 ملم الأقصى ليمثل تقادم الأنابيب
    = 0.10 ملم الأدنى ليمثل أنبوب جديد



الشكل (1) منحنى خصائص المضخات بمحطة ضخ شرق الحساونة

2.2.4 المدخلات المتعلقة بحسابات الجريان غير المستقر او المطرقة المائية

بالإضافة إلى المدخلات السابقة إلى برنامج الحاسوب wanda 4.6 والمتعلقة بإجراء الحسابات الهيدروليكية للجريان المستقر ، يلزم إدخال بعض البيانات الأخرى ليتسنى إجراء حسابات المطرقة المائية، و هذه البيانات هي:

أ) سرعة موجة الضغط wave speed

سرعة موجة الضغط في خطوط الأنابيب تمثل سرعة الصوت في الماء وتؤثر بشكل مباشر على قيم الضغوط الناتجة عن حدوث المطرقة المائية. تعتمد سرعة موجة الضغط على عدة عوامل منها:

- نوع الأنبوب ممثلاً في معامل مرونة جدار الأنبوب E
- قطر الأنبوب D، و سمك جدار الأنبوب e
- نوع السائل المنقول ممثلاً في كثافة السائل p ومعامل المرونة الحجمي K

سرعة الموجة في الأنابيب يتم حسابها عن طريق معادلة ويلي-ستريتر كالتالي:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K}{E}\frac{D}{e}(1-\mu^2)}}$$

بناءً على الدراسات والإختبارات الميدانية التي أجريت بمشروع النهر الصناعي ووفقاً للمعادلة السابقة فإن سرعة موجة الضغط في الأنابيب الخرسانية سابقة الأجهاد Prestressed Concrete PCCP - Cylinder Pipe

سرعة موجة الضغط = 1160 م / ث

ب) عزم القصور الذاتي للمضخة والموتور pump and motor inertia

لحساب القصور الذاتي للمضخة والموتور يتم إستخدام المعادلات التالية:

- عزم القصور الذاتي للمضخة

$$Ip = 1.5\ X\ 10^{7}\ \left(\frac{P}{N^{3}}\right)^{0.9556}$$

- عزم القصور االذاتي للموتور

$$I_m = 118\ \left(\frac{P}{N}\right)^{1.48}$$

- عزم القصور الذاتي للمضخة والموتور بمحطة ضخ شرق الحساونة

$$I = 9262\ Kg.m2$$

ج) الضغوط التصميمية لخطوط الأنابيب الخرسانية سابقة الإجهاد PCCP وفقاً للكود الأمريكي (AWWA C301- 84)

جدول (2) الضغوط التصميمية للأنابيب الخرسانية سابقة الإجهاد

الضغط التصميمي الأسمي بار	الزيادة للطرق المائي	الضغط التصميمي للطرق المائي بار
6	% 40	8.40
8	% 40	11.20
10	% 40	14.0

12	% 40	16.80
14	4 بار	18
16	4 بار	20
18	4 بار	22
20	4 بار	24
22	4 بار	26
24	4 بار	28

د) تعيين الفترة الزمنية للحسابات time interval

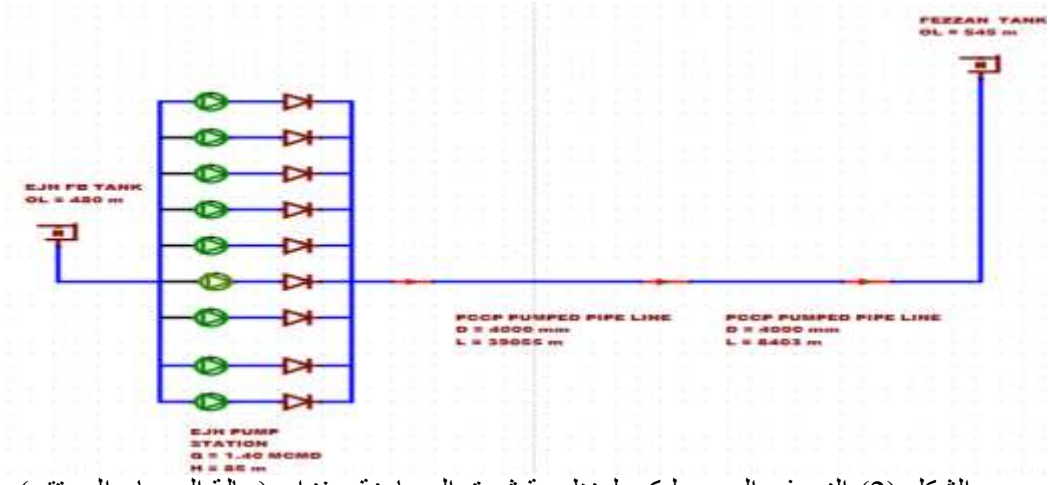
وفقاً لتقنية الفروق المتناهية المستخدمة في إيجاد الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية يلزم إدخال الفترة الزمنية (Δt) التي تؤدي إلى تقسيم خط الأنابيب إلى عدة أجزاء (Δx) و التي ترتبط بسرعة موجة الضغط (a) من خلال العلاقة : $\boldsymbol{a = \Delta x / \Delta t}$

الفترة الزمنية المناسبة هي $\Delta t = 0.10$ ثانية، كما يتم إدخال زمن المحاكاة time of simulation = 1000 ثانية.

5. الحسابات الهيدروليكية للجريان المستقر

لقد تم إجراء الحسابات الهيدروليكية للجريان المستقر المعبر عن التشغيل الإعتيادي للمنظومة وذلك بتشغيل عدد (9) مضخات بمحطة ضخ شرق الحساونة وذلك لتعيين الضغوط التصميمية لخطوط الأنابيب والتحقق من الإيفاء بأسس ومعايير التصميم المعتمدة بجهاز تنفيذ وإدارة مشروع النهر الصناعي.

1.5. النموذج الهيدروليكي لحالة الجريان المستقر



الشكل (2) النموذج الهيدروليكي لمنظومة شرق الحساونة - فزان (حالة الجريان المستقر)

2.5. نتائج الحسابات الهيدروليكية لحالة الجريان المستقر

لقد تم إجراء التحليل الهيدروليكي للجريان المستقر المعبر عن التشغيل الإعتيادي للمنظومة بإفتراض نقل معدل تدفق تصميمي قدره 1.40 مليون متر مكعب / يوم بواسطة عدد (9) مضخات عاملة في محطة الضخ.

خط الأنابيب	الطول (متر)	القطر (ملم)	السرعة (م/ث)	الضغط (بار)	الفاقد في الطاقة (متر)

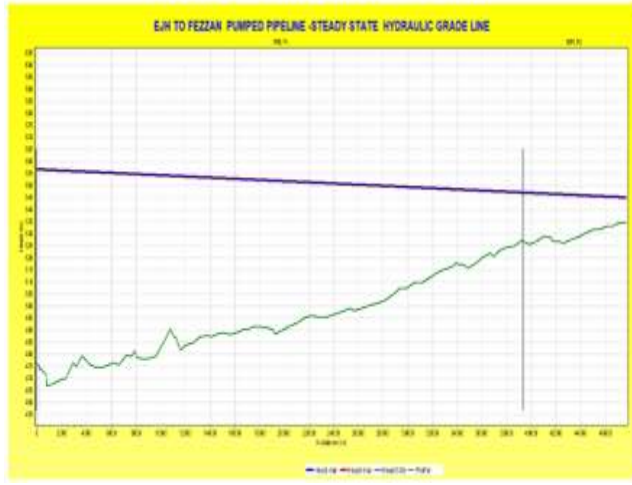
1	200	4000	1.28	7.90	0.05
2	39055	4000	1.28	8.0	9.60
3	8403	4000	1.28	1.0	2.05
المجموع	47,658				11.70

جدول (3) نتائج حسابات خط الأنابيب

جدول (4) نتائج حسابات المضخات

عدد المضخات	9 مضخات عاملة
التدفق لكل مضخة	6477
الضغط	86.90
سرعة دوران المضخة	999 لفة / دقيقة
الكفاءة	% 89.90
القدرة الكهربائية	1707 كيلو وات

وفيما يلي التمثيل البياني لنتائج التحليل الهيدروليكي للجريان المستقر لمنظومة نقل المياه بالضخ من خزان شرق الحساونة إلى خزان فزان.

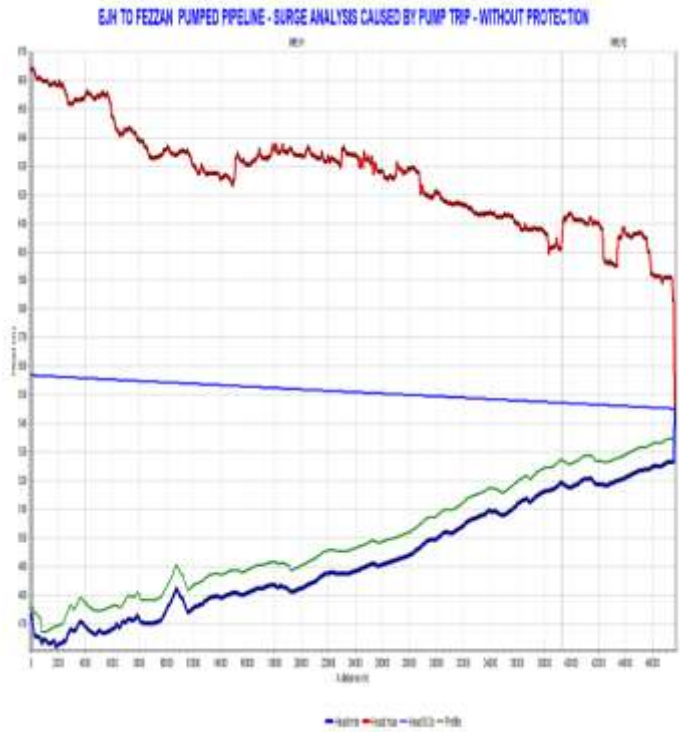


الشكل (3) الإنحدار الهيدروليكي لخط الانابيب الناقل للمياه بالضخ من خزان شرق الحساونة إلى خزان فزان (حالة الجريان المستقر).

3.5. نتائج الحسابات الهيدروليكية للجريان غير المستقر (الطرق المائي) بدون حماية

لقد تم إجراء الحسابات الهيدروليكية للجريان غير المستقر المعبر عن الطرق المائي و ذلك بمحاكاة إنقطاع الكهرباء و توقف تشغيل عدد (9) مضخات بمحطة ضخ شرق الحساونة و ذلك لتعيين التراوح في الضغط pressure transients و دراسة حجم التجهيزات اللآزمة لكبح هذا التذبذب في الضغط. عقب إنقطاع الكهرباء و توقف جميع المضخات بمحطة ضخ شرق الحساونة ينخفض الضغط أمام محطة الضخ و ينتج عن ذلك تولد موجة ضغط shock wave تنتقل بسرعة

الصوت في الماء في إتجاه خزان فزان لتصل اليه بعد زمن (L / C) = 47458 / 1160 = 40.90 ثانية .
بمجرد وصول موجة الضغط إلى خزان فزان و بسبب عدم إتزان الضغط في خط الأنابيب مع ضغط الخزان لذلك تنعكس موجة ضغط أخرى من خزان فزان و تنتقل في إتجاه محطة الضخ لتصل هناك بعد زمن 40.90 ثانية لتجد أمامها الصمام غير المرجع check valve مغلقاً.
يترتب على ذلك إرتداد موجة الضغط مرة أخرى وتنتقل في إتجاه خزان فزان من جديد لتصل إلى هناك بعد زمن 40.90 ثانية، وهكذا دواليك يستمر الترواح في الضغط وإنتقال موجة الضغط في الإتجاهين حتى تضمحل الموجة وتتلاشى بفعل الإحتكاك.



الشكل (4) الطرق المائي لخط الانابيب الناقل للمياه بالضخ من خزان شرق الحساونة – بدون حماية

6. الحسابات الهيدروليكية للجريان غير المستقر (المطرقة المائية) مع الحماية

بناءً على نتائج الحسابات الهيدروليكية للطرق المائي بدون حماية إتضح أن التراوح في الضغط يتجاوز قدرة تحمل الأنابيب لذلك ومن خلال خوازمية تعيين وسائل الحماية نجد أن إستخدام اوعية الهواء هي الوسيلة الأنسب لإحتواء الضغوط الناتجة عن الطرق المائي.

1.6. حماية المنظومة بإستخدام أوعية كبح التموج surge vessels

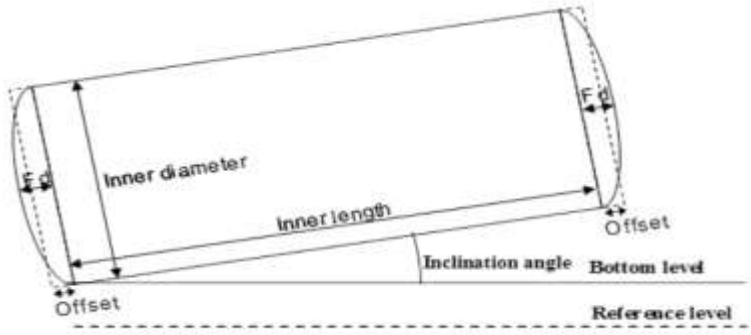
أوعية كبح التموج هي أحد أهم الوسائل المستخدمة لإحتواء الضغوط الناتجة عن الطرق المائي خاصة تلك الناجمة عن توقف المضخات بمحطات الضخ، وهي عبارة عن خزانات تحتوي على

كمية معينة من الماء والهواء المضغوط، وتكون في حالة خمول وتأهب ما مادامت المضخات في حالة تشغيل بشكل إعتيادي.
عقب إنقطاع الكهرباء وتوقف جميع المضخات فإن أوعية كبح التموج تصبح هي مصدر الطاقة البديل عن المضخات خلال الدقائق الأولى التي تلي توقف المضخات حيث تعمل على إستمرار التدفق في إتجاه خزان فزان، وبذلك تخفف من وطأة الإنخفاض المفاجيء في الضغط.
بينما يتمدد الهواء داخل الوعاء وينخفض الضغط فإن التدفق يتضاءل على نحو منتظم. هذا الإنخفاض في الضغط يحدث بوتيرة بطيئة و على نحو مُتحكم فيه (flow is allowed to decelerate in a controlled manner) ، و فيزيائيا ما يحدث هو تحويل التراوح العنيف في الضغط (pressure surge) إلى ما يُسمى التذبذب البطيء او (mass oscillation).

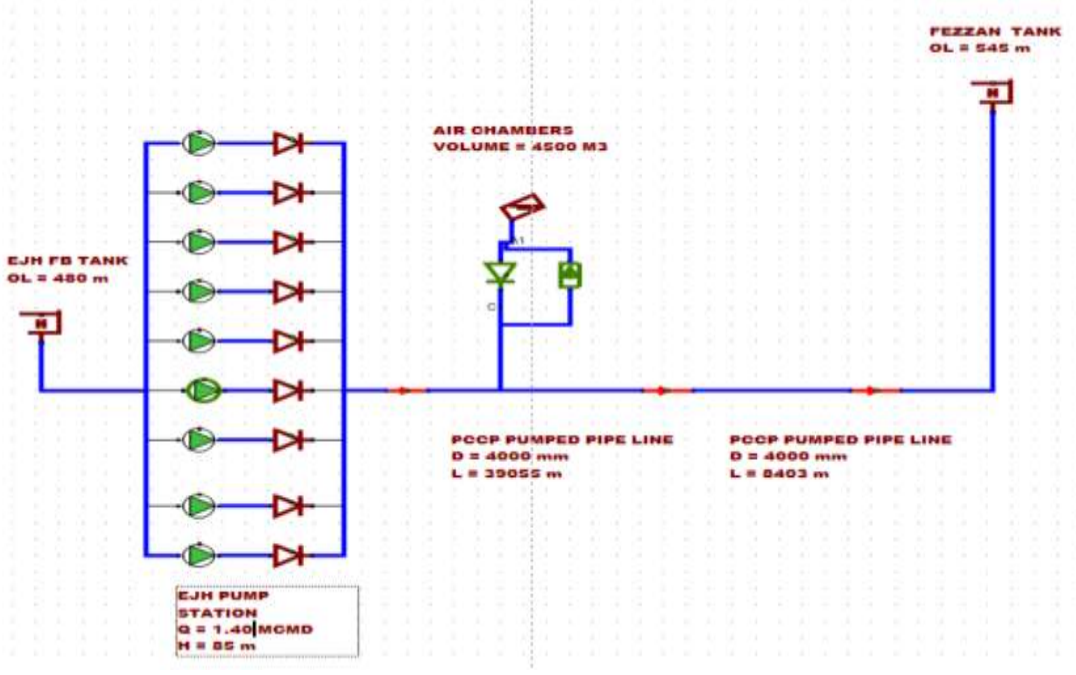
لحماية المنظومة من آثار الطرق المائي يتم إنشاء أوعية كبح التموج بعد محطة الضخ مباشرة في بداية خط الأنابيب.
حجم الهواء اللآزم توفره في أوعية كبح التموج يعتمد على عدة عوامل أهمها:

- طول خط الأنابيب
- قطر خط الأنابيب
- القطاع الطولي لخط الأنابيب pipeline profile

فعلى سبيل المثال فيما يتعلق بالقطاع الطولي لخط الأنابيب، إذا كان خط الأنابيب الصاعد (rising main) يتبع مساراً مرتفعاً فإن حجم الهواء اللآزم داخل الوعاء يكون اكبر مما لو كان الخط الصاعد يتبع مساراً أقل إرتفاعاً، و ذلك للحصول على ذات القدر من الحماية.
أما الحجم الكلي لوعاء كبح التموج، وهو عبارة عن حجم الماء والهواء، فيعتمد على مدى مستوى تمدد الهواء داخل الوعاء أثناء إنخفاض الضغط، مضافاً اليه حجم إضافي لضمان عدم حدوث تفريغ كامل للمياه من الوعاء ومن ثم ضمان عدم دخول الهواء إلى خط الأنابيب.
بمجرد إنقطاع الكهرباء وتوقف المضخات يتدخل وعاء كبح التموج فيتمدد الهواء داخل الوعاء ويُزود خط الأنابيب بالمياه عبر خط أنابيب مزود بصمام غير مرجع check valve بقطر يساوي تقريباً قطر خط الأنابيب من خلال فتحة خروج إنسيابية لضمان تدفق المياه بالسرعة اللآزمة لخفيف حدة التراوح في الضغط الناتج عن توقف المضخات.
ومن زاوية أخرى، عقب إنقطاع الكهرباء وتوقف المضخات تتولد موجة ضغط منخفضة تنتقل من محطة الضخ في إتجاه خزان فزان بسرعة الصوت في الماء ثم تعود في إتجاه محطة الضخ كموجة ضغط مرتفعة ولكن تجد أمامها صمام غير مرجع مقفلاً check valve لذا تدخل المياه إلى الوعاء و لكن عبر خط تجاوز جانبي bypass line مزود بصفيحة خنق التدفق orifice plate وذلك ليكون دخول المياه إلى وعاء الهواء بطيئاً ما يؤدي إلى كبح التراوح في الضغط.



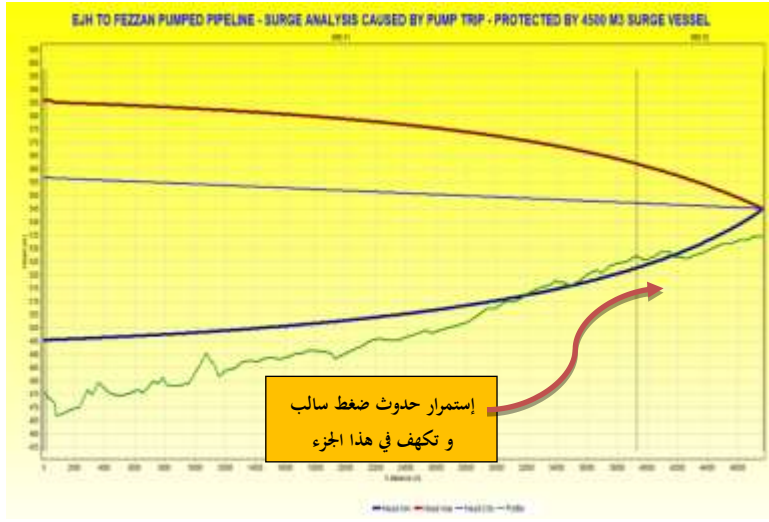
الشكل (5) قطاع نمطي في وعاء مائل لكبح التموج



الشكل (6) النموذج الهيدروليكي لخط الأنابيب الممتد من خزان شرق الحساونة إلى خزان فزان مع إستخدام أوعية كبح التموج

2.6. نتائج الحسابات الهيدروليكية للمطرقة المائية مع استخدام اوعية كبح التموج

يُلاحظ أن إستخدام أوعية الهواء بحجم 4500 متر مكعب مباشرة بعد محطة ضخ شرق الحساونة يعمل على حماية المنظومة على معظم خط الأنابيب البالغ 47,189 متر، إلا ان أوعية الهواء وبالرغم من هذا الحجم ليست كافية لحماية الجزء الأخير من خط الأنابيب والذي يبعد حوالي 8500 متر من خزان فزان.



الشكل (7) ضغوط المطرقة المائية الناتجة عن توقف المضخات على خط الانابيب الناقل للمياه بالضخ من خزان شرق الحساونة إلى خزان فزان - مع إستخدام اوعية الهواء بحجم 4500 م3

يلاحظ من المنحنى السابق حدوث إنخفاض في الضغط يصل إلى سالب 6 متر، ووفقاً لأسس ومعايير التصميم المعتمدة بجهاز النهر الصناعي الذي ينص على أن أدنى ضغط مسموح به في خط الأنابيب يجب الا يقل عن موجب 2 متر. لذلك لعلاج هذه المشكلة وُجد أن الحل الأمثل هو إنشاء خزان تغذية Feeder tank عند المحطة الكيلومترية (660 + 103) .

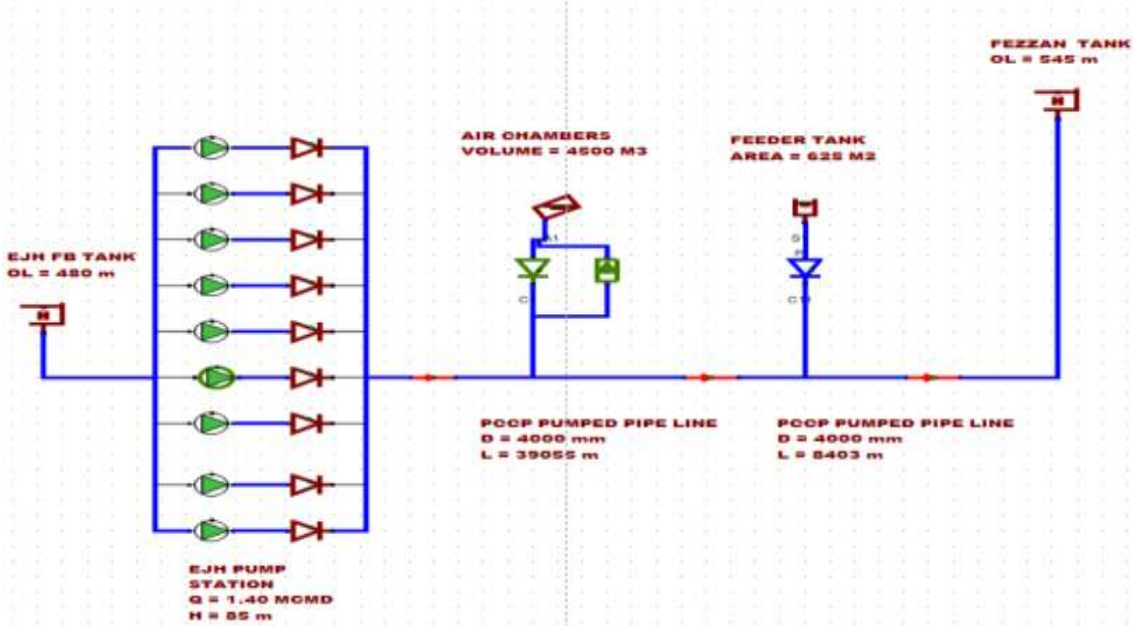
3.6. حماية المنظومة بإستخدام أوعية كبح التموج Surge Vessels و خزان التغذية

خزان التغذية Feeder Tank

التغلب على حدوث الضغط السالب في نقطة محددة على خط الأنابيب يكون عادة بإستخدام خزان التغذية و أحيانا يُسمى خزان كبح التموج وحيد الإتجاه one way surge tank ، و هذا الخيار هو الأنسب فنياً و إقتصادياً ، إلى جانب إستخدام أوعية كبح التموج كما تقدم surge vessels بالقرب من محطة الضخ.

أنبوب خروج المياه من خزان التغذية إلى خط الأنابيب يكون بقطر مناسب يسمح بتدفق المياه بسرعة عقب توقف المضخات و يكون هذا الانبوب مزود بصمام عدم رجوع check valve . بعد إنعكاس موجة الضغط من خزان فزان و ارتفاع الضغط في الخط تعود المياه لتعبئة خزان التغذية عبر خط تجاوز جانبي bypass مزود بصفيحة خفض تدفق orifice plate . عند إمتلاء الخزان يقفل خط الدخول إلى خزان التغذية عبر صمام يسمى altitude valve.

4.6. النموذج الهيدروليكي للمنظومة بإستخدام أوعية كبح التموج وخزان التغذية

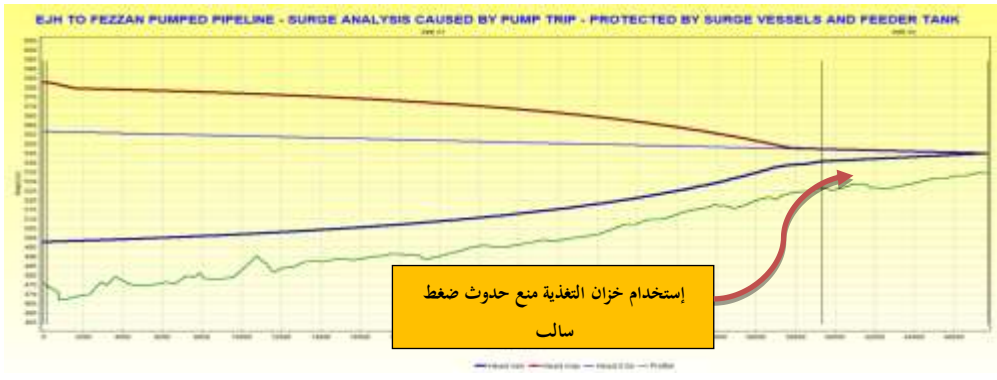


الشكل (8) النموذج الهيدروليكي مع استخدام اوعية كبح التموج و خزان التغذية

5.6. نتائج الحسابات الهيدروليكية للمطرقة المائية بإستخدام أوعية كبح التموج وخزان التغذية

يلاحظ من خلال النتائج المبينة أدناه أنه تم التغلب على إشكالية التكهف و الضغط السالب عند المحطة (660 + 103) و ذلك بإستخدام خزان التغذية بأبعاد (25 م x 25 م) ، بالإضافة إلى أنشاء أوعية كبح التموج مباشرة بعد محطة ضخ شرق الحساونة عند المحطة (127 + 65).

نخلص إلى أنه قد تم إحتواء الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية جراء إنقطاع الكهرباء وتوقف جميع المضخات بمحطة ضخ شرق الحساونة و ذلك بإستخدام أوعية كبح التموج (Surge Vessels) وخزان التغذية (Feeder Tank).



الشكل (9) ضغوط المطرقة المائية الناتجة عن توقف المضخات على خط الانابيب الناقل للمياه بالضخ من خزان شرق الحساونة إلى خزان فزان - مع إستخدام اوعية الهواء بحجم 4500 م وخزان التغذية

7. الخلاصة

1. التصاميم الهيدروليكية للمنظومات الناقلة للمياه تُجرى على مرحلتين:
   - المرحلة الأولى: الحسابات الهيدروليكية للجريان المستقر المعبِّر عن التشغيل الإعتيادي للمنظومة.
   - المرحلة الثانية: الحسابات الهيدروليكية للجريان غير المستقر (او المطرقة المائية).
2. تناولت الورقة محاكاة انقطاع الكهرباء عن محطة الضخ بحقل شرق الحساونة بمنظومة الحساونة - سهل الجفارة و ذلك كحالة دراسية لإلقاء الضوء على أهمية إجراء الحسابات الهيدروليكية للجريان غير المستقر (او ما يُعرف بظاهرة المطرقة المائية) و تأثير عزم القصور الذاتي للمضخة و الموتور على الضغوط الناتجة،و ضرورة تعيين الوسائل المناسبة لإحتواء هذه الضغوط.
3. المنظومة محل الدراسة تبدأ من خزان حقل آبار شرق الحساونة ((Forebay Tank عند المحطة الكيلومترية (611 + 64) إلى خزان فزان لكسر الضغط عند المحطة الكيلومترية (068 + 112).
4. إنقطاع الكهرباء وتوقف جميع المضخات يؤدي إلى تولد ضغوط عابرة pressure transients تتمثل في إنخفاض في الضغط يلية ارتفاع ويستمر التراوح في الضغط دواليك إلى أن تضمحل موجة الضغط pressure wave وتتلاشى بفعل إحتكاك المياه مع جدران الانابيب .
5. التراوح في الضغط الناتج عن توقف المضخات او ما يُعرف بظاهرة المطرقة المائية water hammer phenomenon ينتج عنه:
   - إنخفاض في الضغط قد يصل إلى مستوى الضغط البخاري للمياه و يسبب حدوث ما يعرف بالتكهف وإنفصال عمود الماء (cavitation and column separation).
   - ارتفاع في الضغط قد يتجاوز الضغط التصميمي للأنابيب.
6. هذا التراوح في الضغط (او المطرقة المائية) إذا تجاوز الحدود المقبوله فإنه يؤدي إلى إنهيار فعلي أو وظيفي للمنظومة (actual or functional failure).
7. لإحتواء الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية يلزم إستخدام أحد الأساليب أو التجهيزات المناسبة التي جاء ذكرها في هذه الورقة وذلك لحماية المنظومة الهيدروليكية الناقلة للمياه من الإنهيار.
8. لقد تم إستخدام برنامج الحاسوب المتخصص (wanda 4.6) وذلك لإجراء الحسابات الهيدروليكية للجريان المستقر وغير المستقر.
9. بلغ التدفق التصميمي في المنظومة 1.40 مليون متر مكعب يومياً يتم نقلها بواسطة عدد (9) مضخات عاملة من خزان تجميع مياه آبار حقل شرق الحساونة إلى خزان فزان.

10. الضغوط التشغيلية الناتجة عن الجريان المستقر تراوحت بين 1.70 بار و8.90 بار، أما سرعة التدفق فبلغت 1.30 م / ث.
11. سيناريو محاكاة إنقطاع الكهرباء عن محطة الضخ بدون إستخدام وسائل حماية ضد المطرقة المائية خلص إلى ان الضغوط الناتجة تبلغ 18.70 بار كحد أقصى وسالب 0.90 بار كحد أدنى.
12. بدراسة الوسائل والأساليب المتاحة وُجد أن أنسب الوسائل الممكن إستخدامها لكبح الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية هو إستخدام أوعية الهواء surge vessels بحجم إجمالي 4500 متر مكعب.
13. إستخدام أوعية الهواء بالحجم المذكور وإنشاءها مباشرة بعد محطة الضخ أدى إلى إحتواء الإرتفاع في الضغط حيث أصبح 11.80 بار كحد أقصى، بعد أن كان 18.70 بار ولكنه لم يعالج إشكالية إنخفاض الضغط الذي يصل إلى سالب 0.90 بار عند الكيلومتر (660+103).
14. أسس ومعايير التصميم المعتمدة لدى جهاز تنفيذ وإدارة مشروع النهر الصناعي تنص على أن أدنى ضغط مسموح به يجب الا يقل عن موجب 0.20 بار مقاساً من قمة الأنبوب في حالتي الجريان المستقر وغير المستقر.
15. للإيفاء بهذا المعيار ولعلاج إشكالية الضغط السالب يلزم إنشاء خزان تغذية (feeder tank) عند المحطة (660+103) التي تبعد حوالي 8.40 كيلومتر عن خزان فزان.
16. خلصت الحسابات إلى أن حماية المنظومة من الضغوط الناتجة عن المطرقة المائية والإيفاء بأسس ومعايير التصميم المعتمدة لدى جهاز النهر الصناعي فإنه يلزم إنشاء التجهيزات التالية:
    - اوعية هواء (surge vessels) بحجم 4500 متر مكعب، بعدد 18 وعاء حجم كل منها 250 متر مكعب.
    - خزان تغذية (feeder tank) بمساحة 625 متر مربع عند المحطة (660+103).
17. تجدر الإشارة إلى أن عزم القصور الذاتي للمضخة والموتور pump and motor's inertiaكان له تأثير واضح وكبير جدا على التراوح في الضغط الناتج عن المطرقة المائية، فقد خلص البحث إلى أن التقدير الخاطيء لقيم القصور الذاتي و تخفيضه عن قيمته الحقيقية يؤدي إلى ارتفاع حجم أوعية الهواء اللآزمة بشكل ملحوظ.

8. التوصيات

- إجراء التحليل الهيدروليكي للمطرقة المائية بشكل دوري أثناء تشغيل المنظومة كلما حدث تغير في ظروف التشغيل، هذا التغير قد يتمثل في إضافة مضخة او غلق صمام وما شابه ذلك، بغرض التحقق من عدم تجاوز الحدود المسموح بها للضغوط إرتفاعاً وإنخفاضاً.
- الحرص على إتباع أسس ومعايير التصميم المعتمدة بوزارة الإسكان والتعمير أثناء إعداد التصاميم الهيدروليكية خاصة فيما يتعلق بالسرعة التصميمية للتدفق حيث زيادة السرعة بما يتجاوز 1.50 م/ث يؤدي إلى ضغوط مرتفعة للطرق المائي.، وذلك وفقاً لمعادلة جوكوفسكي الشهيرة.

- إختيار النوع المناسب للأنابيب وفقاً لظروف المشروع و معطياته حيث أن الأنابيب المصنوعة من اللدائن مثل البولي إيثلين عالي الكثافة HDPE، والمصنوعة من الألياف الزجاجية GRP تكون معرضة لضغوط أقل للمطرقة المائية بسبب إنخفاض سرعة الموجة في هذه الأنواع من الأنابيب مقارنة بالأنابيب الخرسانية او المعدنية.
- يجب تنفيذ أنظمة مراقبة مستمرة لرصد ضغط المياه في خطوط الأنابيب. مثل أجهزة قياس الضغط عن بُعد (Sensors) والأنظمة الذكية التي تتيح مراقبة وتحليل الأداء بشكل دوري، مما يساعد في الكشف المبكر عن أي تغيرات مفاجئة قد تؤدي إلى وقوع مشكلة في المنظومة.
- يجب توفير برامج تدريبية منتظمة للمهندسين والفنيين الذين يعملون على صيانة وتشغيل خطوط الأنابيب ولك على كيفية التعامل مع حالات المطرقة المائية وفهم تأثيراتها مما يساعد في تقليل المخاطر وتحسين استجابة المنظومة عند حدوث مشاكل.
- يجب أن يتم التركيز على تأثيرات المطرقة المائية على المدى الطويل على العمر الافتراضي لأنابيب المنظومة الهيدروليكية الناقلة للمياه والمعدات ويمل ذلك دراسة مدى تأثير الضغوط المتكررة والمفاجئة على الأنابيب بمرور الوقت وكيفية تأثيرها على عمليات التآكل والتلف.
- يُنصح بوضع استراتيجيات صيانة وقائية تتضمن فحوصات دورية لتقييم حالة الأنابيب والصمامات وأنظمة التحكم وتشمل هذه الاستراتيجيات استخدام أدوات فحص متقدمة مثل أجهزة قياس الضغط عن بُعد أو الكاميرات الحرارية للكشف عن أي نقاط ضعف أو تلف في المنظومة.
- من الضروري زيادة الوعي وتدريب المهندسين والفنيين على كيفية التعامل مع المشاكل المرتبطة بالمطرقة المائية، ويشمل ذلك توفير دورات تدريبية متخصصة في مراقبة وتحليل الظواهر الديناميكية مثل المطرقة المائية وكيفية استخدامها في اتخاذ قرارات التشغيل والصيانة.

المراجع

1 Design Criteria for Infrastructure Projects , Rev 03 , November 2010
2 Man made River Project , phase 2 , design criteria , hydraulics , sept 1992
3 J. Paul Tullis , Hydraulics of pipelines , pumps, valves, cavitations, transients, wiley interscience 1989
4 Thorley A. R , Fluid Transients in Pipeline Systems – Libgen 1 c, 1991
5 Man made River Project , phase 2 , hydraulic design report no.3 , Jan 1997
6 Man made River Project , phase 2 , pipeline hydraulic report no.2 , Jan 1992