الجمهورية العربية السورية

وزارة الموارد المائية

نقابة المهندسين

دراسة المطرقة المائية
في شبكات مياه الشرب

اعداد المهندس

جهاد سابا

التدقيق اللغوي

م. أيمن الحسن

التنسيق

م. ايمان غميرد

المحتويات:

توطئة

I - مدخل 6

II - دراسة مرجعية 10

III - ملخص الكتاب 13

مقدمة: المفاهيم و المبادئ الأساسية

1. تحليل شبكات مياه الشرب

1-1- مقدمة 24

1-2- تحديد منظومة الأنابيب 25

1-3- العلاقة الأساسية بين مكونات الشبكة 26

1-4- معادلات الجريان المستقر في الشبكة 27

1-5- منظومة معادلات الغزارة Q-equations 27

1-6- منظومة معادلات الضاغط H-equations 28

1-7- منظومة معادلات تصحيح الغزارة ΔQ-equations 28

1-8- خوارزمية التدرج Gradient Algorithm 28

1-9- حل معادلات الشبكة:طريقة نيوتن. 31

2. تصميم شبكات مياه الشرب

2-1- شبكات الأنابيب الشجرية 42

2-2- معيار تصميم شبكة حلقية 45

2-3- تصميم المكونات الخاصة 46
2-4- تمثيل منحنيات المضخة 48
2-5- تحليل الحساسية 49

3. التحليل الديناميكي

3-1- مقدمة 51
3-2- المحاكات بالزمن الممتد 52
3-3- خوارزمية المحاكاة بالزمن الممتد 53
3-4- الدراسة الاقتصادية للشبكات 56
3-5- الكلفة الدنيا 57
3-6- التصميم الاقتصادي للشبكات 58
3-7- ارشادات تصميمية للشبكات المعقدة 59

4. التحليل النوعي في الشبكات

4-1- مقدمة 65
4-2- التحليل النوعي للشبكات 65
4-3- معادلات التحليل النوعي للشبكات 66
4-4- خوارزميات حل معادلات التحليل النوعي للشبكات 72

5. الجريان غير المستقر

5-1- تصنيف الجريان غير المستقر 79
5-2- معادلات الجريان غير المستقر 79
5-2-1- الجريان شبه المستقر 79
5-2-2- الجريان بشروط العمود الصلب 81
5-2-3- الجريان بشروط المطرقة المائية 82

6. المطرقة المائية في الشبكات

6-1- نظرية العمود الصلب في الشبكات 88

6-2- حالة دراسية: تشكيل المعادلات 89

7. طريقة المميزات المحددة

7-1- معادلات المميزات المحددة 97

7-2- الحل العددي 98

7-3- الشبكة Δs، Δt 100

7-4- بارامترات دقة الحل 101

7-5- الشروط المحيطية 101

8. طريقة المميزات الضمنية

8-1- معادلات المميزات الضمنية 113

8-2- معادلات الشروط المحيطية 116

9. طريقة الممانعة

9-1- التشابه بين الممانعة الهيدروليكية و الكهربائية. 129

9-2- حل معادلات المطرقة المائية الخطية. 131

9-3- مفهوم و معادلة الممانعة. 132

10. الطريقة اللاتقسيمية

10-1- النظرية الناظمة. 139

10-2- نمذجة معادلتي المطرقة المائية 141

10-3- الشروط المحيطية- الشروط الاولية 142

10-4- الخوارزمية 145

11. التفاعل بين الماء و جدار الأنبوب و التربة

11-1- معلومات أساسية. 149

11-2- طرائق الحل العددية. 153

12. إجراءات و أجهزة الحماية من المطرقة المائية

12-1- أسباب المطرقة المائية في أنظمة الأنابيب. 163

12-2- التحكم بضغوط المطرقة المائية. 164

12-3- خزانات الحماية. 156

12-4- سكور الهواء. 167

13. الملاحق

ملحق 1 : أسس تصميم خط ضخ أو إسالة. 170

ملحق 2 : أنماط توضع الأنابيب و الاختبارات. 173

ملحق 3 : الأنابيب المستخدمة في مشاريع مياه الشرب 179

ملحق 4 : دعامات الارساء 188

ملحق 5 : التزويد المتقطع 191

ملحق 6 : تقنيات متقدمة في التحليل الهيدروليكي 194

ملحق 7 : خوارزميات لنمذجة ظاهرة المطرقة المائية 198

14. قائمة المراجع

توطئة

أتقدم بالشكر الجزيل لأساتذة قسم الهندسة المائية الذي كان لمناقشتهم و آرائهم الأثر الكبير لإنارة الطريق لإخراج هذا الكتاب إلى النور. و اخص بالشكر الأستاذ الدكتور وائل جميل معلا و الأستاذ الدكتور امجد زينو و الأستاذ الدكتور يوسف مرعي و الدكتور قتيبة السعدي و الدكتور بسام فركوح و الدكتور وسام نخلة، الذي كانت مراجعتهم و ملاحظاتهم العلمية أساسا للإخراج العلمي المناسب.

أتقدم بالشكر العميق المهندس أسامة الأخرس و المهندس محمد شياح و المهندسة حنان شوقي و المهندس خالد شلق و المهندسة إيمان غميرد الذي كان لآرائهم و مساعدتهم و تشجيعهم بالغ الأثر في إخراج أبحاث هذا الكتاب، و أخص بالشكر المهندس أيمن الحسن الذي إضافة لآرائه و تشجيعه كانت ثمرة مراجعته اللغوية الإخراج اللائق.

مدخل

شبكات مياه الشرب هي منظومة أنابيب و خزانات مياه و مضخات و سكور و أنطمة تحكم غايتها نقل الماء من مصادر و خزانات إلى خزانات و مستهلكين. يشمل هذا التعريف كل مشاريع نقل الماء من خطوط إسالة و ضخ إلى الشبكات الشجرية و الحلقية يمكن أن تحوي أي مجموعة من التجهيزات الهيدروليكية.

و كأي مشروع هندسي فإن شبكات مياه الشرب هي مادة للتدقيق أو التحليل أو التصميم أو الدراسة. تصميم شبكة مياه هو المرحلة الحسابية حيث تحسب المتغيرات التي تجعل الشبكة أمرا واقعا, مثل أقطار الأنابيب، حجوم الخزانات، الخطوط المميزة للمضخات و السكور. التحليل هو مراجعة الأسس العلمية و التقنية التي اعتمد عليها في التصميم و قراءة مقارنة معمقة للنتائج الرقمية لمحاولة كشف و بيان اللامنطقي اعتمادا على خبرات سابقة. التدقيق و يعني مراجعة المراحل الأولية و التحضيرية و مرحلة التصميم، من أسس و نتائج، و دراسة الجدوى الاقتصادية للمشروع. دراسة مشروع و تشمل المرحلة الأولية حيث وضع المفاهيم العامة و المرحلة التحضيرية حيث يتم جمع البيانات و الزيارات الحقلية و مرحلة التصميم و مرحلة الإخراج للنتائج الحسابية و المخططات و المواصفات الفنية و مرحلة التدقيق، إضافة لمراجعة الملاحظات في مرحلة التنفيذ.

و نظرا لوجود مراجع للحساب الستاتيكي للشبكات، أعطيت الفسحة الأكبر لدراسة المطرقة المائية، مع بضع فسحات للحساب الديناميكي و التحليل النوعي.

نظام الجريان: Flow System

يسود نظام الجريان المستقر في المنظومات الهيدروليكية عند ثبات الحمولة؛ عدم تغير السحب في العقد مع الزمن، و ثبات إعدادات أجهزة التحكم بالغزارة أو الضاغط و استقرار عملها، و عند ظروف تشغيل مستقرة للمنظومة؛ أي عدم حدوث أعطال. في الجريان المستقر تكون الغزارات و الضواغط في أي مقطع ثابتان مع

الزمن. و عند حدوث تغير في الأحمال أو في إعدادات الأجهزة مع الزمن، أو تغير في ظروف التشغيل، يتحول الجريان المستقر إلى جريان غير مستقر، حيث تصبح الغزارة و الضاغط في أي مقطع تابعين للزمن.

تعريف ظاهرة المطرقة المائية: Water Hammer

تعرف أيضا بالجريان غير المستقر Unsteady Flow أو الجريان العابر Transient Flow و هي موجة ضاغط و غزارة تنشأ في المنظومات الهيدروليكية عند حدوث تغير لأي من مكونات المنظومة[11]. و أسباب هذا التغير كثيرة منها:

- إقلاع أو توقف مضخة اوعدة مضخات.
- إغلاق أو فتح سكور التحكم بالغزارة أو العزل.
- تغير سريع للسحب.
- إملاء أنبوب مائل باتجاه الجريان و بتدفق زائد.
- تفريغ الهواء من الأنابيب.
- انكسار أنبوب خصوصا أنابيب الضخ وتدفق الماء منه.

يقصد بالتغير السريع ان زمن التغير صغير مقارنة بالزمن اللازم للموجة للذهاب و الاياب. تتميز موجة المطرقة المائية بالبارامترات التالية: شدة الموجة، زاوية جبهة الموجة، و دور الموجة. يزداد خطر المطرقة المائية بازدياد شدتها و زاوية الجهة. وتزداد الشدة و زاوية الجبهة بزيادة معدل تغيرمكونات المنظومة بالنسبة للزمن.

على هذا فان الحالة الأخطر هي عند توقف مجموعة الضخ فجأة بانقطاع التيار الكهربائي الذي يغذيها، أو عدم فتح سكر إذا كان يدوي أو فشل فتح السكر من لوحة التحكم إذا كان كهربائي.

إن الظواهر التي يمكن أن تنتج عن المطرقة المائية هي من الخطورة بحيث يمكن أن تؤدي إلى انفجار الأنابيب و التجهيزات عليه، حيث يمكن أن يبلغ الضاغط عدة أضعاف الضغط الاسمي للأنابيب. أو يمكن أن تؤدي إلى انهيار الأنبوب إلى الداخل بظاهرة التحنيب. و في ابسط الحالات يؤدي انفجار الفقاعات الغازية والبخارية على

سطح الأنابيب أو التجهيزات إلى تآكل الأنابيب و التجهيزات و سوء في أداء المنظومة و خروجها عن العمل قبل انتهاء الفترة التصميمية.

و يزداد خطر ظاهرة المطرقة المائية عندما تترافق مع ظاهرة انفصال عمود الماء Water Column Separation و التي تحدث بسبب نشوء Cavitation تكهف غازي أو بخاري بسبب انخفاض الضاغط إلى قيم سالبة؛ إلى ضغط الاشباع و ضغط التبخر، في جزء من الأنابيب عند مرور الطور السالب من موجة المطرقة المائية ثم و عند مرور الطور الموجب، و لم تقم الوسادة الهوائية بدور التخميد بسبب اما الخروج السريع للهواء، و تحول الطاقة الحركية إلى طاقة ضغط، أو خروج بطيء للهواء و تفاعل الماء مع الهواء بظاهرة جريان ثنائي الطور معقدة، مما يؤدي إلى ضواغط تبلغ عدة أضعاف الضغط الاسمي للأنبوب. اضافة إلى أن الانتقال السريع من الضغوط السالبة إلى الضغوط الموجبة يؤدي إلى اجهادات ديناميكية عالية.

و يمكن أن تنشأ ظاهرة الطنين Resonance عندما تتقارب قيم تواترات الأحداث المسببة لظاهرة المطرقة المائية و قيم تواترات الإهتزاز الطبيعي للأنابيب المكونة للمنظومة الهيدروليكية، مما يؤدي إلى الإزدياد المستمر لسعة موجة الضاغط. و لقد أدت ظاهرة الطنين إلى حدوث إنفجارات في الأنابيب و التجهيزات عليها.

هذا إضافة إلى التأثيرالمتبادل بين الماء و جدار الأنبوب و التربة Water-Structure-Soil Interaction و التي يمكن أن تؤدي إلى زيادة صلابة الأنبوب و بالتالي زيادة شدة و زاوية جبهة موجة المطرقة المائية.

و بناءا على الأسس الهندسية و التكنيك الرياضي للطرق العددية التي تعالج ظاهرة الجريان غير المستقر من اجل نمذجة هذه الظاهرة، جرى تطوير خوارزميات لتحليل ظاهرة المطرقة المائية حاسوبيا اعتمادا على الطرائق الآتية:

1. - طريقة المميزات المحددة. Explicit Characteristic Method
2. - طريقة المميزات الضمنية. Implicit Characteristic Method
3. - طريقة الحجوم المحدودة. Finit Volume Method

دراسة مرجعية

إن ظاهرة المطرقة المائية و ما ترافقها من ظواهر و أحداث سلبية تتراوح من أصوات طرق تسيء إلى أداء المنظومات الهيدروليكية، و حدوث تحنيب في جدران الأنابيب بسبب الضغط السالب، إلى حدوث انفجارات في الأنابيب و التجهيزات عليها، شدت اهتمام الدارسين و الباحثين منذ القرن التاسع عشر.

في القرن التاسع عشر، قدم علماء و باحثون العديد من الدراسات و الأبحاث من بينها الدراسات النظرية و التجريبية التي قدمها العالم الروسي Joukowski عام 1897 و نشر تقريرا مميزا عن النظرية الأساسية للمطرقة المائية، و قدم علاقة تصف تغير الضاغط الناجم عن تغير مفاجئ في سرعة السائل اعتمادا على معادلتي إنحفاظ الطاقة و الاستمرار، و طور صيغة سرعة الموجة باعتبار مرونة السائل و مرونة جدران الأنبوب. ودرس انتشار أمواج الضاغط عبر الناقل و انعكاسها. و درس ظواهر الضغط السالب عند انخفاض الضغط و مدى فعالية خزانات الهواء المضغوط كوسيلة حماية، و بحث في آثار تغير معدل إغلاق السكر فوجد أن الضاغط يبلغ قيم كبيرة مقارنة بضاغط التشغيل إذا كان زمن الإغلاق أصغر من الزمن المميز للمنظومة.

طور أليفي Allievi النظرية العامة للمطرقة المائية اعتمادا على القانون الثاني لنيوتن و معادلة الاستمرار عام 1902 ، و بين أن الحد $v.(\partial v/\partial x)$ التسارع المكاني في معادلة الحركة صغير إذا ما قورن بالتسارع الزماني. واستنتج علاقة ارتفاع الضغط و انخفاضه عند إغلاق أو فتح منتظم لسكر و قدم جداول لقيم ارتفاع الضغط و انخفاضه، و درس الحركة الدورية لسكر و أثبت أن الضاغط في هذه الحالة لا يمكن أن يتجاوز مرتين قيمة الضاغط في الحالة الستاتيكية.

قدم العالم الفرنسي برجرون L.Bergeron عام 1932 حلا تخطيطيا ماهرا للمعادلات التفاضلية للمطرقة المائية التي وضعها أليفي. يعطي الحل التخطيطي فكرة

معمقة عن الطبيعة الهندسية لظاهرة المطرقة المائية، و استطاع برجرون إيجاد حلول تخطيطية لتمثيل الخطوط المميزة للعديد من التجهيزات الهيدروليكية، وقدم حلولا لمشاكل معقدة.

و تم تطوير العديد من العلاقات النظرية و التجريبية لحساب التغير في الضاغط نتيجة تغير في سرعة الجريان. و فيما يلي جدول بأهم العلاقات مع أسماء الباحثين الذين طوروا هذه العلاقات:

اسم صاحب العلاقة	العلاقة
Vensan	$h = \frac{2LV}{gT}$
Warren	$h = \frac{LV}{g(T - L/a)}$
Johnson	$h = \frac{LV_0}{2g^2 H_0 T_0}\left[LV_0 + \sqrt{2g^2H^2T^2 + L^2V_0^2}\ \right]$
Fanning	$h = \frac{LV}{gT}$
Tagoot	$h = 2.31V\sqrt{\frac{1}{1+kd/Ee}}\sqrt{\frac{Wk}{144g}}$
De Sparge	$h = \frac{2LV}{gT}\frac{1}{2[1-LV_0/2gTH_0]}$

حيث h التغير في الضاغط الناتج عن تغير في السرعة انطلاقا من سرعة أولية v. و نظرا للصعوبة الرياضية في إيجاد حلول تحليلية لمعادلات المطرقة المائية، منظومة معادلات الطاقة و الاستمرار و الشروط المحيطية، تم تطوير العديد من الطرق العددية و تطوير الخوارزميات المناسبة لحل مسائل المطرقة المائية حاسوبيا. من هذه الطرق العددية:

Method of Characteristics (MOC):Explicit & Implicit ، Finite Differences (FD)، Wave Characteristic Method (WCM)، Finite Elements (FE)، and Finite Volume (FV) : Explicit & Implicit ، FV First & second-order Godunov-Type Schemes (GTS)، Meshless Computation Method (MF).

و بحسب الطبيعة المتغيرة للجريان غير المستقر فان منظومة المعادلات الرياضية التي تصف سلوك المنظومة الهيدروليكية في الزمان و المكان هي معادلات تفاضلية جزئية –قطعية- لا خطية، تصف توابع تغير الضواغط و الغزارات على شكل أمواج تنتشر في الزمان و المكان. و بسبب الصعوبة الرياضية البالغة التي يواجهها الباحث عند التعامل مع حركة هذه الأمواج، تم اللجوء إلى طرق الحل العددية، و بسبب الطبيعة التقريبية لطرق الحل العددية، فإن لكل طريقة حل عددية ايجابيات و سلبيات. و ما زال العديد من الباحثين يطورون طرقا جديدة أو العمل على دمج عدة طرق لمحاولة تعزيز ايجابيات هذه الطرق و التخلص من سلبيات كل طريقة أو تهذيبها. و لذلك فإن إجراء مقارنة بين هذه الطرق يساعد على معرفة إمكانيات كل طريقة على اختصار زمن المعالجة و حجوم التخزين من جهة و على معالجة حالات شروط محيطية حرجة إضافة إلى ضمان الاستقرار الرياضي و التعامل بكفاءة عالية مع الظواهر غير المستقرة.

ملخص الكتاب

مطلع الكتاب مقدمة تشرح المفاهيم و المبادئ الأساسية في الدراسة الهيدروليكية لمنظوم نقل مياه الشرب.

يقدم الكتاب في الفصل الأول و الثاني لمفهومي تحليل و تصميم المنظومات الهيدروليكية، في الحالة الستاتيكية، حيث يتم تعريف مفهوم المنظومة الهيدروليكية و خصائصها الطبولوجية بكل مكوناتها، و وضع معادلات الاستمرار و الطاقة في حالة الجريان المستقر، إضافة إلى طرق التحليل و التصميم، و إيراد الأمثلة التوضيحية.

يقدم الفصل الثالث عرضا لمفاهيم وأسس الجريان غير المستقر؛ تعريف، تصنيف، واستنتاج المعادلات الناظمة للجريان غير المستقر والمعادلات الناظمة للجريان بشروط العمود الصلب والمعادلات الناظمة للجريان بشروط المطرقة المائية.

في الفصل الرابع يتم استنتاج نظرية العمود الصلب في الشبكات مع إيراد حالات دراسية.

يعطى الفصل الخامس شرحا لطريقة المميزات المحددة، يتم عرض المفاهيم و الأفكار الأساسية و تقديم التقنيات الرياضية اللازمة للانتقال من المعادلات التفاضلية إلى المعادلات الجبرية، و من ثم صياغة الشروط المحيطية لمعظم التجهيزات الهيدروليكية.

يعرض الفصل السادس المفاهيم و الأفكار الأساسية لطريقة المميزات الضمنية، و التقنيات الرياضية للانتقال إلى المعادلات الجبرية، و صياغة الشروط المحيطية.

أورد الفصل السابع أربع حالات دراسية لحل معادلات المطرقة المائية :

- حالة منظومة إسالة، عند إغلاق سريع لسكر التحكم.
- حالة منظومة ضخ، عند توقف مضخة.
- حالة منظومة شجرية، عند إغلاق سريع لسكر و توقف مضخة.

- حالة منظومة حلقية، عند إغلاق سريع لسكر و توقف مضخة.

بعد وصف الحالة يتم عرض نتائج تطبيق خوارزميتي طريقتي المميزات على شكل مخططات لمنسوبي الضاغط البيزومتري الأعظمي و الأصغري على بروفيل المشروع، و مخططات تطور قيم الضاغط البيزومتري مع الزمن عند مقاطع محددة من الأنبوب.

أعطى الفصل الثامن نتائج تطبيق خوارزميتي طريقتي المميزات على الحالات الدراسية، مع مناقشة هذه النتائج لكشف مزايا كل طريقة، دقتها، استقرارها الرياضي.

مقدمة: المفاهيم و المبادئ الأساسية

Fundamental Concepts and Principles

تعتمد الدراسة الهيدروليكية لأنظمة الأنابيب pipeline systems على مفاهيم concepts و مبادئ principles أساسية. و تقوم الدراسة على مفاهيم هيدروليكية مثل:

ρ الكتلة الحجمية للسائل, γ الوزن الحجمي للسائل, g تسارع الجاذبية،

الغزارة Q flow: كمية السائل (كتلة أو حجم) التي تمر من سطح المقطع العرضي لأنبوب في واحدة الزمن

السرعة الوسطية V velocity: الغزارة التي تمر من واحدة مساحة سطح المقطع العرضي لأنبوب. أي حاصل قسمة الغزارة على مساحة المقطع العرضي لأنبوب.

الضغط P pressure: القوة التي يضغط بها السائل على واحدة سطح الأنبوب.

الضاغط h head: الضغط مقدرا بارتفاع عمود السائل $h=P/\gamma$.

ضاغط السرعة velocity head: الطاقة الحركية لواحدة وزن السائل, $V^2/(2g)$.

الضاغط البيزومتري pressure head: طاقة الضغط لواحدة وزن السائل, P/γ.

ضاغط الموقع position head : الطاقة الكامنة لواحدة وزن السائل, بسبب ارتفاع مقطع عرضي من أنبوب قياسا لارتفاع صفري, z.

خط التدرج الهيدروليكي (المنسوب البيزومتري) HGL: هو مجموع: position head + pressure head.

خط تدرج الطاقة أو خط الطاقة EL: هو مجموع: HGL+velocity head.

ومبادئ أساسية:

- مبدأ الاستمرار continuity principle
- مبدأ الطاقة work-energy principle
- مبدأ كمية الحركة linear momentum principle.

I -1- **المبادئ الأساسية** Fundamental Principles:

I-1-1- **تعاريف**:

تابع الجريان Stream Function: يعد تابع الجريان ψ تعبير رياضي لوصف حقل الجريان. يمثل $\psi(x, y)$ خط تيار أو جريان و يمثل $d\psi$ الجريان المار بين خطي تيار و عليه يمكن كتابة ما يأتي:

$$d\psi = -vdx + udy \qquad \text{I.0}$$

يمكن التعبير عن المشتق الكلي $d\psi$ كما يأتي:

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x}dx + \frac{\partial \psi}{\partial y}dy \qquad \text{I.1}$$

من I.0 و I.1 يمكن كتابة:

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \qquad \text{I.2}$$

أي انطباق منحى السرعة (مسار الجريان) على مماس خط التيار.

تابع كمون السرعة Velocity Potential Function: يعرف تابع كمون السرعة $\Phi(x, y)$ في جريان ثنائي البعد في الإحداثيات الكارتيزية كما يأتي:

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; \quad u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \qquad \text{I.3}$$

و بمقارنة I.2 و I.3 يتبين تعامد خطوط التيار $\psi(x, y)$ مع خطوط كمون السرعة $\Phi(x, y)$.

يحقق تابع كمون السرعة معادلة لابلاس Laplace:

$$\frac{\partial 2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial 2\Phi}{\partial y^2} = 0 \qquad \text{I.4}$$

I-1-2- **المعادلات الأساسية** Basic Equations:

المبدأ الأول **إنحفاظ الكتلة**. و من أجل حجم تحكم ثابت Vo محاط بسطح تحكم محدد Su، يعطى مبدأ إنحفاظ الكتلة بالمعادلة:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{Vo} \rho dVo + \int_{Su} \rho \boldsymbol{v}.\boldsymbol{n}\, dSu = 0 \qquad \text{I.5}$$

حيث v سرعة السائل، n شعاع الوحدة الناظم على السطح Su، و t الزمن.

يمثل الحد الأول تراكم الكتلة مع الزمن في حجم التحكم، و الحد الثاني الغزارة المارة عبر سطح التحكم. و من أجل جريان مستقر بكثافة سائل ثابتة steady incompressible في أنبوب يُعطى إنحفاظ الكتلة مبدأ الاستمرار بالشكل الآتي:

$$Q = \int_A vdA = V_1A_1 = V_2A_2 \qquad \text{I.6}$$

حيث Q الغزارة الحجمية المارة عبر المقطع العرضي للأنبوب، V السرعة الوسطية عبر المقطع العرضي، A مساحة المقطع العرضي للأنبوب.

المبدأ الثاني **مبدأ الطاقة**، و يدعى معادلة برنولي Bernoulli equation، و من أجل جريان مستقر أحادي البعد نسبة لواحدة الوزن من السائل في أنبوب يكتب هذا المبدأ بين مقطعين بالشكل:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum h_{L(1-2)} - h_m \qquad \text{I.7}$$

حيث $V^2/2g$ ضاغط السرعة، p/γ الضاغط البيزومتري، Z ضاغط الموقع، أو الطاقة منسوبة لواحدة الوزن. $\sum h_L$ حد فاقد الضاغط بين مقطعين 1، 2. h_m طاقة ميكانيكية نسبة لواحدة الوزن مقدمة أو تؤخذ من السائل بواسطة آلة هيدروليكية. المعادلة I.7 هي معادلة برنولي بعد حذف الحدين $\sum h_L$ و h_m .

و تعرف الاستطاعة المقدمة أو المأخوذة من السائل، P، بأنها جداء الطاقة المقدمة أو المأخوذة نسبة لواحدة الوزن h_m، بالغزارة الوزنية $Q\gamma$، $P= Q\gamma h_m$.

المبدأ الثالث **مبدأ كمية الحركة الخطية**، و يعطى بالمعادلة:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{Vo} \rho\vec{v}dVo + \int_{Su}\vec{v}(\rho\vec{v}.\vec{n})dSu = \vec{F}_{net} = \vec{F}_s + \vec{F}_b \qquad \text{I.8}$$

حيث F_{net} القوة المؤثرة على محتوى حجم التحكم، و تقسم إلى قوى سطحية F_s و قوى حجمية F_b، و تساوي معدل تراكم كمية الحركة ضمن حجم التحكم زائدا معدل تدفق كمية الحركة عبر سطح حجم التحكم. و في حال الجريان المستقر الحد الأول يساوي الصفر. و من أجل جريان مستقر بكثافة سائل ثابتة أحادي البعد عبر أنبوب تصبح معادلة كمية الحركة كالآتي:

$$\vec{F}_{net} = \rho Q(V_2 - V_1) \qquad \text{I.9}$$

حيث V_2، V_1 سرعة السائل الوسطية عبر المقطع العرضي 1، 2.

بما أن المعادلة I.9 شعاعية، يمكن كتابتها في حال الجريان ثنائي البعد في المستوي x-y ، و ثبات المقطع، بدلالة المركبات:

$$\sum F_x = (\rho Q V_x)_2 - (\rho Q V_x)_1 = (\rho A V_x^2)_2 - (\rho A V_x^2)_1 \qquad \text{I.10 a}$$

$$\sum F_y = (\rho Q V_y)_2 - (\rho Q V_y)_1 = (\rho A V_y^2)_2 - (\rho A V_y^2)_1 \qquad \text{I.10 b}$$

مجموع برنولي هو خط تدرج الطاقة EL ، مجموع حدود معادلة الطاقة:

$$EL = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \qquad \text{I.11}$$

I-2- علاقات فاقد الضاغط:

حد فاقد الضاغط في العلاقة I.7 يمثل ظاهرتين للسوائل الحقيقية، فاقد ضاغط بسبب قوة قص السائل على جدار الأنبوب و يحدث على طول الأنبوب و يدعى فاقد احتكاك الأنبوب، و فاقد ضاغط و يدعى فواقد محلية أو فواقد صغرى، يحدث بسبب وجود قطع متممة أو قطع ملحقة

I-2-1- فاقد احتكاك الأنبوب:

باختيار حجم تحكم اسطوانة صغيرة ضمن أنبوب بإحداثي s باتجاه الجريان و r قطريا بحالة جريان مستقر، و بتطبيق معادلة كمية الحركة 2.4، ينتج إجهاد قص السائل الوسطي τ كتابع لإحداثي r من الخط المركزي للأنبوب بالعلاقة الآتية:

$$\tau = -\frac{r}{2}\gamma \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{p}{\gamma} + z\right) \qquad \text{I.12}$$

بتوسيع حجم التحكم ليملئ الأنبوب، و التكامل على طول L من الأنبوب، تنتج علاقة تربط فاقد الضاغط بالاحتكاك h_L باجهاد القص على جدار الأنبوب τ_w كما يأتي:

$$\tau_w = \gamma h_L \frac{D}{4L} \qquad \text{I.13}$$

I-2-2- معادلة دارسي – وايسباخ Darcy-Weisbach equation:

بوضع علاقة تابعية (τ_w=F(V,D,e,ρ, μ تربط اجهاد القص على الجدار τ_w و الغزارة الوسطية V، قطر الأنبوب D، كثافة السائل ρ، اللزوجة μ، الخشونة المكافئ e، اعتمادا على التحليل البعدي كما يأتي:

$$\frac{\tau_w}{\rho V^2} = F\left(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{e}{D}\right) = \frac{f}{8} \qquad \text{I.14}$$

من المعادلتين I.13 و I.14 تنتج معادلة دارسي – وايسباخ:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad \text{I.15}$$

حيث f تابع لعدد رينولدز Re=VDρ/μ ، و الخشونة المكافئة النسبية e/D.

يمكن توضيح الصيغ المختلفة للتابع f حسب نوع الجريان بالجدول (1) التالي:

نوع الجريان Type of Flow	معادلة f Equation for f	المجال Range
صفحي Laminar	$f = 64/Re$	Re<2100
أنابيب ناعمة Smooth pipe	$1/\sqrt{f} = 2log_{10}(Re.\sqrt{f}) - 0.8$	Re>4000 & e/D→0
معادلة كولبروك- وايت الانتقالية Transitional Colebrook-White.	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2log_{10}\left(\frac{e}{D} + \frac{9.35}{Re.\sqrt{f}}\right)$	Re>4000
خشونة كاملة Wholly Rough	$1/\sqrt{f} = 1.14 - 2log_{10}(e/D)$	Re>4000

جدول(1) f تابع لنوع الجريان

I-2-3- **المعادلات التجريبية لفاقد الضاغط**:

معادلة هازن-ويليامز Hazen-Williams Equation :

$$Q = 0.849\, C_{HW}\, A\, R^{0.63} S^{0.54} \quad \text{SI unit} \qquad \text{I.16}$$

حيث C_{HW} معامل خشونة هازن-ويليامز، $S=h_f/L$ ميل خط الطاقة، R=A/P نصف القطر الهيدروليكي ، A مساحة المقطع العرضي للأنبوب، P المحيط المبلول.

معادلة مانينغ Manning Equation :

$$Q = \frac{1}{n}\, A\, R^{2/3} S^{0.5} \quad \text{SI unit} \qquad \text{I.17}$$

حيث n معامل خشونة مانينغ.

معادلة هازن-ويليامز، معادلة مانينغ، هي معادلات تجريبية بمجال تطبيق محدود، كلا المعادلتين تصح في حالة الجريان المضطرب، و تقابل معادلة مانينغ الجريان بخشونة كاملة.

I-2-4- **الصيغ الأسية** لمعادلات فاقد الضاغط Exponential Formula:

يفيد وضع معادلات فاقد الضاغط بصيغة أسية أثناء إجراء الحسابات الهيدروليكية في الشبكات حيث يوضع فاقد الضاغط كتابع للغزارة بالشكل التالي:

$$h_f = kQ^n \qquad \text{I.18}$$

حيث n،k تحددان حسب الجدول (2) التالي:

معادلة فاقد الضغط	k	n
معادلة دارسي-وايسباخ	$8fL/(g\pi^2D^5)$	2
معادلة هازن-ويليامز	$10.67L/(C_{HW}^{1.852}D^{4.87})$	1.852
معادلة مانينغ	$10.29n^2L/D^{5.33}$	2

جدول (2) قيم k، L(m) ، n، D(m))

I-2-5- **الفواقد المحلية و الصغرى** Local and Minor Losses :

تنتج الفواقد المحلية بسبب تغير أو اضطراب local disruption في خطوط الجريان streamline تحدث بسبب وجود قطع متممة أو قطع ملحقة مثل الأكواع و النقاصات و التيهات و السكور. عادة هذه الفواقد صغيرة مقارنة بفاقد الضاغط بالاحتكاك، و يمكن إهمالها في مرحلة التصميم. لكن تأخذ هذه الفواقد أحيانا قيما كبيرة نسبيا كما في حال سكر مفتوح جزئيا.

يتم التعبير عادة عن الفواقد المحلية بدلالة ضاغط السرعة كما يأتي:

$$h_L = k_L \frac{V^2}{2g} \qquad \text{I.19}$$

حيث $V=Q/A$ السرعة الوسطية بعد القطع المتممة، k_L معامل تجريبي يتعلق بالقطعة المتممة أو الجهاز الهيدروليكي.

تسب بعض القطع المتممة أو الأجهزة الهيدروليكية تسريع محلي للسائل أو تباطؤ أو انفصال للتيار عن جدار الأنبوب، و فاقد الضاغط بسبب تباطؤ التيار أو انفصال التيار عن جدار الأنبوب أكبر من فاقد الضاغط بسبب تسريع التيار.

I-3- **المضخات و الخطوط المميزة** Pump Theory and Characteristics:

تقدم المضخة طاقة أو ضاغط ميكانيكي h_p لواحدة الوزن من السائل. ففي المضخة الدوارة rotating pumps يقدم الدافع impeller الطاقة بزيادة الضاغط الحركي للسائل المار عبرها. تدعى الطاقة المضافة الضاغط الصافي h_p. و تحسب الاستطاعة المقدمة للسائل بالعلاقة $P_w=Q\gamma h_p$ حيث Q الغزارة، γ الوزن الحجمي للسائل. أما الطاقة المقدمة للمضخة brake horsepower فتحسب بالعلاقة $bhp=T\omega$ حيث T عزم الدوران، ω سرعة الدوران. عند التصميم يجب اختيار المضخات بحيث تكون نقطة

التصميم design point ،الناتجة من تقاطع الخط المميز للأنبوب و الخط المميز للمضخة، ضمن مجال المردود الأعظمي للمضخة.

يوصف عمل المضخة بأربعة خطوط مميزة تصف الضاغط، الاستطاعة، المردود، و ضغط المقطع الموجب الصافي NPSH كتوابع للغزارة، سرعة الدوران، و قطر المضخة. بسبب نقص المعطيات عن عمل المضخات في كافة الشروط، يستخدم عند التصميم إضافة إلى الخطوط المميزة علاقات التشابه affinity laws، للمضخات المتشابهة homologous هندسيا و حركيا. تعطى علاقات التشابه للضاغط و الغزارة و الاستطاعة لمضختين متشابهتين مع اختلاف القطر و سرعة الدوران:

$$(\frac{h_p}{N^2D^2})_1 = (\frac{h_p}{N^2D^2})_2;\ (\frac{Q}{ND^3})_1 = (\frac{Q}{ND^3})_2\ ;\ (\frac{P}{\rho N^3D^5})_1 = (\frac{P}{\rho N^3D^5})_2 \qquad \text{I.20}$$

تميز السرعة النوعية specific speed N_s المضخات المتشابهة و تعطى بالعلاقة:

$$N_S = \frac{NQ^{1/2}}{(gh_p)^{3/4}} \qquad \text{I.21}$$

و يمكن باستخدام السرعة النسبية تصنيف المضخات حسب الجدول (3):

المضخات النابذة Radial Flow	المضخات المختلطة Mixed Flow	المضخات المحورية Axial Flow
N_S<1.46	N_S<3.7> 1.46	N_S>3.7

جدول (3) تصنيف المضخات بحسب السرعة النوعية

يحدد NPSH الضاغط الواجب توفره عند مدخل المضخة بحيث يمكن تجنب التكهف (تحول السائل إلى غاز) الذي يسبب الضجيج و تآكل معدن المضخة. يحسب NPSH من العلاقة:

$$NPSH_a = \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} - h_L - z \qquad \text{I.22}$$

حيث p_{atm} الضغط الجوي، p_v ضغط البخار، h_L الفاقد على أنبوب الدخول، z المسافة الشاقولية بين سطح الماء و محور مدخل المضخة.

و لكي لا يحصل التكهف يجب أن يكون $NPSH_a$ المتوفر عند مدخل الضخة المحسوب بالعلاقة I.22 أكبر من القيمة التي تؤخذ من المنحني المميز $NPSH_r$.

من أجل استخدام المنحنيات المميزة للمضخات حاسوبيا، يزود الحاسب بمجموعة نقاط من المنحنيات المميزة، ثم يمكن إيجاد معادلة كثير حدود لتمثيل المنحني المميز.

فإذا زود الحاسب بثلاث نقاط (hp3،hp2; Q3،hp1; Q2،Q1)، يمكن إيجاد معادلة كثير حدود من الدرجة الثانية $h_p=AQ^2+BQ+C$. بتعويض النقاط الثلاثة في معادلة الدرجة الثانية ينتج ثلاث معادلات يمكن وضعها بصيغة مصفوفة و حلها لإيجاد ثوابت المعادلة، كالتالي:

$$\begin{bmatrix} Q_1^2 & Q_1 & 1 \\ Q_2^2 & Q_2 & 1 \\ Q_3^2 & Q_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} h_{p1} \\ h_{p2} \\ h_{p3} \end{Bmatrix}$$

و يمكن إذا زود الحاسب بثلاث نقاط استخدام استقراء لاغرانج لاستقراء نقاط إضافية كالتالي:

$$h_p = \frac{(Q-Q_2)(Q-Q_3)}{(Q_1-Q_2)(Q_1-Q_3)}\, h_{p1} + \frac{(Q-Q_1)(Q-Q_3)}{(Q_2-Q_1)(Q_2-Q_3)}\, h_{p2} + \frac{(Q-Q_1)(Q-Q_2)}{(Q_3-Q_1)(Q_3-Q_2)}\, h_{p3} \qquad \text{I.23}$$

الفصل الأول

تحليل شبكات مياه الشرب

1-1- تحديد منظومة الأنابيب

2-1- العلاقة الأساسية بين مكونات الشبكة

3-1- معادلات الجريان المستقر في الشبكة

4-1- منظومة معادلات الغزارة Q-equations

5-1- منظومة معادلات الضاغط H-equations

6-1- منظومة معادلات تصحيح الغزارة ΔQ-equations

7-1- خوارزمية التدرج Gradient Algorithm

8-1- حل معادلات الشبكة:طريقة نيوتن.

تحليل شبكات مياه الشرب

Pipe Networks Analysis

1-1- **مقدمة**:

المنظومة الهيدروليكية أو شبكة مياه الشرب هي مجموعة من أنابيب، خزانات، سكورة تحكم بالغزارة و الضاغط، مضخات، توصل معا بحيث تؤمن الغزارة المطلوبة بالضاغط المناسب. من اجل دراسة شبكة يلزم وضع المعادلات الناظمة لسلوك مكونات الشبكة، و يتم ذلك اعتمادا على مبادئ ميكانيك السوائل.

تشكل المبادئ الأساسية لميكانيك السوائل[8] أساسا للحصول على المعادلات الناظمة لسلوك المنظومة الهيدروليكية و هذه المبادئ هي:

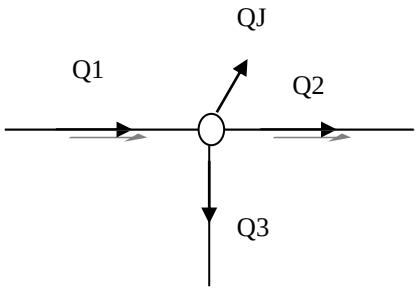
1- مصونية الكتلة، أو مبدأ الاستمرار.

2- مصونية العمل – الطاقة.

3- العلاقة بين لزوجة السائل و تبديد الطاقة.

اعتمادا على هذه المبادئ يتم استنتاج **معادلات الاستمرار و معادلات الطاقة**.

- معادلات الاستمرار: يوضح الشكل 1-1 مفهوم معادلة الاستمرار.



الشكل 1-1 ؛ معادلة الاستمرار

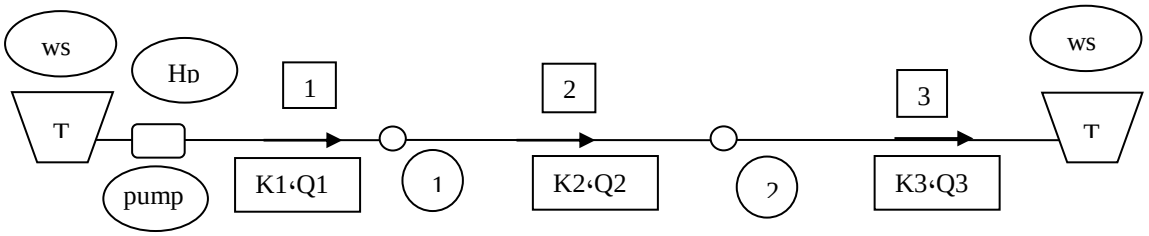
$$\sum Q_I - QJ = 0 \Rightarrow Q1 - Q2 - Q3 - QJ = 0 \qquad 1\text{-}1$$

حيث QJ : السحب عند العقدة، Q_I : الغزارة في الأنابيب I=1,2,3.

- معادلات الطاقة: يوضح الشكل 1-2 مفهوم معادلة الطاقة.

$$\sum h_{f_I} - hp = \Delta WS \Rightarrow \sum K_I Q_I^n - hp = \Delta WS \qquad 1\text{-}2$$

h_f : الفاقد ، Q_I: الغزارة، ΔWS :فرق المنسوب بين الخزانين، hp :ضاغط المضخة.



الشكل 1-2 ؛ معادلة الطاقة

يظهر الشكل 1-2 مضخة نضخ غزارة Q1 بضاغط P_p من خزان بمنسوب سطح ماء ws1 إلى خزان بمنسوب سطح ماء ws2 عبر منظومة أنابيب 1و2و3 .

و غاية التحليل هي تطبيق هذه المعادلات وحلها لوصف السلوك الهندسي للمنظومات الهيدروليكية بشكل دقيق و فعال.

في مسائل تحليل شبكات مياه الشرب، تعطى جميع الخواص الفيزيائية للشبكة، و تكون غاية حل المعادلات تحديد الغزارات في الأنابيب و الضواغط في العقد. و لذلك في مسائل التحليل تكون البيانات المعروفة هي: أماكن و خصائص الأنابيب (أقطار– أطوال – معامل الخشونة)، و أماكن والخطوط المميزة للخزانات – المضخات – سكورة كسر الضغط – و القطع الخاصة على الشبكة. و الفهم المتكامل لتقنيات تحليل الشبكات الكبيرة المؤلفة من مكونات معروفة الخواص الفيزيائية هو أساس لفهم كيفية تصميم الشبكات.

عند تحليل الشبكات تنشأ مسائل رياضية معقدة حتى بالنسبة للمدن الصغيرة، حيث أن معظم المعادلات هي معادلات لا خطية يلزم لحلها طرق عددية تقريبية.

و مع أن الكمبيوتر يسهل كثيرا حل مسائل الشبكات الكبيرة، فانه من الأفضل للمهندس أن يفهم ما يقوم به الكمبيوتر أثناء عملية الحل.

1-2- تحديد منظومات الأنابيب:

الخطوة الأولى في تحليل منظومة أنابيب هي تحديد أي المكونات و الخصائص المهمة ذات الفعالية للاحتفاظ بها أثناء تعريف الشبكة. و منه نشأ مفهوم Skeletonization - أثناء عملية التحليل – و يعني اعتبار مكونات الشبكة ذات التأثير الهيدروليكي الفعال و الكبير على نظام الجريان و أداء الشبكة.

يمكن للتحليل أن يشمل الأنابيب الرئيسية للشبكة و التي تعتبر ذات أهمية في تشغيل المنظومة، مثلا الأنابيب الناقلة التي تنقل المياه من المصدر إلى مناطق الطلب الرئيسية. أو أن يشمل كافة المكونات نزولا حتى الوصلات المنزلية.

العنصر الثاني المهم أثناء تحليل الشبكة هو تحديد كمية و موقع السحوبات عند نهاية الفترة التصميمية. و هو عنصر من الصعب تحديده بدقة. و يتم التحليل عادة لطيف واسع من السحوبات من الساعية العظمى حتى الصغرى. خلال أوقات السحب ما فوق الوسطي ستتقدم الخزانات الماء الذي خزنته عندما تكون السحوبات صغيرة.

يتم التحليل عادة على شبكات موجودة مسبقا مع حصول بعض التوسعات ليتم معرفة هل ستفي الشبكة الحالية بالمتطلبات المستجدة من سحوبات و ضواغط. بعد عملية التحليل تجري عملية التحقق و التي تتم بقياسات واقعية لمعرفة مدى تطابق حلول المسألة الرياضية مع المنظومة الحقيقية.

بعد إجراء التحليل و تقديم حلول لسحوبات مختلفة، يمكن تحديد المتحولات ذات الأداء السيئ، و يحدد سوء الأداء كالتالي:

1- الضواغط عند بعض العقد منخفض جدا أو مرتفع جدا.
2- السحوبات غير مناسبة و الضواغط لا تكفي لتحقيق السحب الطارئ.
3- المضخات لا تعمل في حدود الكفاءة العظمى.
4- بعض الخزانات تبقى دائما فارغة و خزانات أخرى دائما مليئة.
5- سكورة التحكم بالضغط غير فعالة.

بعد تحديد المشكلة على المهندس أن يقترح الحل الأمثل فنيا الأكثر اقتصادية للتغلب على المشكلة و تحسين أداء النظام.

1-3- العلاقة الأساسية بين مكونات الشبكة:

عند تحليل منظومة هيدروليكية ، يتم وضع معادلات استمرار و معادلات الطاقة. يعتمد اختيار المعادلات المناسبة على المتحولات المجهولة المطلوب ايجادها، الضواغط أم الغزارات ، يتم بعدها ايجاد بقية المجاهيل من معادلات الفاقد. يرتبط اختيار المعادلات بوجود علاقات طبولوجية تربط عدد الأنابيب، عدد العقد، و عدد الحلقات المستقلة (الأولية). تنتج هذه العلاقات الطبولوجية من نظرية البيانات، Graph Theory. إحدى هذه العلاقات هي علاقة اويلر التالية:

$$NP = NJ + NE + NL - 1 \qquad 1\text{-}3$$

حيث: NP عدد الأنابيب, NJ عدد عقد التفرع, NE عدد عقد الطاقة, NL عدد الحلقات.

تشير المعادلة 1-3 إلى أن عدد متحولات الغزارة ، الذي يساوي عدد الأنابيب، يساوي عدد معادلات الاستمرار عند العقد، زائد عدد معادلات الطاقة في الحلقات الأولية، زائد عدد معادلات الطاقة على المسارات بين الخزانات. و بالتالي عند حل هذه المعادلات يتم الحصول قيم لمتحولات الغزارة، و استخدام علاقة الفاقد لمعرفة قيم الضواغط.

1-4- معادلات الجريان المستقر في الشبكة:

يمكن تطوير عدة منظومات مختلفة من المعادلات[3] و ذلك من أجل مسائل تحليل الشبكات. تسمى هذه المنظومات بحسب المتغيرات التي تشكل المجاهيل الرئيسية.

معادلات الغزارات Q-equations: الغزارات في الأنابيب هي المجاهيل الرئيسية.

معادلات الضواغط H-equations: الضواغط في العقد هي المجاهيل الرئيسية.

معادلات تصحيح الغزارات ΔQ-equations: تصحيح الغزارات مجاهيل رئيسية.

خوارزمية التدرج Gradient algorithm: الغزارات و الضواغط مجاهيل رئيسية.

1-5- منظومة معادلات الغزارة Q-equations:

يعتمد تحليل الشبكة على معادلات الاستمرار و الطاقة بصياغتها بدلالة الغزارات.

معادلات الاستمرار:

$$QJ_J - \sum Q_I = 0 \qquad 1\text{-}4$$

حيث QJ_J: السحب عند العقدة J، Q_I: الغزارة في الأنابيب I المرتبط بالعقدة J.

معادلات الطاقة:

$$\sum h_{f\,I} = \Delta WS \Rightarrow \sum K_I Q_I^n = \Delta WS \qquad 1\text{-}5$$

h_f الفاقد، Q_I: الغزارة، K_I: ثابت الأنبوب، ΔWS: فرق المنسوب بين الخزانين.

يمكن إعادة صياغة معادلات الطاقة لتصبح خطية و الحل بالطريقة الخطية.

1-6- منظومة معادلات الضاغط H- equations:

إن معادلات H-equation هي معادلة الاستمرار في العقد:

$$QJ_J - \sum \left\{ \left[(H_I - H_J)/K_{IJ} \right]^{\frac{1}{n_{IJ}}} \right\}_{in} + \sum \left\{ \left[(H_J - H_I)/K_{IJ} \right]^{\frac{1}{n_{IJ}}} \right\}_{out} = 0 \qquad 1\text{-}6$$

حيث H_I: الضاغط في العقدة I ، H_J: الضاغط في العقدة J، K_{IJ}: ثابت الأنبوب IJ ، QJ_J: السحب عند العقدة J.

1-7- منظومة معادلات تصحيح الغزارة ΔQ-equations:

هي معادلات الطاقة للحلقات الحقيقية و الوهمية(مسار بين خزانين).

$$\sum K_I \left\{ Q_{OI} \pm \sum \Delta Q_K \right\}^{n_I} = 0 \qquad \text{للحلقات الحقيقية(الأولية)} \qquad 1\text{-}7$$

$$\sum K_I \left\{ Q_{OI} \pm \sum \Delta Q_K \right\}^{n_I} = \Delta WS \qquad \text{للحلقات الوهمية} \qquad 1\text{-}8$$

حيث ΔQ_K: تصحيح الغزارة في الحلقة، Q_{0I}: الغزارة في الأنبوب I، ΔWS فرق المنسوب بين خزانين، K_I: ثابت الأنبوب I .

و عند إضافة أجهزة تحكم تُضاف معادلة المنحني المميز للجهاز المضاف.

1-8- **طريقة خوارزمية التدرج** Gradient Algorithm**:**

لتكن شبكة معرفة كما يلي:

N عقدة ضاغط مجهول، P أنبوب بغزارة مجهول،

B عقدة ضاغط محيطي أو ثابت،

يمكن التعبير عن توبولوجيا الشبكة بدلالة المصفوفتين:

مصفوفة الضواغط المجهولة (P*N) $A_{12} = A_{21}^T$

و مصفوفة الضواغط الثابتة (P*B) $A_{10} = {A_{01}}^T$

يستخدم المصطلح التالي لتعيين عناصر المصفوفة A_{12} :

$$A_{12}(i,j) = 1,0,-1 \qquad \text{(P*N)}$$

(1 اذا انتهى الأنبوب i في العقدة j, 1- اذا ابتدأ في العقدة j, 0 اذا لم يتصل بالعقدة j)

تُعطى الضواغط في العقد المحيطية (عقد طاقة) بالشعاع H_f :

$${H_f}^T = [H_{f1}, H_{f2}, \dots, H_{fB}] \qquad \text{(1*B)}$$

يُعبر عن تابع الفاقد أو الربح في الضاغط بتوابع لاخطية بالشعاع F :

$$F^T(Q) = [f_1, f_2, \dots, f_P] \qquad \text{(1*P)} \quad \text{where } f_i = f_i(Q_i)$$

تستخدم هذه المصفوفات لحساب مصفوفات المجاهيل الغزارات و الضواغط.

شعاع الغزارات المجهولة في الأنابيب Q :

$$Q^T = [Q_1, Q_2, \dots, Q_P] \qquad \text{(1*P)}$$

شعاع الضواغط المجهولة في العقد H :

$$H^T = [H_1, H_2, \dots, H_P] \qquad \text{(1*N)}$$

باستخدام مصفوفات المتغيرات و المصفوفات الطوبولوجية يمكن صياغة معادلات مصفوفية عامة اعتمادا على معادلات حفظ الطاقة و الكتلة:

$$A_{12}H + F(Q) = -A_{10}H_f$$

$$A_{12}Q = q \qquad \text{1-9}$$

عند اختيار تابع هازن-وليامز لحساب فاقد الضاغط، يمكن استخدام المصفوفة القطرية التالية التي عناصرها معاملات تغير الضاغط:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} R_1|Q_1|^{n_1-1} & & & \\ & R_2|Q_2|^{n_2-1} & & \\ & & & \\ & & & R_p|Q_p|^{n_p-1} \end{bmatrix}$$

بالتالي تصبح المعادلات المصفوفية:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_f \\ q \end{bmatrix} \qquad 1\text{-}10$$

لحل جملة المعادلات اللاخطية، يمكن الاستفادة من طريقة نيوتن-رافسون التكرارية بمفاضلة طرفي المعادلات بالنسبة Q،H، ينتج:

$$\begin{bmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -dE \\ dq \end{bmatrix} \qquad 1\text{-}11$$

حيث:

$$N = \begin{bmatrix} n_1 & & & \\ & n_2 & & \\ & & & \\ & & & n_p \end{bmatrix}$$

بحل المعادلات تنتج صيغ علاقة عودية في الخطوة k من الحل التكراري:

$$H^{k+1} = -(A_{21}N^{-1}\,{A_{11}}^{-1}A_{12}\,)^{-1}\{A_{21}N^{-1}\left(Q^k + {A_{11}}^{-1}A_{10}H_f\right) + (q - A_{21}Q^k)\}$$

$$Q^{k+1} = (1 - N^{-1})Q^k - \,N^{-1}{A_{11}}^{-1}\,(\,A_{12}H^{k+1} + A_{10}\,H_f)$$

أثناء استنتاج العلاقات العودية، استخدمت تقنية المصفوفة المجوفة sparse matrix.

Global gradient algorithm (GGA) : How to solve for the pressure dependent demand. Conventionally, nodal demand is a known value. Applying the mass conservation law to each node and energy conservation law to each loop, the network hydraulics solution can be obtained by iteratively solving a set of linear and non-linear equations. A unified formulation for solving network hydraulics is given as a global gradient algorithm (GGA).

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_0 \\ -q \end{bmatrix}$$

Where *Q* is the unknown pipe discharge and *H* is the unknown nodal head. *q* is the set of nodal demand that is not dependent on the nodal head *H*.

For pressure dependent demand, the demand is no longer a known value but a function of nodal pressure. The solution matrix becomes:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_0 \\ -q \end{bmatrix}$$

A new diagonal matrix A_{22} is added to the solution matrix. The non-zero diagonal element is given as

$$A_{22}(i,i) = Q_i^s$$

Direct GGA Solution : An alternative solution method is to directly apply GGA as derived but move the pressure dependent demand term to the right

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_0 \\ -A_{22}H - q \end{bmatrix}$$

This method require no matrix modification of original GGA, but the program will update the nodal demand according to the pressure head of the left side of the matrix.

Modified GGA Solution : By following the original derivation of GGA, pressure dependent demand formula can be solved as:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & A_{12} \\ A_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE \\ dq \end{bmatrix}$$

The difference from the original GGA is the new diagonal matrix D22, which is the deviation of A22 of pressure head H.

$$D_{22}(i,i) = \begin{cases} 0 & P_i^s \le 0 \\ \alpha(\frac{H_i}{P_i})^{\alpha-1} * Q_i & 0 < P_i^s < P \\ 0 & P_i^s \ge P \end{cases}$$

The modified GGA is to calculate D22 for each pressure dependent demand node and add at A(i, i) as follows:

$A(i,i) = \sum_j p_{ij} \; - D_{22}$(I,i) , where the pipe j is connected with node i.

1-9- حل معادلات الشبكة:

طريقة نيوتن NEWTON METHOD[16]**:** إن منظومة معادلات تحليل شبكات مياه الشرب هي مزيج من المعادلات الخطية و غير الخطية. و تُعتبر طريقة نيوتن إحدى الطرق العددية للحل. لتطبيق طريقة نيوتن العددية لحل إحدى المنظومات التالية:

Q-equations، H-equations، ΔQ-equations بطريقة موحدة، يرمز للمجهول الرئيسي بالشعاع {x}.

إن علاقة نيوتن التكرارية لحل منظومة معادلات تكتب بالشكل التالي:

$$\{x\}^{(m+1)} = \{x\}^{(m)} - [D]^{-1}\{F\}^{(m)} \qquad 1\text{-}12$$

حيث {x} هو شعاع المجاهيل، {F} شعاع المعادلات ، $[D]^{-1}$ مقلوب المصفوفة [D] وهي الجاكوبيان.

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & . & . & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & . & . & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & . & . & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad \{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ . \\ . \\ x_n \end{Bmatrix} \quad , \{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ . \\ . \\ F_n \end{Bmatrix}$$

تنشر المعادلة F_i بسلسلة تايلور متعدد الأبعاد بجوار القيمة الأولية للحل و التي يفترض أن تكون قريبة من الحل الفعلي:

$$F_1^{m+1} = F_1^m + \frac{\partial F_1}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial F_1}{\partial x_2}\Delta x_2 + ... + \frac{\partial F_1}{\partial x_n}\Delta x_n + O(\Delta x^2) = 0$$

$$F_2^{m+1} = F_2^m + \frac{\partial F_2}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial F_2}{\partial x_2}\Delta x_2 + ... + \frac{\partial F_2}{\partial x_n}\Delta x_n + O(\Delta x^2) = 0$$

.....

$$F_n^{m+1} = F_n^m + \frac{\partial F_n}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial F_n}{\partial x_2}\Delta x_2 + .. + \frac{\partial F_n}{\partial x_n}\Delta x_n + O(\Delta x^2) = 0 \qquad 1\text{-}13$$

باستخدام الشكل المصفوفي و استخدام التبديل $\Delta x_i = x_i^{(m+1)} - x_i^{(m)}$ تصبح منظومة المعادلات بالشكل:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ . \\ . \\ F_n \end{Bmatrix}^{(m)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & . & . & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & . & . & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & . & . & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1^{(m+1)} - x_1^{(m)} \\ x_2^{(m+1)} - x_2^{(m)} \\ . \\ . \\ x_n^{(m+1)} - x_n^{(m)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \\ \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad 1\text{-}14$$

و التي يمكن أن تكتب بالشكل:

$$\{F\}^{(m)} + [D]^{(m)}\left(\{x\}^{(m+1)} - \{x\}^{(m)}\right) = \{0\} \qquad 1\text{-}15$$

التي تحل بدلالة $x_i^{(m+1)}$ للحصول على علاقة نيوتن.

مثال: حل الشبكة التالية، الشكل 1-3، باستخدام المنظومات الثلاثة.

Pipe	K	n
1	7.59	1.936
2	9.63	1.901
3	48.6	1.882
4	39.7	1.768
5	16.5	1.935

Node	Demand
1	1
2	1.5
3	0.8

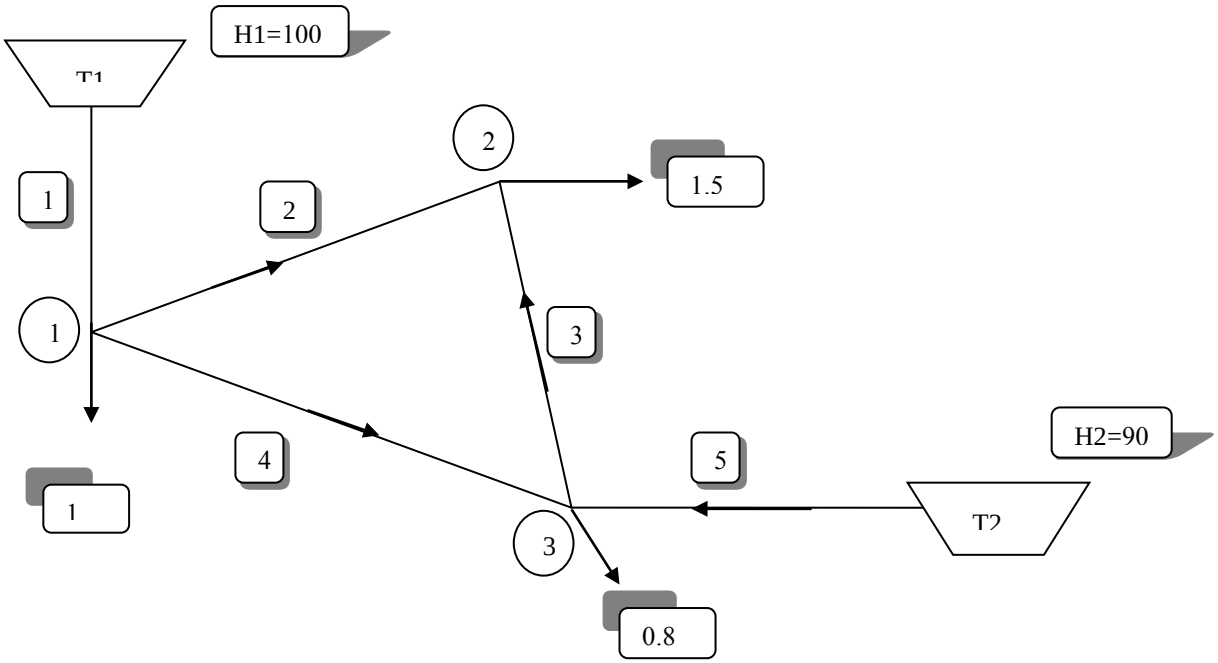
Tank	El
T1	100
T2	90

الجدول 1-1

ثابتا الأنابيب، السحب في العقد، مناسيب الخزانات.

منظومة هيدروليكية تتألف من خزانين T1 و T2 و 5 أنابيب و 3 عقد تفرع.

يبين الجدول 1-1 معطيات الشبكة؛ k ثابت الانبوب، n اس معادلة الفاقد.



الشكل 1-3

***- معادلات Q-equations:**

معادلة الاستمرار في العقدة -1-:

$$F_1 = Q_1 - Q_2 - Q_4 - 1.0 = 0$$

معادلة الاستمرار في العقدة -2-:

$$F_2 = Q_2 + Q_3 - 1.5 = 0$$

معادلة الاستمرار في العقدة -3-:

$$F_3 = Q_4 - Q_3 + Q_5 - 0.8 = 0$$

معادلة الطاقة بين الخزانين:

$$F_4 = K_1 Q_1^{n_1} + K_4 Q_4^{n_4} - K_5 Q_5^{n_5} - 10 = 0$$

معادلة الطاقة في الحلقة:

$$F_5 = K_2 Q_2^{n_2} - K_3 Q_3^{n_3} - K_4 Q_4^{n_4} = 0$$

حيث Q_i ، K_i الغزارة و ثابت الانبوب i ؛ i=1-4، و n الاس في معادلة فاقد الطاقة.

و بحل هذه المعادلات بطريقة نيوتن حيث يأخذ الجاكوبيان الشكل:

$$[D]=\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ n_1K_1Q_1^{n_1-1} & 0 & 0 & n_4K_4Q_4^{n_4-1} & -n_5K_5Q_5^{n_5-1} \\ 0 & n_2K_2Q_2^{n_2-1} & -n_3K_3Q_3^{n_4-1} & -n_4K_4Q_4^{n_4-1} & 0 \end{bmatrix}$$

يتم الحصول على قيمة الغزارات بدقة 0.0001 في المحاولة الثالثة.

$$\{Q\}^{(0)}=\begin{Bmatrix} 2.0 \\ 0.9 \\ 0.6 \\ 0.1 \\ 1.3 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{Q\}^{(3)}=\begin{Bmatrix} 2.1191 \\ 1.0583 \\ 0.4417 \\ 0.0608 \\ 1.1809 \end{Bmatrix}$$

يمكن إعادة صياغة هذه المعادلات بالطريقة الخطية كمايأتي:

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ K_1^{'} & 0 & 0 & K_4^{'} & -K_5^{'} \\ 0 & K_2^{'} & -K_3^{'} & -K_4^{'} & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.5 \\ 0.8 \\ 10 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

***- معادلات H-equations:**

معادلة الاستمرار في العقدة -1-:

$$F_1=\left[\frac{100-H_1}{K_1}\right]^{\frac{1}{n_1}}-\left[\frac{H_1-H_2}{K_2}\right]^{\frac{1}{n_2}}-\left[\frac{H_1-H_3}{K_4}\right]^{\frac{1}{n_4}}-1.0=0$$

معادلة الاستمرار في العقدة -2-:

$$F_2=\left[\frac{H_1-H_2}{K_2}\right]^{\frac{1}{n_2}}+\left[\frac{H_3-H_2}{K_3}\right]^{\frac{1}{n_3}}-1.5=0$$

معادلة الاستمرار في العقدة -3-:

$$F_3=\left[\frac{H_1-H_3}{K_4}\right]^{\frac{1}{n_4}}-\left[\frac{H_3-H_2}{K_3}\right]^{\frac{1}{n_3}}+\left[\frac{90-H_3}{K_5}\right]^{\frac{1}{n_5}}-0.8=0$$

حيث H_i الضاغط في العقدة i؛ i=1-3 ، و K_j ثابت الأنبوب j ؛ j=1-5.

و بوضع هذه المعادلات بالشكل المصفوفي:

$$[D]\{z\}=\{F\}\Rightarrow\{H\}^{(m+1)}=\{H\}^{(m)}-\{z\}$$

و بالحل بطريقة نيوتن يتم الحصول على قيم H بدقة 0.001 في المحاولة الرابعة.

$$\{H\}^{(0)} = \begin{Bmatrix} 93 \\ 85 \\ 88 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{H\}^{(5)} = \begin{Bmatrix} 67.517 \\ 56.793 \\ 67.236 \end{Bmatrix}$$

***- معادلات ΔQ-equations:**

معادلة فاقد الطاقة بين الخزانين على مسار الأنابيب 1,4,5:

$$F_1 = K_1(Q_{01} + \Delta Q_1)^{n_1} + K_4(Q_{04} - \Delta Q_2 + \Delta Q_1)^{n_4} - K_5(Q_{05} - \Delta Q_1)^{n_5} - 10 = 0$$

معادلة فاقد الطاقة في الحلقة:

$$F_2 = K_2(Q_{02} + \Delta Q_2)^{n_2} - K_3(Q_{03} - \Delta Q_2)^{n_3} - K_4(Q_{04} - \Delta Q_2 + \Delta Q_1)^{n_4} = 0$$

حيث Q_{0i} = الغزارة، ΔQ_i =تصحيح الغزارة.

بوضع هذه المعادلات بالشكل المصفوفي و الحل بطريقة نيوتن:

$$[D]\{z\} = \{F\} \Rightarrow \{\Delta Q\}^{(m+1)} = \{\Delta Q\}^{(m)} - \{z\}$$

حيث بأخذ الجاكوبيان الشكل:

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial F_1}{\partial \Delta Q_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial F_2}{\partial \Delta Q_2} \end{bmatrix}$$

Example: Performing a Steady-State Analysis on WaterCad:

In constructing a distribution network, no need to be concerned with assigning labels to pipes and nodes, because WaterCad will assign labels automatically. When creating a schematic drawing, pipe lengths are entered manually. In a scaled drawing, pipe lengths are automatically calculated from the position of the pipes' bends and start and stop nodes on the drawing pane.

In this network, the modeling of a reservoir connected to a pump simulates a connection to the main water distribution system. Simplifying the network in this way can approximate the pressures supplied to the system at the connection under a range of demands. This type of approximation is not always applicable and care should be taken when modeling a network in this way. It is more accurate to trace the network back to the source.

Step 1: Create a New Project File

Using the WaterCad **interface:**

1. Double-click the WaterCad icon. The welcome dialog box opens.

2. Click Create New Project and an untitled project opens.
3. Choose Tools > Options > Units. Since you will be working in System International units, click Reset Defaults to System International.
4. Verify that the Default Unit System for New Project is set to SI. If not, select from the menu.
5. Select the Drawing tab to make sure Drawing Mode is set to Scaled.
6. Set the Horizontal Scale Factor 1 cm = **40** m.
7. Click OK.
8. Set up the project. Choose File > Project Properties and name the project. click OK.
9. Choose **File > Save As**. In the Save As dialog box, double-click the **any** folder.
10. Enter the file name **any.**wtg for your project and click **Save**.

Using the AutoCAD interface:

1. Double-click the WaterCad desktop icon to start WaterCad for AutoCAD.
2. Choose Tools > Options > Units. Since you will be working in System International units, click Reset Defaults to System International.
3. Verify that the Default Unit System for New Project is set to SI. If not, select from the menu.
4. Click OK.
5. Click the **File** menu and select the **Project Properties** command. Type **any** in the **Title** field and click the **OK** button.
6. Change the project Option settings. Click the **Tools** menu and select the **Options** command. Change to the **Drawing** tab.
7. Change the **Drawing Mode** to **Scaled**. Set the horizontal scale to **1 mm = 4000 mm**.
8. Click the **OK** button to continue.

Step 2: Lay out the Network

1. Select Pipe from the layout toolbar.
2. Move the cursor on the drawing pane and right click to select Reservoir from the menu or click from the toolbar.
3. Click to place R-1.
4. Move the cursor to the location of pump P-1. Right-click and select Pump from the shortcut menu.
   Click to place it.
5. Right click to select Junction from the menu and click to place J-1.
6. Click to place junctions J-2, J-3, and J-4.
7. Click on J-1 to finish.
8. Right-click and choose Done from the menu.
9. Create J-5.
    a. Select the **Pipe** layout tool again.
    b. Click junction J-3.
    c. Move the cursor to the location of J-5, and click to insert the element.
    d. Right-click and select **Done**.
10. Insert the **PRV** from the menu and junction **J-6** by selecting the **Pipe** layout tool and placing the elements in their appropriate locations.

Be sure to lay out the pipes in numerical order (P-7 through P-9), so that their labels correspond to the labels in the diagram. Right-click and select **Done** from the menu to terminate the Pipe Layout command.

11. Insert the tank, T-1, using the **Pipe** layout tool. Pipe **P-10** should connect the tank to the network if you laid out the elements in the correct order.
12. Save the network by clicking **Save** or choose File > Save.

Step 3: Enter and modify data

- **Dialog Boxes**—You can use the Select tool and double-click an element to bring up its Properties editor. In AutoCAD, click the element once with the Select tool to open the element's editor.
- **FlexTables**—You can click FlexTables to bring up dynamic tables that allow you to edit and display the model data in a tabular format. You can edit the data as you would in a spreadsheet.
- **User Data Extensions**—The User Data Extensions feature allows you to import and export element data directly from XML files.
- **Alternative Editors**—Alternatives are used to enter data for different "What If?" situations used in Scenario Management.

Entering Data through Dialog Boxes

To access an element's dialog box in WaterCad V8 Stand Alone mode, double-click the element. In AutoCAD, first click the Select tool on the toolbar, then click the element whose attributes you wish to modify to open the Properties window.

1. Double-click on the reservoir R-1.
2. Enter the Elevation as 198.
3. Set Zone to **Connection Zone**.
    a. Click the menu to Edit Zones which will open the Zone Manager.
    b. Click **New**.
    c. Enter a label for the new pressure zone called Connection Zone.
    d. Click Close.
    e. Select the zone you just created from the Zone menu.
    f. Close the Reservoir Editor.
4. Now double-click on tank **T-1** and enter the following:
   Elevation (Base) = 200
   Elevation (Minimum) = 220
   Elevation (Initial) = 225
   Elevation (Maximum) = 226
   Diameter (m) = 8
   Section = Circular.
   Create Zone-1 and set the Zone value to it.
   Close the Tank editor.
5. Click on pump PMP-1.
    a. Enter 193 for the Elevation.
    b. Click in the Pump Definition field and click on Edit Pump Definitions from the drop-down list to open the Pump Definitions manager.
    c. Click New to create a new pump definition. Name it PMP-1.

d. Select Standard (3 Point) from the Pump Type menu.
e. Change the flow units by right-clicking on Flow to open the Units and Formatting menu.
f. Click on it and then, in the Set Field Options box, set the Units to L/min.
g. Click OK.
h. Enter the Flow and Head informatio.
i. Click Close.
j. Highlight PMP-1 in the drawing view and change the Pump Definition value in the Properties viewer to PMP-1.

6. Click on the valve PRV-1. Enter in the following:
   Elevation =165
   Diameter = 150
   Pressure Setting = 390
   Status = Active
   Setting Type = Pressure.
   Create Zone-2 and set it.
   Click to exit.
7. The Properties window for the junctions will look like this:
   Enter the following data for each of the junctions, leaving all other fields set to their default values.
   In order to add the demand, click the ellipsis in the Demand Collection field to open the Demand box, click New, and type in the numbers for Demand (Base). Choose the Fixed Pattern.
8. Click to exit.
9. Specify user-defined lengths for pipes P-1, P-7, P-8, P-9 and P-10.
   a. Click on pipe **P-1** to open the Properties window for the pipe.
   b. Set **Has User Defined Length?** to True. Then, enter a value of **0.01 m** in the Length field. Since you are using the reservoir and pump to simulate the connection to the main distribution system, you want headloss through this pipe to be negligible. To model this, we assign a very small value to the pipe length and a large value to the pipe diameter.
   c. Enter **1000 mm** as the diameter of P1.
   d. Repeat for pipes P-7 through P-10 using the following user-defined lengths:
      P7 = 400
      P8 = 500
      P9 = 31
      P-10 = 100.
   e. Click to close.

Step 4: Entering Data through FlexTables

It is often more convenient to enter data for similar elements in tabular form rather than to individually open a dialog box for an element, enter the data into the dialog box, and then select the next element. Using FlexTables, you can enter the data as you would enter data into a spreadsheet.

To use FlexTables

1. Click FlexTables or choose View > FlexTables.
2. Double-click Pipe Table to open the Pipe FlexTable. Fields that are white can be edited but yellow fields cannot.
3. For each of the pipes, enter the diameter and the pipe material,
4. In order to enter the material type, click the ellipsis to open the Engineering Libraries box. Click on Material Libraries > Material Libraries.xml and then click the appropriate material type and then click Select.
   Or, enter the material type in the field.
5. Notice that the C values for the pipes will be automatically assigned to preset values based on the material; however, these values could be modified if a different coefficient were required.
6. Leave other data set to their default values. Click to exit the table when you are finished.

Step 5: Run a Steady-State Analysis

1. Click to open the Calculation Options box.
2. Double-click or right-click on Base Calculation Options to open the Properties manager and make sure that the Time Analysis Type is set to Steady State. Click to close.
3. Click Validate, then click OK if no problems are found.
4. Click Compute to analyze the model.
5. The Calculation Summary dialog box opens.

   A green light indicates no warnings or issues, a yellow light indicates warnings, and a red light indicates issues.

6. When calculations are completed, User Notifications opens.
7. Click to close User Notifications.
8. Click to Save project.

الفصل الثاني

تصميم شبكات مياه الشرب

2-1- شبكات الأنابيب الشجرية

2-2- معيار تصميم شبكة حلقية

2-3- تصميم المكونات الخاصة

2-4- تمثيل منحنيات المضخة

2-5- تحليل الحساسية

تصميم شبكات مياه الشرب

Design of Pipe Networks

إن تصميم شبكات مياه الشرب يعني تحديد مكونات الشبكة: أقطار و أطوال و معامل خشونة الأنابيب، أماكن و ضواغط الخزانات، أماكن المضخات و خطوطها المميزة و أماكن سكورة التحكم بالضاغط و الغزارة إضافة إلى القطع الخاصة. و عموما يكون المطلوب تصميم الأقطار.

***- حساب الأقطار**:

لحساب قطر أنبوب يصل بين خزانين يلزم معرفة :- مناسيب سطح الماء في الخزانين - الغزارة – طول الأنبوب – معامل الخشونة.

تحل معادلة Darcy-Wiesbach للفاقد بدلالة الغزارة:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = f\frac{L}{D}\frac{Q^2}{2gA^2} \qquad 2\text{-}1$$

مع معادلة Colebrook-White للمنطقة الانتقالية :

$$1/\sqrt{f} = 1.14 - 2Log_{10}\left[e/D + 9.35/(\mathrm{Re}\sqrt{f})\right] \qquad 2\text{-}2$$

حيث $\mathrm{Re} = VD/\nu = 4Q/(\pi\nu D)$ ، L: طول الأنبوب، D: قطر الأنبوب، v: السرعة،

A: مساحة مقطع الأنبوب، f: معامل الاحتكاك، e: خشونة الأنبوب، h_f: فاقد الضغط.

يمكن حل المعادلتين السابقتين آنيا باستخدام إحدى الطرق العددية مثل طريقة نيوتن.

و لتطبيق طريقة نيوتن يجب تحويل المعادلتين إلى الشكل F(D, f)=0، كما يلي:

$$F_1(D, f) = h_f - f\frac{L}{D}\frac{Q^2}{2gA^2} = 0 \qquad 2\text{-}1'$$

$$F_2(D, f) = 1/\sqrt{f} - 1.14 + 2Log_{10}\left[e/D + 9.35/(\mathrm{Re}\sqrt{f})\right] = 0 \qquad 2\text{-}2'$$

إن مصفوفة الجاكوبيان لهاتين المعادلتين تكتب بالشكل:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial D} & \frac{\partial F_1}{\partial f} \\ \frac{\partial F_2}{\partial D} & \frac{\partial F_2}{\partial f} \end{bmatrix}$$

يمكن لعدة خوارزميات أن تحل هاتين المعادلتين عدديا بكفاءة منها:

- استخدام علاقة Gauss-Seidel[16] لحل معادلة Colebrook-White بدلالة f بحلقة تكرارية ضمن حلقة تحل معادلة Darcy-Weisbach بطريقة نيوتن بعد إعطاء قيمة أولية لـ D، تكتب علاقة نيوتن التكرارية بالشكل:

$$D^{(m+1)} = D^{(m)} - \frac{F\left(D^{(m)}\right)}{\partial F\left(D^{(m)}\right)/\partial D} \qquad 2\text{-}3$$

$$F(D) = h_f - f(L/D)Q^2/\left(2gA^2\right) \qquad 2\text{-}4$$

- كتابة معادلة Darcy-Weisbach بدلالة D: $D = \left[fLQ^2/(2g(\pi/4)^2 h_F)\right]^{0.2}$ وحلها مع معادلة Colebrook-White تكراريا بطريقة Gauss-Seidel أو نيوتن.

- حذف معامل الاحتكاك بحل معادلة Darcy-Weisbach بدلالته و التعويض في معادلة Colebrook-White و حل المعادلة الناتجة بدلالة D بطريقة نيوتن.

ويمكن حل مسألة حساب الأقطار باستخدام معادلة Hazen-Williams التالية:

$$h_f = \frac{K_1 L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852} \qquad 2\text{-}5$$

حيث K_1 : معامل يتعلق بالوحدات المستخدمة، C_{HW} : معامل هايزن ويليامز.

تحل هذه المعادلة مباشرة بدلالة القطر، ولسهولة حلها تستخدم على نطاق واسع. و هي تعطي نتائج تقارب بشكل جيد معادلة دارسي عندما يكون عدد رينولدز في مجال 10.e5 إلى 10.e6 و هو مجال نموذجي للتصميم. و لا تتقارب النتائج في شروط الجريان في الأنابيب الخشنة والتي يفضل عندها استخدام معادلة Manning.

2-1- **شبكات الأنابيب الشجرية**:

لتصميم شبكة شجرية يتم حل إحدى معادلات فاقد الضاغط ذلك بمعرفة الغزارة في الأنابيب و الضواغط في العقد لتحديد أقطار الأنابيب بإحدى الطرق العددية.

فـي الحالـة العامـة تكـون معظـم مكونـات الشـبكة موجـودة؛ خزانـات –أنابيـب – مضخات كواسر ضغط.و يتم التصميم بتحديد هذه المكونات بحيث يتم الحصول على أقل كلفة. في كثير من الأحيان يكون المطلوب تحديد أقطار الأنابيب. والحل الفني الاقتصادي يتم بالحصول على سلسلة من الحلول الهيدروليكية بتغيير ميل HGL، يرسم مجموع تكلفة الأنابيب و تكلفة الطاقة كتابع لميل HGL، و الكلفة الدنيا على المنحني ستحدد أفضل تصميم فني اقتصادي لمنظومة الأنابيب.

لحساب الغزارات في الأنابيب انطلاقا من السحوبات في العقد يتم اعتماد مبدأ الاستمرار. و توجد ثلاث طرق فعالة برمجيا و هي:

1- طريقة مخطط الشبكة.
2- طريقة مصفوفة المعاملات.
3- طريقة الجبر الخطي القياسي.

1- طريقة مخطط الشبكة: تعتمد على مخطط أو طبولوجيا وصل الشبكة. و يحدد مبدأ هذه الطريق في تحديد الغزارات في الأنابيب بالخطوات التالية:

a. تحديد العقد التي يرتبط بها أنبوب واحد، إعطاء غزارة لهذا الأنبوب مساوية للسحب في العقدة.
b. تعديل السحب في العقدة في الطرف الثاني للأنبوب لتساوي السحب في هذه العقدة زائدا غزارة الأنبوب المذكور.
c. تكرر الخطوتين -1- و -2- حتى تحديد الغزارات في كل الأنابيب.

2- طريقة مصفوفة المعاملات: تعتمد هذه الطريقة على كتابة معادلات الاستمرار بالشكل:

$$[C][Q]=[QJ] \qquad 2\text{-}5$$

حيث [C] مصفوفة العوامل تأخذ عناصرها القيم 0 ،1-، 1 ، [Q] شعاع مجاهيل الغزارات في الأنابيب، [QJ] شعاع السحوبات في العقد.

و يجري تحديد الغزارات في الأنابيب كما يلي:

- البحث في مصفوفة العوامل عن أسطر تحوي عنصر واحد لا يساوي الصفر، و حل هذه المعادلة (الغزارة في الأنبوب المعرف بالعمود الذي

يحتوي هذا العنصر تساوي السحب في العقدة المقابلة في شعاع [QJ]). و حذف هذا السطر من المصفوفة.

- إيجاد الأسطر التي تملك عناصر لا تساوي الصفر في هذا العمود، و تعديل [QJ] في الأسطر وذلك بضرب المعامل 1 أو 1- بالغزارة المحددة في الخطوة -1- ثم طرح القيمة الناتجة من [QJ] في هذه الأسطر. ثم حذف العمود مما يؤدي إلى تقليص مصفوفة العوامل بسطر و عمود.
- تكرار الخطوتين -1- و -2- حتى حذف كل سطور و أعمدة مصفوفة الأمثال.

3- طريقة الجبر الخطي القياسي: تعتمد هذه الطريقة على كتابة معادلات الاستمرار بالشكل المصفوفي:

$$[C][Q]=[QJ] \qquad 2\text{-}6'$$

حيث مصفوفة المعاملات مربعة تحوي NP سطرا و عمودا بقيم 0، 1-، 1 ، أرقام السطور تقابل أرقام العقد . و بالتالي تصف المعادلة المصفوفية NP معادلة استمرار في العقد. بعد تحديد مصفوفة المعاملات و شعاع السحوبات يتم حل منظومة المعادلات الخطية بقوانين الجبر الخطي.

بعد تحديد الغزارات يتم تصميم الشبكة بحسب الخطوات التالية:

1. اختيار ميل لـ HGL على طول الفرع الرئيسي .
2. بمعرفة ضاغط عقدة طرفية و الميل من الخطوة السابقة، تحسب ميول HGL للأنابيب الفرعية.
3. حساب أقطار الأنابيب اعتمادا على ميول HGL.
4. اختيار أقطار قياسية قريبة من القيم المحسوبة.
5. تحليل النظام المشكل من هذه الأنابيب القياسية، و حساب الضاغط و الطاقة التي ستقدمها المضخة، ثم حساب كلفة الطاقة الكهربائية.
6. تحديد كلفة الأنابيب، و تحويل هذه الكلفة إلى كلفة سنوية مكافئة، بتطبيق معامل استرجاع راس المال.
7. تكرار الخطوات من -1- إلى -6- للحصول على الكلفة الكلية الصغرى.

2-2- معيار تصميم شبكة حلقية[3]:

الغاية هي وضع معادلات لتحديد الأقطار و القيم التصميمية لمكونات الشبكة أو أي متحول يرتبط بالشبكات الحلقية.

يوجد نوعان من المعادلات الرئيسية وهما:

1- معادلة الاستمرار في العقد و عددها بعدد عقد التفرع، تنص على أن معدل الكتلة الداخلة إلى العقدة يساوي معدل الكتلة الخارجة.

2- معادلات تصف العلاقة بين فاقد الضاغط و الغزارة. كمعادلة Darcy-Weisbach أو Hazen-Williams و عددها بعدد الأنابيب.

و يمكن كتابة معادلات أخرى ضرورية مثل معادلة Colebrook-White لحساب f، أو معادلة حساب مساحة مقطع.

إذا يمكن بناء منظومة من NP+NJ معادلة أساسية، و لا تعتبر معادلات الفاقد في الحلقات الحقيقية و الوهمية مستقلة إذ يمكن كتابتها انطلاقا من معادلات الفاقد في الأنابيب. ويمكن الاستغناء عن معادلات الفاقد في الأنابيب بكتابة معادلات الفاقد في الحلقات.

و بشكل عام يعطى في مسائل التصميم كمعلوم الضواغط و السحوبات في العقد و يطلب تحديد أقطار الأنابيب و الغزارات. و الفرق بين مسائل التحليل و التصميم في أنه بينما تكون الأقطار معلومة و الضواغط مجهولة في التحليل، تكون الضواغط معلومة و الأقطار مجهولة في التصميم. و بالتالي يمكن حساب عدد من الأقطار بعدد معادلات العقد و أي عدد إضافي من الأنابيب يجب تحديده مسبقا.

بالحل الآني لمنظومة المعادلات يمكن تحديد الأقطار و الغزارات. و توجد طريقة فعالة برمجيا تتلخص بالخطوات التالية:

1- حساب الغزارات في الأنابيب المعلومة الأقطار من علاقة فاقد الضاغط.

2- حساب بقية الغزارات باستخدام معادلات الاستمرار.

3- حساب الأقطار باستخدام معادلة الفاقد.

يجب تساوي عدد المجاهيل و عدد المعادلات، و اختيار المعاليم و المجاهيل و إعطاء قيم للمعاليم بما يؤدي إلى إمكانية وجود حل للمجاهيل أي منظومة معادلات ممكنة الحل.

3-2- **تصميم المكونات الخاصة**[2،3،8] :

تقسم مسائل التصميم إلى فئتين:

1- تصميم عدد من أقطار الأنابيب بمقدار عدد العقد.

2- تصميم قطر أنبوب محدد ليحقق شرط معين، كالضاغط عند عقدة معينة.

لحل مسائل الفئة الأولى فإن منظومة المعادلات: NP=NJ+NL-1 أي معادلات الاستمرار في العقد و معادلات الطاقة في الحلقات الحقيقية و الوهمية، تحدد أقطار أنابيب الشبكة. أما مسائل الفئة الثانية فتحتوي على مجهول إضافي و لحلها لا بد من معادلة إضافية تأخذ بالاعتبار الشرط المفروض. يدعى هذا المجهول الجديد بجهاز الضاغط التفاضلي، ويمثل فيزيائيا بمضخة تسريع، سكر تحكم بالضاغط، أنبوب بقطر أو خشونة مجهولة. و المعادلة الإضافية لهذا المجهول هي معادلة الطاقة بين العقدة موضوع الشرط و عقدة معروفة الضاغط و يدعى هذا المسار بالحلقة الخاصة، تشبه الحلقة الوهمية. ربما يؤدي الشرط المفروض إلى حالة مستحيلة الحل.

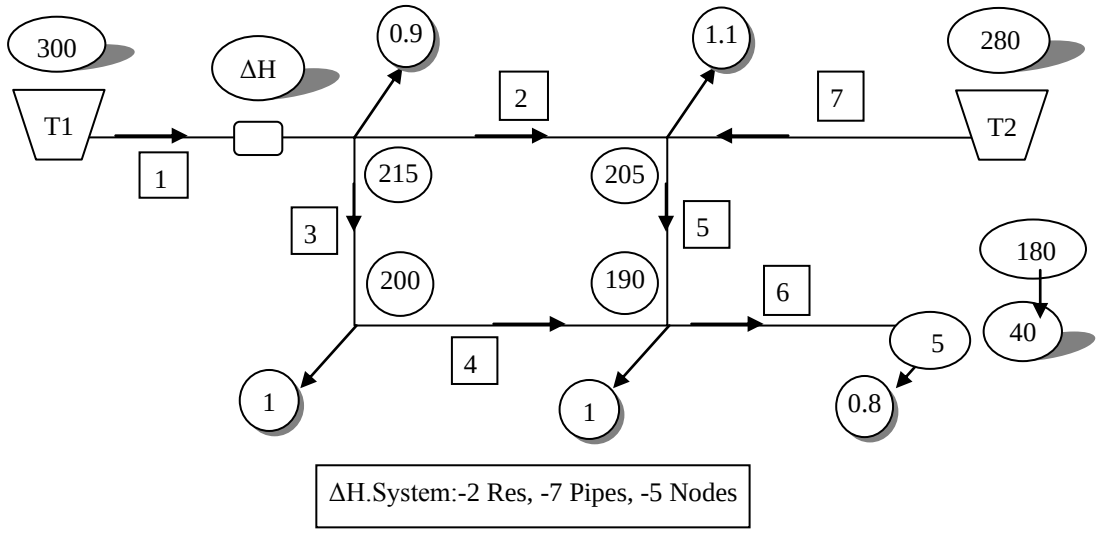
مثال: حساب جهاز الضاغط التفاضلي ΔH المطلوب تركيبه على الأنبوب 1، بحيث يكون الضاغط عند العقدة 5، بمقدار 40، الشكل 2-1.

المعادلات الناظمة للمنظومة الهيدروليكية:

$$K_7(Q_{07}+\Delta Q_1)^{n_7} - K_2(Q_{02}-\Delta Q_1-\Delta Q_2)^{n_2} - K_1(Q_{01}-\Delta Q_1)^{n_1} + \Delta H + 20 = 0$$

$$K_3(Q_{03}+\Delta Q_2)^{n_3} + K_4(Q_{04}+\Delta Q_2)^{n_4} - K_5(Q_{05}-\Delta Q_2)^{n_5} - K_2(Q_{02}-\Delta Q_1-\Delta Q_2)^{n_2} = 0$$

$$K_6 Q_{06}^{n_6} + K_5(Q_{05}-\Delta Q_2)^{n_5} + K_7(Q_{07}+\Delta Q_1)^{n_7} + (40*144/62.4+180) - 280 = 0$$



الشكل 2-1

***- تطوير حل لأي متغير:**

يمكن حل معادلات منظومة هيدروليكية بالنسبة لأي متغير، و بالتالي يمكن أن يشمل التصميم أي متغير مرتبط بالشبكة. عادة يكون المجهول واحدا مما يلي:

1- الضواغط البيزومترية في العقد.
2- الغزارات في الأنابيب.
3- أقطار الأنابيب.
4- خشونة الأنابيب.
5- مناسيب سطوح الماء في الخزانات.

يشترط على المعادلات التي توضع لتصميم أي متغير أن تحقق:

- عدد المعادلات يساوي عدد المجاهيل.
- لا تؤدي المعاليم إلى حالة مستحيلة الحل.

إن فعالية أي برنامج لحل المعادلات بالنسبة لأي متغير، تكمن في معالجة كل حالة بشكل تفاعلي. و وضع برنامج تابع لحل كافة الحالات سيكون أقل فعالية من البرامج التي تحل: Q-equations، H-equations، ΔQ-equations .

و يجب تجنب اختيار مجموعة مجاهيل تؤدي إلى حالة مستحيلة الحل.

2-4- تمثيل منحنيات المضخة[12،3]:

يتطلب تصميم شبكة، عند وجود محطات ضخ، تمثيل المنحنيات المميزة للمضخة بمعادلات، الضاغط كتابع للغزارة. إن استقراء معادلة منحني مميز للمضخة انطلاقا من أزواج معطيات (غزارة، ضاغط) يعتمد على عدد هذه الأزواج، و دقة المعادلة تعتمد على طريقة الاستقراء. تنصح المراجع حول المضخات احدى الطريقتين.

2-4-1- التمثيل بمنحني من الدرجة n:

يمكن من أي عدد من الأزواج استقراء منحني مميز للمضخة لحساب الضاغط المقابل لغزارة ما. إذا طلب الضاغط عند Q ما و وجد Q_i،Q_{i+1} بحيث تحقق : $Q_i<Q<Q_{i+1}$، فيمكن استقراء تابع من الدرجة الأولى:

$$h_p = h_{pi} + (h_{pi+1} - h_{pi})(Q - Q_i)/(Q_{i+1} - Q_i) \qquad 2\text{-}7$$

يمكن استقراء منحني من الدرجة n باستخدام صيغة لاغرانج Lagrange:

$$h_p = \sum_{i=1}^{n} F_i H_i \qquad 2\text{-}8$$

$$F_i = \prod_{j=1, j\neq i}^{n} (Q - Q_j) / \prod_{j=1, j\neq i}^{n} (Q_i - Q_j) \qquad 2\text{-}9$$

على أن تقع الغزارة المطلوب حساب الضاغط عندها ضمن مجال المعطيات.

2-4-2- استقراء تابع Spline:

تعاني منحنيات الدرجة n من عدم استمرار المشتقات من المرتبة الأولى. يمكن لمنحني Spline أن يستقرأ بين نقطتين متتاليتين و يتميز أنه و جميع مشتقاته مستمر.

يمكن تطوير منحني Spline تكعيبي بين نقطتين (زوجي معطيات) :

$$y^{(i)} = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \qquad \text{(i)}$$

لتطوير هذا التابع بين نقطتين تكتب 4 معادلات:

$$H_1 = a_1 Q_1^3 + b_1 Q_1^2 + c_1 Q_1 + d_1 \qquad \text{(ii)}$$

$$H_2 = a_1 Q_2^3 + b_1 Q_2^2 + c_1 Q_2 + d_1 \qquad \text{(iii)}$$

$$\frac{\partial^2 y^{(1)}}{\partial x^2} = 0, \qquad \frac{\partial^2 y^{(2)}}{\partial x^2} = 0 \qquad \text{(iv)}$$

يمكن إيراد علاقة بديلة:

$$H^{(i)} = a_i H_j + b_i H_{j+1} + c_i H_j^{"} + d_i H_{j+1}^{"} \qquad (v)$$

حيث a_i،b_i توابع وزن تطبق على الضاغط H عند النقاط j،j+1 .

c_i،d_i توابع وزن تطبق على المشتق الثاني لـ H عند النقاط j،j+1 .

2-5- تحليل الحساسية[3] Sensitivity Analysis:

يبحث تحليل الحساسية في تحديد مكونات الشبكة المطلوب تطويرها، تحسينها، أو استبدالها و بذلك يزداد أداؤها بفعالية، و يتعمق فهم الدارس لهذا الأداء. و بالتالي يقدم تحليل الحساسية أدوات تحدد أي عناصر الشبكة الأكثر أهمية في تحسين أدائها. يمكن تحويل الحساسية، وهي مقدار استجابة أحد المتحولات لتغير متحول آخر أو عدة متحولات، إلى مفهوم كمي مثل الاشتقاق الجزئي لتابع (المتحول الهدف) بالنسبة لمتحول أو أكثر. يتم اللجوء للطرق العددية للتعبير جبريا عن المشتقات الجزئية. إن التعبير الرياضي:

$$\partial f / \partial x = \lim_{h \to 0} (f(x+h, y, z) - f(x, y, z)) / h \qquad 2\text{-}10$$

يمكن كتابته:

$$\Delta f / \Delta x = (f(x+\Delta x, y, z) - f(x, y, z)) / \Delta x \qquad 2\text{-}11$$

و تشير زيادة قيمة المشتق إلى زيادة تأثر المتغير f، أو زيادة حساسية f بالنسبة لـ x.

و في أنظمة الأنابيب يوجد العديد من المشتقات أو الحساسيات التي يمكن تحديدها، و يزود مقدار هذه الحساسية بمعلومات مفيدة عن أكثر الطرق فاعلية لزيادة أداء النظام. بعض الأمثلة:

1- يمكن تصحيح الضواغط المنخفضة بزيادة قطر أنبوب يعطي أكبر $\partial P / \partial D$.

2- يمكن تصحيح الضواغط المنخفضة بزيادة ضاغط مضخة تعطي أكبر $\partial P / \partial h_p$.

3- تصحيح الجريان بزيادة ضاغط المضخة التي تعطي أكبر $\partial Q_{res} / \partial h_P$.

4- تصحيح الضاغط العالي باختيار PRV يعطي أكبر $\partial P / \partial H$.

و يعتمد اختيار و مقدار الحساسيات على طبولوجية و خصائص أداء كل شبكة.

الفصل الثالث

المحاكاة بالزمن الممتد و التصميم الاقتصادي

(التحليل الديناميكي)

3-1- مقدمة.

3-2- المحاكاة بالزمن الممتد.

3-3- خوارزمية المحاكاة بالزمن الممتد.

3-4- الدراسة الاقتصادية للشبكات.

3-5- الكلفة الدنيا.

3-6- التصميم الاقتصادي للشبكات.

3-7- ارشادات تصميمية للشبكات المعقدة.

المحاكاة بالزمن الممتد والتصميم الاقتصادي

(التحليل الديناميكي)

Extended Time Simulations &
Economical Design

3-1- مقدمة:

عند التصميم و التحليل الهيدروليكي الستاتيكي للمنظومات الهيدروليكية يجري الحساب باعتبار الغزارة الساعية العظمى في ايام التحاريق في نهاية الفترة التصميمية، أي السحوبات في عقد الشبكة اعظمية مستقرة. و لكن حيث ان السحوبات تتغير مع الزمن حسب نمط استهلاك يحدد بالقياس Demand Pattern ، فان تحليل سلوك و اداء هذه المنظومات يتم بطريقة التحليل الديناميكي ، المحاكاة بالزمن الممتد Extended Time Simulation ، التي تستجيب لتغير اداء الخطوط ، و تغير اداء التجهيزات الهيدروليكية مثل المضخات بتغير السحوبات مع الزمن.

ويمكن باستخدام المحاكاة بالزمن الممتد و التحليل الهندسي الاقتصادي الوصول الى تصميم هندسي اقتصادي للمنظومات الحلقية الكبيرة.

ترتكز طريقة المحاكاة بالزمن الممتد على حساب سلسلة من حلول الحالة المستقرة اعتمادا على تغير السحوبات ، تغير مناسيب الماء في الخزانات، و عدد المضخات العاملة. يتم الحصول على هذا النوع من الحل المعتمد على الزمن بالحل الاني لمنظومة معادلات جبرية لاخطية ، معادلات الطاقة و الاستمرار ، باعتبار السحب مستقر خلال الفترة الزمنية بين حلين. ويطلق على هذا النوع من مسائل الجريان غير المستقر الجريان شبه المستقر Quasi-Steady ، لان العطالة تهمل و تاخذ معادلة الطاقة صيغة الحالة المستقرة ، بالرغم من تبعية بعض الحدود للزمن.

غالبا ما يصعب التمييز ،حتى في حال توفر المعطيات عن سرعة تغير السحب، بين متى يمكن الاكتفاء بالتحليل بالزمن الممتد، و بالتالي امكانية اهمال التاثيرات العطالية و التاثيرات المرنة، ومتى يجب اجراء تحليل دراسة مطرقة مائية. في

غالبية التجمعات السكنية البلدية الكبيرة يكون التغير في السحب بطيئا بما يكفي لجعل تاثيرات العطالة صغيرة نسبيا،و اهمال التاثيرات المرنة. و بالمقابل رصدت العديد من الحالات اثناء عمل الشبكات الكبيرة ، حيث ادى اهمال التاثيرات العطالية الى فارق في النتائج بين المحاكاة بالزمن الممتد و معطيات الواقع.

3-2- **المحاكاة بالزمن الممتد:** Extended Time Simulation **:**

تعتمد طريقة المحاكاة بالزمن الممتد على تحليل المنظومات الهيدروليكية عند حدوث تغيرات بطيئة في بارامترات او متغيرات الجريان بما يكفي لاهمال التاثيرات العطالية و المرنة، و ذلك باجراء سلسلة من حلول الحالة المستقرة ، في هذه السلسلة يتم تجديد الحل السابق، في الزمن t، الى الحل في الزمن $t+\Delta t$، استجابة لتغيرات زمنية في المنظومة. هذه الحلول المعتمدة على الزمن هي حلول شبه مستقرة.

يمكن بالمحاكاة بالزمن الممتد دراسة المنظومات الهيدروليكية في الحالات التالية:

1- تغير في السحوبات في العقد Demand at nodes: يعبر عنه بمنحني نمط السحب، عوامل تضرب بالقيمة الوسطية للسحب.

2- علاقة حجم ماء الخزان بمنسوب الماء Storage versus elevation relations: بموازنة غزارة الماء (الداخل و الخارج) من الخزان و بمعرفة علاقة الحجم بدلالة المنسوب في الخزان، يحسب تغير منسوب الماء و بالتالي تغير الضاغط.

3- جدول عمل المضخات Pump schedules: يوضح عدد المضخات التي يجب ان تعمل على التوازي و على التسلسل في كل المحطات في أي لحظة زمنية.

4- قواعد الضخ Pump rules: تربط عدد المضخات العاملة بقيمة الضاغط في عقدة ما، او منسوب الماء في خزان.

5- قواعد السحب Flow rules: تحديد السحب في عقد معينة بدلالة الضاغط في عقدة ما او منسوب الماء في خزان.

6- قواعد الغزارة Discharge rules: تحديد الغزارة في انابيب داخلية معينة؛ و هي الانابيب التي ليست في نهايات الشبكة، و لا الانابيب التي تقدم الماء الى الشبكة.

7- جداول السكورة Schedules for valves: تحدد اعدادات السكور؛ النسبة المئوية للفتحة، percent open ، كتابع للزمن و و فاقد الضغط عبر السكر.

8- قواعد السكورة Rules for valves: تحدد اعدادات السكور،percent open، اومعامل فاقد الضغط عبر ها كتابع للضغط في عقدة ما.

9- اجهزة الضغط التفاضلي Differential head devices: تحدد الضغط التفاضلي في انابيب معينة كتابع للزمن، حيث يمكن ان يحسب الضغط التفاضلي بحيث بحيث يتم الحصول على ضاغط محدد في عقدة ما.

10- خوارزميات التحكم بمنسوب الماء في الخزان او الضغط في عقدة Tank level or pressure control algorithms: تحاكي هذه الخوارزميات اجراءات التحكم، ليتم تشغيل السكورة، بحيث يتم المحافظة على مناسيب الماء في الخزان او الضاغط في عقدة عند قيمة معينة أو في مجال محدد.

يمكن وصف التغير في سلوك الشبكات في الخطوة الزمنية اللاحقة، اعتمادا على التغير، في احد البارامترات او المتغيرات، الذي تصفه القواعد السابقة و اخذ القيم الحالية للحل. و عند القيام بحل منظومة هيدروليكية، بحسب احد القواعد ، ليس من الضروري اعادة تعريف المعادلات التي تصف النموذج الرياضي، بل تعديل المعادلات الموجودة بما يوافق الشروط التي ستطبق على الخطوة الزمنية الجديدة. ولكن عند إطفاء أو تشغيل مضخة أو الفتح الكامل لسكر كسر ضغط ' فإن نوع و عدد المعادلات التي تصف المنظومة سيتغير.

3-3- **خوارزمية المحاكاة بالزمن الممتد:** Extended Time Simulation Algorithm

حالة شبكة ذات خزانات متعددة:

لدراسة و تحليل شبكة بطريقة المحاكاة بالزمن الممتد يلزم توفر المعطيات التالية:

توصيف كامل مكونات و طبولوجيا الشبكة من انابيب و خزانات و مضخات و سكورة التحكم بالغزارة و الضاغط و و صف كيفية وصلها، مع توفر الخطوط المميزة لكافة المكونات.

توصيف حالة الشبكة (الغزارات، السرع، الفاقد في كل الانابيب؛ الضاغط و السحوبات في العقد، قواقد الضغط عند كافة التجهيزات) في لحظة زمنية تعتبر t_0.

تستلزم الخوارزمية حساب حجم المياه الكلي المزود للمستهليكين خلال فترة زمنية محددة و الذي يمكن الحصول عليه من منحني الاستهلاك الكلي للشبكة. و هو يساوي حجم المياه الكلي المزود من الخزانات للشبكة. لكن حجم المياه الفعلي المزود من كل خزان غير معروف ومنه فان كل من منسوب الماء في الخزانات و التصريف الفعلي الخارج من كل منها في نهاية الفترة الزمنية مجهولين. و بالتالي لا يمكن تحليل الشبكة ستاتيكيا في نهاية الخطوة الزمنية وفقا لهذه الطريقة. اقترح Rae & Bree طريقة تقريب متتالي من أجل الحل الستاتيكي في نهاية الفترة الزمنية.

مراحل الطريقة:

يتم تقسيم الفترة الزمنية الكاملة المطلوب خلالها اجراء التحليل الديناميكي للشبكة الى عدة خطوات زمنية Δt، و يتم الربط بين الحل الستاتيكي للشبكة في نهاية كل خطوة زمنية بشكل متتالي باجراء عملية تكامل مرحلية:

1- معرفة في اللحظة الزمنية t المعلومات التالية:

أ- مناسيب الماء في الخزانات (H_r) و حجوم الماء فيها (v_r).

ب- الاستهلاك في حميع العقد $q_j(t)$ و $q_j(t+\Delta t)$.

2- باستخدام المعطيات من الخطوة 1 يمكن الحصول على حل ستاتيكي للشبكة في اللحظة t. يعطي هذا الحل المنسوب البيزومتري في جميع عقد الشبكة و الغزارات و الفواقد في كل انبوب و معدل الجريان من الخزانات $q_r(t)$.

3- بفرض ان معدل التصريف من الخزانات $q_r(t)$ يبقى ثابتا خلال الفترة الزمنية $(t+\Delta t,t)$، يمكن الحصول على مقدار التغير في حجم الماء في كل خزان:

$$\Delta V_r(t,t+\Delta t) = q_r(t)\Delta t \qquad r=1\text{-}M \text{ عدد الخزانات} \qquad 3\text{-}1$$

4- يتم حساب حجم الماء الكلي الخارج من الخزانات من المعادلة:

$$\Delta V_r = \sum_{r=1}^{M} q_r(t)\Delta t \qquad 3\text{-}2$$

5- من منحني الاستهلاك الكلي للشبكة يمكن حساب حجم الاستهلاك الكلي للشبكة خلال الفترة الزمنية المدروسة $D(t,t+\Delta t)$.

6- يكون مقدار الخطأ في توازن حجوم ماء الشبكة معطى بالمعادلة التالية:

$$E_p(t+\Delta t)=\sum_{r=1}^{M} q_r(t)\Delta t \pm D(t,t+\Delta t) \qquad 3\text{-}3$$

يتم توزيع مقدار الخطأ الحسابي لكامل الشبكة E_p على كل خزان بالنسبة و التناسب:الخطأ المحسوب للخزان r

$$e_{rp}(t+\Delta t)=\frac{q_r(t)}{\sum q_r(t)} * E_p(t,t+\Delta t) \qquad 3\text{-}4$$

7- يتم تطوير حساب حجم الخزان في اللحظة $t+\Delta t$ من المعادلة:

$$V_{rp}(t+\Delta t)=V_r(t)+q_r(t)*\Delta t+e_{rp}(t,t+\Delta t) \qquad 3\text{-}5$$

8- يمكن باستخدام منحني الحجم-المنسوب للخزان r: $V_r f_r(H_r)$ و اعتمادا على الحجم الحسابي $V_{rp}(t+\Delta t)$ معرفة المنسوب الحسابي $H_{rp}(t+\Delta t)$ للخزان r في اللحظة الزمنية $(t+\Delta t)$.

9- باستخدام $H_{rp}(t+\Delta t)$ و $q_j(t+\Delta t)$ يمكن اجراء حل سناتيكي للشبكة في اللحظة $(t+\Delta t)$ و الحصول على قيم $q_r(t+\Delta t)$ لجميع الخزانات.

10- يمكن حساب الخطأ في توازن حجوم الماء باستخدام معدلات الغزارات الداخلة و الخارجة الجديدة:

$$E_c(t,t+\Delta t)=\sum\ [q_r(t)+q_r(t+\Delta t)]\Delta t/2 \pm D(t,t+\Delta t) \qquad 3\text{-}6$$

يتم توزيع هذا الخطأ على جميع الخزانات بالنسبة و التناسب مع معدل الغزارة الوسطية الخارجة من الخزانات:

$$e_{rp}(t,t+\Delta t)=\frac{q_r(t)+q_r(t+\Delta t)}{\sum q_r(t)+\sum\ q_r(t+\Delta t)} * E_c(t,t+\Delta t) \qquad 3\text{-}7$$

11- يتم تصحيح حجم الماء في الخزان r باستخدام معادلة التصحيح:

$$V_{rc}(t+\Delta t)=V_r(t)+[q_r(t)+q_r(t+\Delta t)]*\Delta t/2+e_{rc}(t,t+\Delta t) \qquad 3\text{-}8$$

باستخدام هذا الحجم المصحح للماء في الخزان يمكن معرفة منسوب الماء في الخزان في اللحظة $t+\Delta t$ أي $H_r(t+\Delta t)$ و يتم ذلك بالنسبة لجميع الخزانات.

12- يتم حساب الفرق بين قيم منسوب الضاغط البيزومتري المصححة و المحسوبة سابقا لجميع الخزانات. فاذا كان الفرق ضمن حدود الدقة المسموحة يكون الحل الديناميكي للفترة الزمنية $(t+\Delta t)$ قد اكتمل و اذا لم يتحقق شرط الدقة تعاد عملية الحساب و التصحيح مرة اخرى لنفس الفترة الزمنية. عند اكتمال هذه الخطوة تعتبر القيم المصححة $H_{rc}(t+\Delta t)$ و $V_{rc}(t+\Delta t)$ هي القيم المعتمدة لـ $H_r(t+\Delta t)$ و $V_r(t+\Delta t)$ لجميع الخزانات ، وتعتبر اساسا لاجراء الحسابات الديناميكية للخطوة الزمنية التالية.

3-4- الدراسة الاقتصادية للشبكات :

لإجراء التقييم الاقتصادي لشبكة أنابيب يمكن أن تصنف المنظومة كما يلي:

1- السحب ثابت أم متغير .

2- جريان بالراحة أم ضخ.

3- شبكة شجرية أو حلقات

تصنف بعض الشبكات على أنها سهلة التحليل، كالمنظومات الشجرية مع سحوب ثابتة.و تصنف معظم أنظمة توزيع الماء في المدن من نوع شديد التعقيد ، فهي شبكات حلقية ، و تستجيب للحمولات الطارئة ، ذات سحوبات متغيرة ، و تشغل و تطفأ المضخات في بعض أجزاء الشبكة. في هذه الأنظمة المعقدة لا يمكن الوصول إلى تصميم اقتصادي أمثلي باستخدام الرياضيات و البرامج الحاسوبية. يبقى الحدس الهندسي المعتمد على الخبرة و الفهم الشامل للمكونات الأساسية للشبكة ضروري للوصول إلى تصميم قريب من الأمثلي.

تساهم بعض الإجراءات في تعقيد هذه الأنظمة و منها:

1- اعتبارات الوثوقية: كوجود مصدر طاقة إضافي، التحكم الآلي و اليدوي، أنواع التخزين، مدى و نوع أتمتة التشغيل.

2- السحب: التغير الزماني والمكاني، أنماط المستفيدين، الكلف المترتبة على فشل التوزيع، متطلبات الحريق، اتجاهات مستقبلية.

3- متطلبات التخزين: التخزين الجوفي مع الضخ مقابل استخدام الخزانات العالية و الأرضية، حجوم تخزين لساعات الذروة، موقع وتغير منسوب الماء.

4- متطلبات الضغط الأعظمي و الأصغري ، المناطق السكنية، المناطق الصناعية و الأعمال ، مناطق التغذية المستقبلية.

5- التوزع السكاني و الاتجاهات المستقبلية.

6- التغيرات الطبوغرافية، سكورة التحكم بالضاغط (PBV's ,PRV's) مقابل فصل الأنظمة.

7- وجود أنظمة للري أو مكافحة الحريق، و الاستخدامات الأخرى مقابل الشبكة أحادية الاستخدام.

3-5- الكلفة الدنيا:

الهدف من التصميم الفني الاقتصادي هو اختيار قطر الأنبوب الذي يحقق الاشتراطات الهيدروليكية و الذي يؤدي إلى تكاليف إجمالية أصغريه، باعتبار كلفة الإنشاء و كلفة التشغيل السنوية. و إحدى طرق التصميم هي حل المسألة لأقطار مختلفة، حساب التكاليف لكل حالة، ورسم مخطط يظهر التكلفة كتابع لقطر الأنبوب. في حال ضخ المياه، تشمل كلفة الإنشاء الأنابيب و المضخات، و تشمل كلفة التشغيل السنوية تشغيل و صيانة المضخات. و بينما تزداد تكاليف الأنبوب بزيادة قطر الأنبوب، تنقص تكاليف المضخات. يوجد قطر يحقق أصغر مجموع للتكلفة و هو القطر الاقتصادي بعد تقريبه لأقرب قطر نظامي.

أما في حال شبكة أنابيب يفضل اختيار التكلفة كتابع لميل خط التدرج الهيدروليكي HGL. إن ميل HGL هو فاقد الضاغط في أنبوب مقسما على طول الأنبوب و يمكن بضربه بعامل تحويله إلى كلفة واحدة الطول.

بحل معادلة Darcy-Weisbach بالنسبة للقطر: D={fQ2/2gS(π/4)2}0.2، حيث S ميل HGL، و f يعطى بعلاقة Colebrook-White .

تحسب التكلفة كما يلي:

1- من أجل S معينة تحل معادلة Darcy-Weisbach و Colebrook-White للحصول على القطر.

2- تحدد من الجداول كلفة واحدة الطول للقطر الناتج.

3- تحسب كلفة الضخ لواحدة الطول من الأنبوب بالعلاقة :

$$C_e = \gamma QRt(S+\Delta H/L)/(eC) \qquad 3\text{-}9$$

حيث R: كلفة واحدة الطاقة، ΔH: الفرق في الضاغط الكلي بين طرفي الأنبوب، t: زمن الضخ، e: معامل كفاءة المضخة – المحرك ، C: ثابت واحدة.

ترسم كلا الكلفتين كتابع لميل HGL و التصميم الاقتصادي يحقق مجموع أصغري.

3-6- التصميم الاقتصادي للشبكات:

حالة مصدر تغذية رئيسي واحد :

في أنظمة الشبكات الكبيرة تتغير تكلفة إنشاء الأنابيب بشكل واسع من مكان لأخر لنفس القطر. يضاف في بعض الأماكن إلى سعر الأنابيب، كلفة تشغيل آليات الحفر فقط. توجد في أماكن أخرى تكاليف استبدال الطريق، واستبدال أو إعادة تأهيل منشآت خدمية ، تكاليف مرورية، و تكاليف أخرى ، تتجاوز كثيرا سعر الأنبوب ، بحيث لا يوجد فارق في التكلفة بحسب القطر.

آما التكلفة السنوية فتختلف بحسب ما إذا كان الجريان بالراحة ، أو أن الماء يأتي مباشرة من مضخة ،أو من خزان يستقبل الماء بالضخ. في الحالة الأخيرة تشمل التكلفة السنوية كلفة التخزين وكلفة الضخ. إذا تتغير التكلفة تبعا للمنطقة و موقع النظام المائي.

بفرض مخطط شبكة حيث الأطوال و أماكن الأنابيب و أماكن الخزانات محددة. و لغرض التصميم يفرض أن السحوبات معروفة و ثابتة. و باعتبار صعوبة تحديد الكلف على مدى حياة الشبكة و التغير في الغزارات، يمكن استخدام ميل HGL واحد لكل الأنابيب بدلا من إيجاد ميل HGL الأقل تكلفة لكل أنبوب.

يمكن تلخيص طريقة تصميم شبكة أنابيب اقتصادية بالخطوات العامة التالية:

1- إزالة الأنابيب التي تنقل غزارات صغيرة بحيث يتم الحصول على شبكة شجرية.

2- تحديد السحوبات التصميمية في ساعة الذروة.

3- باستخدام السحوبات، تحسب الغزارات في الأنابيب.

4- تحسب أقطار الأنابيب باعتماد ميل HGL يتوافق مع ضغوط التشغيل المطلوبة.

5- حساب تكاليف الأنابيب و تكاليف الضخ و التشغيل .

6- تكرار الخطوات 4 ، 5 لمجوعة ميول HGL ، للحصول على الكلفة الدنيا.

7- تعطى للأنابيب المزالة في الخطوة –1- أقطار صغيرة . تحل المنظومة لعدة سحوبات لمعرفة أي مشكلة في الأداء و محاولة حلها.

8- اعتمادا على معرفة أداء الشبكة ،نشكل جدول منطق وقواعد لتشغيل الشبكة. يتم اختيار منسوب و حجم و ارتفاع الخزانات و التي ستؤدي إلى تشغيل يومي جيد، توفير السحوبات المتغيرة المتوقعة، و تحافظ على ضاغط أعلى من الأصغري و لا تسبب أي ضغوط زائدة. ثم يختبر أداء الشبكة بالمحاكاة بالزمن الممتد.

3-7- إرشادات تصميمية للشبكات المعقدة:

عند تصميم شبكة تتغذى من عدة مصادر رئيسية يمكن اعتماد إجراء عام يرتكز على الخطوات التالية:

1- تحديد مصدرين مسيطرين للنظام، و تحديد المسار المسيطر الواصل بين المصدرين.

2- ربط المصادر الأخرى إلى المسار المسيطر بأقصر مسار من الأنابيب تسمى مسار أولي.

3- وصل العقد المتبقية من الشبكة، العقد غير المشمولة بالمسار المسيطر أو الأولي بأقصر مسار من الأنابيب إلى عقدة على المسار المسيطر.

4- وضع ضاغط مناسب في عقد الشبكة. الضاغط الكلي في عقدة البداية لكل مسار يساوي الضاغط الأصغري المسموح زائدا منسوب العقدة. يتم الانتقال لتعيين الضاغط في العقد التالية باستخدام ميل HGL الأمثلي و استنتاج الغزارات.

5- يحسب الضاغط الكلي في العقد على المسار المسيطر، الذي لم يحسب بالخطوة –4- بإجراء يسمح باختيار القطر المثالي أو القريب من المثالي، و يساعد المصمم في تحديد الضواغط الدنيا التي يجب أن توفرها المصادر المسيطرة.

6- تحديد الضواغط الكلية و الغزارات في الأنابيب من الخطوات -1- حتى –5-، يمكن تحديد الأقطار من علاقة Darcy-Weisbach أو Hazen - Williams.

- مثال: الشبكة في الشكل 3-1 تتغذى من خزانين تعطى علاقة الحجم بالمنسوب لهما في الجدول 3-1، و يعطى استهلاك أو السحوبات في العقد كل خطوة زمنية $\Delta t=4$ hrs في الجدول 3-2، من منحني الإستهلاك لكافة الشبكة يمكن حساب حجوم استهلاك الشبكة في الجدول 3-3، يتغذى الحزان (1) بالمياه خلال الفترة الزمنية 4-12 hr بمعدل ثابت مقداره 14 m^3/min، و يتغذى الحزان (2) بالمياه خلال الفترة الزمنية 12-20 hr بمعدل ثابت مقداره 10 m^3/min، في اللحظة t=0 hr منسوب الماء في الخزان (1) هو 101.2 و في الخزان (2) هو 102.

المطلوب إجراء التحليل الديناميكي للشبكة من 0 hr إلى 4 hr.

Reservoir Capacity in m^3	Hydraulic Gradient level in m for reservoir at	
	Node 1	Node 2
0	100.00	98.00
1000	100.60	98.80
2000	101.20	99.60
3000	101.80	100.40
4000	102.40	101.20
5000	103.00	102.00
6000	103.60	102.80

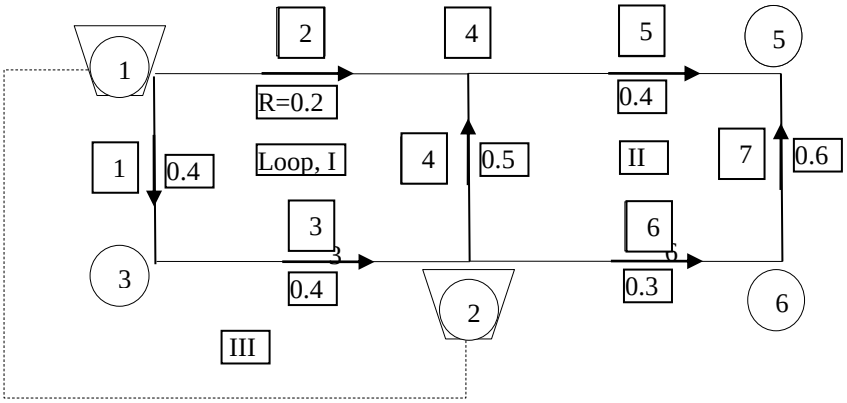
Tab: 3-1

Node	Nodal Demand in m^3/min at time						
	0 hr	4 hr	8 hr	12 hr	16 hr	20 hr	24 hr
3	1.0	2.0	3.0	3.0	2.0	2.0	1.0
4	0.8	1.6	2.0	2.6	1.2	1.6	0.8
5	1.0	3.0	4.0	2.0	4.0	2.0	1.0
6	0.6	1.6	1.0	1.2	2.0	1.4	0.6
Total Demand	3.4	8.2	10.0	8.8	9.2	7.0	3.4

Tab: 3-2

Time interval Hours	Total Network demand m^3
0-4	1488
4-8	2256
8-12	2304
12-16	2184
16-20	1992
20-24	1296

Tab: 3-3



الشكل 3-1

في اللحظة الزمنية t=0:

$H_1(0)$=101.2 m so $V_1(0)$=2000 m^3, $H_2(0)$=102 m so $V_2(0)$=5000 m^3,

السحوبات في العقد:

$q_3(0)$=1 m^3/min, $q_4(0)$= 0.8 m^3/min, $q_5(0)$=1 m^3/min, $q_6(0)$= 0.6 m^3/min,

بإجراء تحليل ستاتيكي من أجل t=0 hr تنتج الغزارات التالية في الأنابيب:

$Q_1(0)$=-0.7853 m^3/min, $Q_2(0)$=-0.1996 m^3/min,
$Q_3(0)$=-1.3853 m^3/min, $Q_4(0)$= 1.2799 m^3/min,
$Q_5(0)$= 0.2804 m^3/min, $Q_6(0)$= 1.3196 m^3/min,
$Q_7(0)$=-0.7196 m^3/min,

المنسوب البيزومتري في العقد:

$H_3(0)$=101.268 m ,$H_4(0)$=101.21 m , $H_5(0)$=101.172 m , $H_6(0)$=101.499 m,

املاء، افراغ الخزانات:

الخزان (1) املاء

$q_1=-(Q_1+Q_2)=-(-0.3853-0.1956)$
$=0.5849\ m^3/min$

الخزان (2) تفريغ

$q_2=Q_3-Q_4-Q_6=-1.3853-0.2799-1.3196$
$=-3.9849\ m^3/min$

بفرض أن الجريان من الخزانين ثابت خلال الفترة 0-4 hr، الجريان من الخزانين:

$\Delta V_1(0,4)=0.5349*240=140.38\ m^3$, $\Delta V_2(0,4)=-3.9349*240=-956.38\ m^3$
$\sum\Delta V(0,4)=0.5349*240-3.9349*240=-816\ m^3$

حجم الاستهلاك الكلي للشبكة خلال الفترة 0-4 hr من الجدول 3-3 هو 1488 m^3.

الخطأ في توازن حجوم الماء لكامل الشبكة:

$E_p(0,4)$=-816+1488 =672 m^3

$e_{1p}(0,4)$=140.38/816*672= 115.6 m^3

$e_{2p}(0,4)$=-956.38/816*672= -787.6 m^3

حجوم المياه في الخزانات في اللحظة t=4 hr كما يأتي:

$V_{1p}(4)= V_1(0)+ \Delta V_1 (0,4)+ e_{1p}(0,4)$

=2000+140.38+115.6=2255.98 m^3

$V_{2p}(4)= V_2(0)+ \Delta V_2 (0,4)+ e_{2p}(0,4)$

=5000-956.38-787.6 =3256.02 m^3

من علاقة حجم الخزان بمنسوبه للخزانين (1) و (2) من الجدول (1) يستقرأ المنسوب:

$H_{1p}(4)$=101.2 +255.98/1000*(101.8-101.2)=101.354 m

$H_{2p}(4)$=100.4 +256.02/1000*(101.2-100.4)=100.605 m

بمعرفة استهلاك العقد في اللحظة t=4 hr:

$q_3(4)$=2 m^3/min, $q_4(4)$= 1.6 m^3/min, $q_5(4)$=3 m^3/min, $q_6(4)$= 1.6 m^3/min.

بإجراء حل ستاتيكي يعطي معدل الجريان من الخزانين:

$q_1(4)$=-4.2086 m^3/min, $q_2(4)$= -3.9914 m^3/min

يتم افراغ الخزانين في اللحظة t=4 hr.

إعادة حساب الخطأ في توازن حجوم المياه للخزانين:

$E_c(0,4)$=[(0.5849-4.2086)+(-3.9849-3.9914}]*240/2+1488 =96 m^3.

$e_{1c}(0,4)$=(0.5849-4.2086)/[(0.5849-3.9849)+(-4.2086-3.9914)]*96

=29.99 m^3 (outflow)

$e_{1c}(0,4)$=(-3.9849-3.9914)/[(0.5849-3.9849)+(-4.2086-3.9914)]*96

=66.01 m^3 (outflow)

تصحيح حجوم المياه في الخزانات:

$V_{1c}(4)= V_1(0)+[q_1 (0)+q_1(4)]*\Delta t/2+ e_{1c}(0,4)$

=2000+(0.5949-4.2086)*240/2-29.99=1535.17 m^3

$V_{2c}(4)= V_2(0)+[q_2 (0)+q_2(4)]*\Delta t/2+ e_{2c}(0,4)$

=5000+(-3.9849-3,9914)*240/2-66.01=3976.83 m^3

و من علاقة النتسوب بالحجم لكل خزان ينتج:

$H_{1p}(4)- H_{1c}(4)$=101.354-100.921 = 0.433 m.

$H_{2p}(4)- H_{2c}(4)$=100.605-101.181 = -0.576 m.

و هكذا إلى أن يصبح الفرق المطلق بين المناسيب المحسوبة و المصححة أصغر من حد معين عادة يؤخذ 0.001، الجدول 3-4.

الحل النهائي للفترة الزمنية 0-4 hr هو:

$Q_1(4)$= 0.9525 m^3/min, $Q_2(4)$= 2.1981 m^3/min, $Q_3(4)$=-1.0474 m^3/min,
$Q_4(4)$= 1.3983 m^3/min, $Q_5(4)$= 1.9962 m^3/min, $Q_6(4)$= 2.6036 m^3/min,
$Q_7(4)$= 1.0037 m^3/min.
$q_1(4)$= -3.1506 m^3/min, $q_2(4)$= -5.0494 m^3/min.
$V_1(4)$=1671.7 m^3, $V_2(4)$=3841.2 m^3,
$H_1(4)$= 101.003 m, $H_2(4)$= 101.073 m, $H_3(4)$= 100.639 m,
$H_4(4)$= 100.143 m, $H_5(4)$= 98.704 m, $H_6(4)$= 99.308 m,

Iteration steps	Predicted flow m^3/min, t=4 hr, for		Predicted flow m^3/min, t=4 hr, for	
	Res 1	Res 2	Res 1	Res 2
initial	0.58	-3.9849	100.921	101.191
1	-4.2081	-3.9918	101.021	101.048
2	-2.9072	-5.2928	100.998	101.079
3	-3.2056	-4.9935	101.004	101.072
4	-3.1376	-5.0624	101.002	101.073
5	-3.1534	-5.0465	101.003	101.072

Tab: 3-4

حل مسألة المحاكاة بالزمن الممتد EPS بالاستعانة ببرنامج WaterCad:

- تشكيل نمط السحوبات Pattern:

1- فتح نافذة معدل عقدة Junction Editor (بالنقر المزدوج على العقدة) و اختيار تبويبة Demand.
2- اختيار النمط (اسمه)، اختيار Demand في السطر الأول، و كتابة الحمولة الاساس، مع الانتباه للوحدة.
3- اضغط الخلية المقابلة في عمود النمط، اختيار زر (...)Ellipsis، يفتح مدير النمط.
4- اضغط زر Add لانشاء نمط جديد.
5- في صندوق حوار Pattern:
   5-1- كتابة اسم النمط في حقل Label.
   5-2- وضع Start Time على قيمة، مثل 12:00:00 AM.
   5-3- وضع Starting Multiplier على قيمة، مثل 0.5.
   5-4- تحت Format اختر الزر Stepwise.
   5-5- في الجدول Pattern table أدخل الزمن و المضاريب times, multipliers.
   5-6- اضغط ok عند الانتهاء للعودة إلى Pattern Manager.
6- اضغط ok لإغلاق Pattern Manager و العودة إلى معدل عقدة.
7- في صندوق قائمة النمط Pattern list اختر النمط المطلوب.
8- اضغط ok للخروج من معدل العقدة.
9- أدخل إلى معدل عقدة لجميع العقد التي يراد فيها أن تكون السحوبات بحسب أحد الأنماط.

- اجراء المحاكاة بالزمن الممتد Run EPS:

1- اضغط على Calculation Options خيارات الحساب.
2- الضغط المزدوج على Base Calculation Options لفتح properties manager و اختر EPS من قائمة Time Analysis Type، اضغط اغلاق.
3- اضغط Validate ثم OK .
4- اضغط Compute لتحليل النموذج.

الفصل الرابع

التحليل النوعي في الشبكات

4-1- مقدمة.

4-2- التحليل النوعي للشبكات.

4-3- معادلات التحليل النوعي للشبكات.

4-4- خوارزميات حل معادلات التحليل النوعي للشبكات.

التحليل النوعي في الشبكات

Quality Analysis

4-1- **مقدمة**:

ان الغاية من دراسة المنظومات الهيدروليكية هو تامين كمية الماء اللازم بالضاغط الكافي لايصال الماء الى كافة المستهلكين، مع المحافظة على نوعية الماء بحيث تبقى المواصفات الفيزيائية، الكيميائية و الجرثومية ضمن الحدود المسموحة من قبل WHO.

يعطي الحل الستاتيكي لمنظومة هيدروليكية تصورا عاما عن سلوك المنظومة في حالة الغزارة الساعية العظمى، في لحظة معينة. و يعطي الحل الديناميكي للمنظومة هيدروليكية صورة اكثر عمقا و تفصيلا عن سلوك المنظومة خلال فترة زمنية تمتد لتشمل يوم كامل. بعد تزويد خوارزمية الحل بتوصيف لكامل مكونات المنظومة، يعطي الحل الستاتيكي و الديناميكي صورة هيدروليكية تشمل الغزارات، السرع، الفاقد في الضغط (خط التدرج الهيدروليكي) في انابيب المنظومة، الضاغط في العقد. و للحصول على تصور عن تطور الخواص النوعية للماء اثناء عملية نقل الماء بالشبكات يلزم تطوير نظرية و خوارزمية تعطي تطور خصائص الماء النوعية في الشبكات.

4-2- **التحليل النوعي للشبكات:**

ان التحليل النوعي للشبكات هو تطبيق النموذج الرياضي الذي يصف ثلاثة متغيرات تعطي صورة و اضحة عن تطور نوعية الماء في الشبكات، هذه المتغيرات هي:

1- العمر الوسطي للماء. Water Age Analysis

2- تتبع المصدر. Trace Analysis

3- تركيز المركبات الكيميائية. Constituent Analysis

ان العمر الوسطي للماء في عقدة ما هو الزمن الوسطي الذي يستغرقه الماء للوصول من المصادر(الخزانات) الى هذه العقدة من عدة طرق .ان صغر هذا الزمن (عمر الماء) دليل على جودة نوعية الماء.

تتبع المصدر، نسبة الغزارة الداخلة الى عقدة ما -1- القادمة من عقدة معينة(خزان) -2- الى الغزارة الكلية الداخلة الى العقدة -1- بالتالي فان نوعية الماء الخارج من الخزان الذي يساهم باكبر غزارة في عقدة تكون مسيطرة على نوعية الماء في هذه العقدة.

تركيز المركبات الكيميائية، تعني انه اذا علم تركيز مركبات في عقدة ما -1- في زمن ما t فانه يمكن معرفة تركيز هذا المركب في عقدة ما -2- في زمن لاحق $t+\Delta t$.

4-3- معادلات التحليل النوعي للشبكات:

تعطى المعادلة العامة الناظمة لتطور احد متغيرات نوعية الماء في الزمان وفي المكان بالشكل التالي:

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} + u_i \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} - R[C_i(x,t)] = 0 \qquad 4\text{-}1$$

حيث $Ci(x,t)$ (mg/l) تركيز المركب في السائل على مسافة x من عقدة بداية الانبوب i.

u_i (m/s) سرعة الجريان الوسطية في الانبوب i، $R[C_i(x,t)]$ (1/s) تابع معدل التفاعل.

و هي معادلة النقل و التفاعل وحيد البعد. 1D-advective – reactive transport equation

هذه المعادلة تفاضلية جزئية و تحتاج الى معادلتين: الشرط الابتدائي في اللحظة t_0، و شرط محيطي عند x_0. معادلة الشرط المحيطي في عقدة البداية j من الانبوب i، $x_0=0$:

$$C_i(0,t) = \left(\sum_k \left(Q_k C_k(L_k,t)\right) + M_j\right) \Big/ \left(\sum_k Q_k + Q_{sj}\right) \qquad 4\text{-}2$$

الجمع على الانابيب k التي عقدة نهايتها j ، L_k: طول الانبوب k، M_j: كتلة المركب المدخلة من مصدر خارجي الى العقدة j ، Q_{sj}: غزارة المصدر الخارجي.

معادلة الشرط المحيطي في خزان بمنسوب ماء متغير، عقدة نهاية للانبوب i :

$$C_T(t+\tau) = \frac{1}{V_T(t) + Q_i\tau}[C_i(L_i,t)Q_i\tau + V_T(t)C_T(t)] \qquad 4\text{-}3$$

حيث $C_T(t)$ (mg/l): التركيز في الخزان بمزج كامل، $V_T(t)$ (l): حجم الخزان، Q_i (l/s): غزرة الانبوب i.

يستقبل الانبوب j الماء الخارج من الخزان بمزج كامل:

$$C_j(0,t+\tau)=C_T(t) \qquad 4\text{-}4$$

تشكل المعادلات 4-1 و 4-3 و معادلات الشروط الابتائية مجموعة مترابطة من المعادلات التفاضلية – الجبرية على جميع انابيب الشبكة.

4-3-1- **نموذج معدل التفاعل:** Reaction Rate Model

تتضمن المعادلة -1- التي تمثل نموذج رياضي لنوعية الماء، الالية التي تحكم تناقص او تزايد تركيز مركب عن طريق التفاعل خلال جريان الماء في المنظومة الهيدروليكية . يمكن للتفاعل ان يتم ضمن كتلة الماء (حجمي) ، مع المركبات الموجودة في الماء، و مع مادة الانبوب على طول جدار الانبوب. و عموما ان أي مركب ضمن كتلة الماء في انبوب معين، سيتناقص تركيزه بمعدل يساوي:

$$R(C_i)=-k_bC_i-(k_f/(R_{hi}))(C_i-C_{wi}) \qquad 4\text{-}5$$

حيث k_b (1/s): ثابت معدل تفاعل حجمي (درجة اولى)، C_i (mg/l): تركيز المركب في السائل، k_f (m/sec): معامل انتقال الكتلة بين السائل و جدار الاتبوب، R_h (m): نصف القطر الهيدروليكي، C_{wi} (mg/l): تركيز المركب على جدار الانبوب.

ينمذج الحد الاول التفاعل الحجمي، بينما ينمذج الحد الثاني معدل انتقال المركبات بين السائل و جدار الانبوب.

بافتراض ان معدل التفاعل عند جدار الانبوب هو من الدرجة الاولى بالنسبة لـ C_{wi}، و انه يساوي معدل انتقال المركبات من السائل الى جدار الانبوب (لا يحدث تراكم)، يمكن كتابة معادلة توازن الكتلة من اجل التفاعل عند جدار الانبوب:

$$k_f(C_i-C_{wi})=k_wC_{wi} \qquad 4\text{-}6$$

حيث k_w (m/sec) : ثابت معدل التفاعل عند جدار الانبوب.

بحل المعادلة 4-6 بالنسبة لـ C_{wi} و التعويض في 4-5 تنتج معادلة معدل التفاعل التالية:

$$R(C_i)=-KC_i \qquad 4\text{-}7$$

حيث K: ثابت معدل التفاعل الكلي، الدرجة الاولى، يساوي: $K=k_b+k_wk_f/(RH_i(k_w+k_f))$

تقدم العلاقة 4-7 نموذجا لحساب معدل التفاعل في حال تناقص تركيز المركب، مع نقل للكتلة من الغزارة الحجمية الى جدار الانبوب. وباسقاط الاشارة السالبة امام K

تتحول العلاقة 4-7 الى نموذج لحساب معدل التفاعل في حال تزايد تركيز المركب، مع نقل للكتلة من الغزارة الحجمية الى جدار الانبوب.

اذا كان ثابت معدل التفاعل الكلي لمركب ما صفرا، تتحقق مصونية المركب. و اذا كان معدل التفاعل تابع من الدرجة الاولى، يمكن ايجاد حل تحليلي لمعادلة نقل المركبات و التفاعل العامة من الشكل:

$$C_i(x,t+\tau) = C_i(x-u_i\tau,t)\exp(k\tau) \qquad 4\text{-}8$$

حيث τ (s): الخطوة الزمنية للتحليل النوعي، u_i (m/s): سرعة الجريان الوسطي.

x (m): المسافة من عقدة البداية، موجبة باتجاه الجريان.

و لمعرفة معدل التفاعل $R(C_i)$ يجب تحديد k_b ثابت معدل تفاعل الغزارة الحجمية و k_w ثابت معدل التفاعل مع جدار الانبوب، تجريبيا، اما k_f ثابت نقل المادة فيحدد كتابع لعدد شرود اللابعدي Sherwood Number من المعادلة التالية:

$$k_f = S_h D/d \qquad 4\text{-}9$$

$$S_h = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.83} S_c^{\,0.333} \qquad \text{For} \quad \mathrm{Re} \geq 2300 \qquad 4\text{-}9a$$

$$S_h = 3.65 + 0.668(d/L)\mathrm{Re}\,S_c / \{1 + 0.04[(d/L)\mathrm{Re}\,S_c]^{0.67}\} \qquad \text{For} \quad \mathrm{Re} \prec 2300 \qquad 4\text{-}9b$$

حيث k_f (m,s): معامل نقل الكتلة، S_h: عدد شرود، Re: عدد رينولدز، d (ft): قطر الانبوب،

S_c: عدد شميدت Schmidt Number (ν/D)، L (ft): طول الانبوب،q (cfs): غزارة الانبوب،

A (ft^2): مساحة مقطع عرضي للانبوب، ν (ft^2/sec): اللزوجة الحركية للسائل،

D (ft^2/sec): الانتشار الجزيئي لمركب في السائل.

تطبق المعادلة 4-9a على الجريان المضطرب حيث معامل نقل الكتلة مستقل عن الموضع على جدار الانبوب. و تعطي المعادلة 4-9b، في حالة الجريان الصفائحي، قيمة وسطية لمعامل نقل الكتلة على طول الانبوب.

4-3-2- معدل التفاعل عند جدار الانبوب:

تعتمد تفاعلات نوعبة الماء التي تحدث عند او على جدار الانبوب على تركيز المركبات في الغزارة الحجمية بحسب المعادلة التالية:

$$R = (A/V)K_w C^n \qquad 4\text{-}10$$

حيث K_w: معامل معدل التفاعل مع جدار الانبوب، A/V: مساحة لمعة الانبوب على الحجم ضمن الانبوب.

يجب تعديل K_w اعتمادا على محددات نقل الكتلة بين السائل و جدار الانبوب، و يعتمد K_w على درجة الحرارة و عمر و نوع مادة الانبوب.

4-3-3- نمذجة عمر الماء و تتبع المصدر Water Age and Source Tracing**:**

من اجل نمذجة عمر الماء يمكن استحدام المعادلة 4-1 بعد اعادة تاويل التابع C بانه عمر الماء، و وضع حد التفاعل R(C) كثابت مساو للواحد، و اعتبار أن الماء يدخل الى الشبكة من خزان بعمر مساو للصفر. و عمر الماء مقياس كلي لنوعيته.

و يمكن بالمعادلة 4-1 نمذجة تتبع المصدر مع الزمن أي نسبة مساهمة خزان ما إلى مجموع مساهمات جميع الخزانات بالغزارة الكلية الداخلة الى عقدة ما -1-، و في هذه الحالة يعبر التابع C عن نسبة الماء القادم من خزان ما، مع وضع حد التفاعل صفرا. يقدم تتبع المصدر اداة مفيدة للتحليل النوعي لمنظومات التوزيع التي تستمد الماء من عدة مصادر مختلفة.

4-3-4- ارتباط خشونة الانبوب و التفاعل مع جدار الانبوب: Wall Reaction – pipe Roughness Correlation

عندما يزداد عمر مادة الانابيب تزداد خشونة هذه الانابيب بفعل الترسيب و تشكل النتوءات بسبب التاكل الكيميائي على جدران الانابيب encrustation and tuburculation of corrosion. تؤدي هذه الزيادة في الخشونة الى انقاص معامل هازن ويليامز Hazen – Williams C-factor ، او زيادة معامل خشونة دارسي و ايسباخ Darcy – Weisbach roughness coefficient مما يؤدي الى زيادة فاقد الضغط الطولي(الاحتكاكي) عند الجريان خلال الانبوب.

يوجد العديد من الشواهد الحقلية التي تسمح باقتراح ان العمليات التي تزيد الخشونة مع الزمن، تزيد تفاعلية جدران الانابيب مع بعض المركبات الكيميائية، خصوصا الكلور و المعقمات الاخرى.

ادت هذه الشواهد الى العمل على استنتاج عدة علاقات لـ K_w معامل التفاعل مع جدار الانبوب كتابع للمعاملات التي تصف خشونة الانابيب، مبينة في الجدول التالي:

علاقة فاقد الضغط	علاقة التفاعل مع الجدار
Hazen-Williams	$K_w = F / C$
Darcy-Weisbach	$K_w = -F / \log(e / D)$
Chezy-Maning	$K_w = F * N$

الجدول 4-1

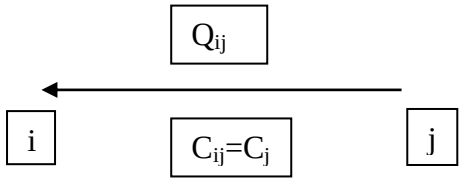
C : معامل هازن ويليامز، e : خشونة دارسي وايسباخ، D: قطر الانبوب

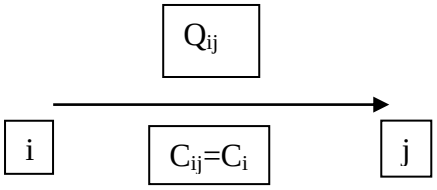
N : معامل خشونة مانينغ، F : معامل خشونة الانبوب-التفاعل مع جدار الانبوب.

يقاس المعامل F من القياسات الحقلية و يختلف المعنى الذي ياخذه تبعا لمعادلة فاقد الضغط المستخدمة. ميزة هذه الطريقة انها تتطلب بارامتر واحد F لتتبع تغير معامل التفاعل مع جدار الانبوب عبر الشبكة بشكل فيزيائي مفهوم.

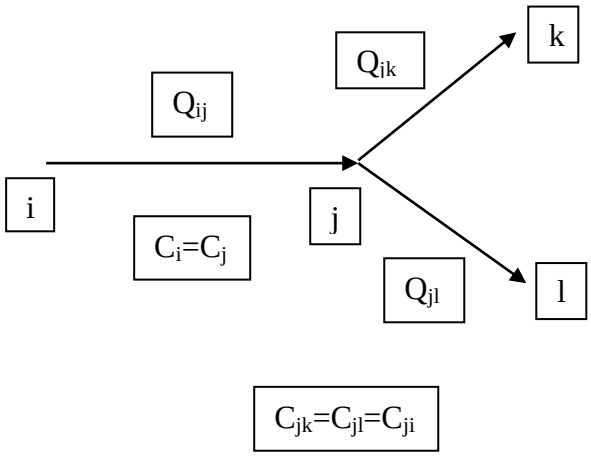
4-3-5- النموذج النوعي:

عموما ، في حالات كثيرة ، يمكن بتقريب جيد اعتبار ان تراكيز المركبات تبقى ثابتة على طول الانبوب، أي لا يوجد تفاعل للمركب مع المركبات الاخرى في الماء أو مع جدار الانبوب. في هذه الحالة يمكن بناء النموذج النوعي كما يلي:

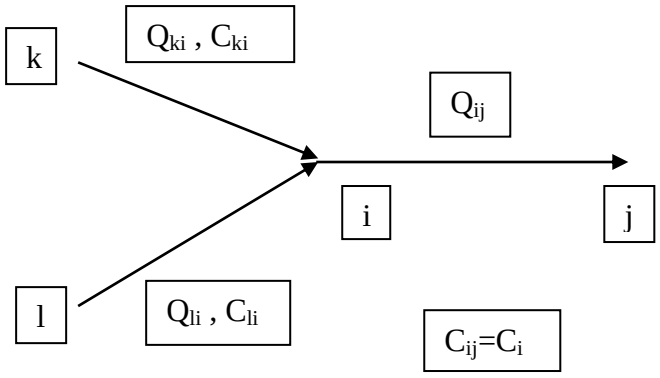




يفترض ان الغزارات الداخلة الى عقدة تمزج بشكل كامل انيا. وهذا مبرر لان الجريان المضطرب يساعد على ذلك في العقد.



عقدة توزيع Distribution Junction



عقدة مزج Dilution Junction

$$C_i = \frac{C_{ki}Q_{ki} + C_{li}Q_{li}}{Q_{ki} + Q_{li}} = \frac{\sum C_i Q_i}{\sum Q_i} \qquad 4\text{-}13$$

في حال وجود مصدر لمركب يضاف الى المعادلة السابقة.

معادلة الاستمرار:

$$Q_{ki} + Q_{li} = Q_{ij} \qquad 4\text{-}14$$

معادلة استمرار مركب في الجريان:

$$C_{ki}Q_{ki} + C_{li}Q_{li} = C_i Q_{ij} \qquad 4\text{-}15$$

4-3-6- **الشروط الاولية** Initial Conditions**:**

تفرض شروط اولية قبل البدء بالتحليل النوعي لحساب عمر الماء، تتبع المصدر، تركيز المركبات. هذه الشروط الاولية غير معلومة عادة، يجب تقدير هذه القيم من البيانات الحقلية، تحليل نوعي سابق، او مصدر بيانات معين.

و لتجاوز مشكلة الشروط الاولية المجهولة في جميع نقاط الشبكة، يجب ان تكون فترة التحليل طويلة بما يكفي بحيث تصل المنظومة الى حالة التوازن. علما ان الوصول الى قيم ثابتة لمتغيرات التحليل النوعي ليس شرطا للوصول الى حالة التوازن، بل يتم الوصول الى حالة التوازن عند انجاز نمط كامل (تابع زمني) لعمر الماء، لتتبع المصدر، لتركيز المركبات. و عادة يتم الوصول الى حالة النوازن في الانابيب خلال فترة زمنية قصيرة، بينما تصل الخزانات حالة التوازن اكثر بطأ من الانابيب. و لهذا يجب اعطاء المزيد من الاهتمام عند وضع الشروط الاولية للخزانات، للتاكد من دقة النموذج.

4-4- خوارزميات حل معادلات التحليل النوعي للشبكات:

يوجد عدة طرق نظرية لحل معادلات التحليل النوعي للماء. و تقسم هذه الطرق عموما الى زمرتين، اويلر او لاجرانج Eulerian or Lagrangian ، اعتمادا على طريقة التحكم الحجمي التي تتخذ. يقسم نموذج اويلر انابيب المنظومة الهيدروليكية الى اجزاء ثابتة و يتتبع التغيرات التي تحدث عندما يجري الماء خلال هذه الاجزاء. يقسم نموذج لاجرانج المنظومة الى حجوم تحكم، ويتتبع هذه الحجوم المائية عندما تتحرك عبر المنظومة.

4-4-1- طريقة الحجوم المجزأة : DiscreteVolume Method (DVM)

ان طريقة الحجوم المجزأة (DVM) تقع في زمرة اويلر حيث تقسم كل انبوب اجزاء متساوية بحجوم ذات مزج كامل. يتم حساب التفاعلات ضمن كل جزء ، تنقل المركبات بعد ذلك الى الجزء المجاور باتجاه التيار. وفي العقد تتجمع الكتل و الغزارات الاتية من كل الانابيب التي تدخل العقدة(بافتراض المزج الكامل). ينتقل التركيز الناتج الى اجزاء الانابيب الخارجة من العقدة. تكرر هذه العملية من اجل كل خطوة زمنية للتحليل النوعي، و ذلك حتى حدوث شرط هيدروليكي مختلف. وعندها يعاد تقسيم الانابيب بحسب الشروط الهيدروليكية الجديدة و تستمر العملية.

4-4-2- **طريقة الزمن المقاد :** Time Driven Method (TDM)

ان طريقة الزمن المقاد (TDM) تقع في زمرة لاجرانج. تقسم هذه الطريقة انابيب المنظومة الى اجزاء و يتابع التركيز و حجم هذه الاجزاء عندما تنتقل عبرالانابيب. مع كل خطوة زمنية ، يمتد الجزأ في بداية كل انبوب عندما ينتقل الماء عبر الانبوب و يقصر الجزأ في نهاية كل انبوب عندما يخرج الماء من الانبوب. تحسب تفاعلات مركب ضمن كل جزأ من الانبوب ، وتجمع الكتل و الغزارات الداخلة الى كل عقدة لتحديد التركيز الناتج. و عند حدوث خلاف واضح للتركيز في العقد عنه في نهاية الانابيب الداخلة في العقدة ، يتم اضافة جزأ جديد بدلا من مد الجزأ الموجود. تكرر الحسابات لكل خطوة زمنية للتحليل النوعي، الى ان يحدث تغير هيدروليكي، لتبدأ العملية من جديد.

اثناء وضع خوارزمية التحليل النوعي يفضل الانتباه الى مايلي:

للحفاظ على الدقة ضمن الحدود المسموحة، في زمرتي الخوارزميات، يجب حساب العنصر الحجمي بشكل دقيق لكل انبوب خلال فترة كل حدث هيدروليكي. يعتبر الزمن t بارامتر خوارزمية التحليل النوعي.

من اجل التاكد من عدم انتقال السائل خارج حدود أي انبوب خلال فترة تحليلية واحدة، يجب ان يكون حجم الانبوب اكبر من جداء غزارة الانبوب بالخطوة الزمنية.

بالتالي لا يمكن ان يزيد t عن اصغر زمن انتقال، بارامتر نوعي،عبر أي انبوب خلال فترة التحليل، كما توضح العلاقة التالية:

$$\tau = \min_i \left(V_i / Q_i \right) \qquad \text{i-for all pipes} \qquad 4\text{-}11$$

حيث V_i (m^3) الحجم الكلي للسائل في الانبوب i، Q_i (m^3/s) غزارة الانبوب i.

بعد تحديد خطوة زمنية للتحليل النوعي، يمكن حساب عدد العناصر الحجمية volume elements و حجم كل عنصر في الانبوب i كما يلي:

$$n_i = V_i / (Q_i \tau) \quad , v_i = V_i / n_i \qquad 4\text{-}12$$

حيث n_i: عدد العناصر الحجمية و V_i (m^3): حجم عنصر الحجم في الانبوب i.

تنتشر كتلة مركب في شبكة في كل خطوة زمنية للتحليل النوعي بأربعة أطوار:

1- التفاعل الحركي kinetic reaction: يحدث تغير في التركيز الحركي لتركيز المركب بتطبيق تابع تفاعل حركي.

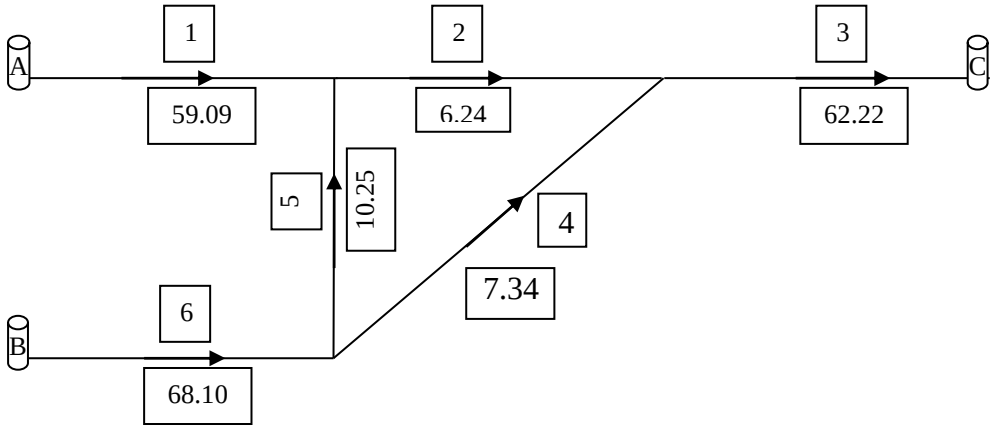
2- مزج عقدي nodal mixing: تمزج كتلة المركب و الحجوم الداخلة إلى العقد في العقد.

3- الانتقال advection: تنتقل كتلة المركب بين عناصر الحجوم.

4- التوزيع allocation: توزيع الكتلة في العقد على العناصر الحجمية للأنابيب الخارجة من العقدة

و من اجل تطوير خوارزمية تحليل نوعي اعتمادا على سلسلة من الفترات الهيدروليكية لمحاكاة بالزمن الممتد، تقسم انابيب الشبكة افراديا الى عناصر حجمية من اجل كل خطوة زمنية هيدروليكية. و يفضل، اثناء التقسيم، الانتباه الى القيود العددية المذكورة اعلاه. ان التقسيم بهذه الشروط لا يكون ممكنا في الحالات الحدية، مما يضطر المنمذج لتعديل مخطط التقسيم بوضع حدود عملية على الخطوة الزمنية للتحليل النوعي، مثل عدد اعظمي من الاقسام، او فترة تحليل هيدروليكي محدودة.

- مثال: الشبكة في الشكل 4-1 ننغذى من 3 مصادر، تعطى الغزارات في الأنابيب في اللحظة t=4 hr، المطلوب تحليل نوعي.



الشكل 4- 1

يفرض أن التركيز و العمر في الخزانات في اللحظة t=0 hr كما يأتي:

Source	Concentration mg/l	Age s
A	100	0
B	300	0
C	200	0

- حساب التراكيز في العقد:

معادلات الاستمرار في العقد:

$$Q_1+Q_5=Q_2+Q_{ext1}$$

$Q_3+Q_2+Q_4=Q_{ext2}$

$Q_6= Q_4+Q_5 +Q_{ext3}$

معادلات استمرار التركيز في العقد:

$C_{A1}\ Q_1+ C_{31}\ Q_5= C_1\ (Q_2+Q_{ext1})$

$C_{C2}\ Q_3+ C_{12}\ Q_2+ C_{32}\ Q_4= C_2\ Q_{ext2}$

$C_{B3}\ Q_6= C_3\ (Q_4+ Q_5 +Q_{ext3})$

الحل الآني لمعادلات الاستمرار و استمرار التركيز:

$C_1=(C_{A1}\ Q_1+ C_{31}\ Q_5)/\ (Q_1+Q_5)=129.7$ mg/l

$C_2=(C_{C2}\ Q_3+ C_{12}\ Q_2+ C_{32}\ Q_4)/\ (Q_3+ Q_2+ Q_4)=203.9$ mg/l

$C_3=C_{B3}\ Q_6/Q_6=300$ mg/l

- حساب عمر الماء:

$A_1=[(A_A+T_{A1}\ )Q_1+ (A_3 +T_{31}\ )Q_5]/\ (Q_1+Q_5)=7.12$ min

$A_2=[(A_1 +T_{12}\ )Q_2+ (A_C+T_{C2}\ )Q_3+ (A_3+T_{32}\ )Q_4]/(Q_3+ Q_2+Q_4)$
$=11.12$ min

$A_3=(A_B +T_{B3}\ )Q_6/Q_6=5.31$ min.

- حساب مساهمة الخزانات في العقد:

$$\sum_{n=1}^{m} C(i,n)Q(n) - C(i,j)\sum Q_{out} = 0$$

$C(A,1)=[\ Q_1+ C(A,3)\ Q_5]/\ (Q_1+Q_5)=85.2$ %

$C(A,2)=[\ C(A,1)\ Q_2+ C(A,3)\ Q_4]/\ (Q_2+Q_3+ Q_4)=7.1$ %

$C(A,3)=0/Q_6= 0$

$C(B,1)=C(B,3)\ Q_5/\ (Q_1+Q_5)=14.8$ %

$C(B,2)=[\ C(B,1)\ Q_2+ C(B,3)\ Q_4]/\ (Q_2+Q_3+ Q_4)=11.1$ %

$C(B,3)=Q_6\ /Q_6= 100$ %

$C(C,1)=0/\ (Q_1+Q_5)=0$ %

$C(C,2)= Q_3/\ (Q_2+Q_3+ Q_4)=81.1$ %

$C(C,3)=0/Q_6= 0$ %

مثال: اجراء التحليل النوعي على WaterCad:

- حساب عمر الماء Computing Water Age: يفرض أن العمر الأولي 0 في كل العقد، و أن الخزانات مزود لانهائي بالماء الجديد، مدة التحليل أسبوعين (336 ساعة) لتحديد نقطة التوازن للمنظومة.

1- إضافة بديل Alternative، اختر Analysis> Alternatives.

2- اختر Age اضغط New و سمي البديل.

3- اضافة سيناريو جديد لاجراء المحاكاة بالزمن الممتد بالبديل الجديد.

3-1- اضغط Analysis> Scenarios، اختر سياريو ثم New>Child Scenario. و اختر اسما.

3-2- ضغط مزدوج على السيناريو الجديد لفتح properties box، في حقل Alternatives Age، اختر البديل الجديد، اغلق properties box.

3-3- اضغط Analysis > Calculation Options،

3-4- ضغط مزدوج على السيناريو الجديد ، ضع Calculation Type= Age
3-5- ادخل Start Time، Duration، Hydraulic Time Step.
3-6- اغلق properties box.
3-7-
4- اضغط تبويبة Scenarios tab اجعل Age Analysis= current.
5- اضغط Compute
6- اختر View > Element Symbology ، Pipe، New > New Color Coding
7- اختر Field Name=Age(Calculated)، اضغط Calculate Range.
8- اضغط Initialize ، Apply ، OK.
9-

- تحليل تراكيز المكونات:

1- اختر Analysis>Alternatives، اضغط Constituent Alternative, New.
2- سمي البديل ثم ضغط مزدوج ليفتح.
3- اضغط Ellipsis بجوار Constituent menu، لفتح Constituent manager.
4- اضغط Chlorine Lable ادخل المعطيات Bulk Reaction, Wall Reaction, Diffusivity في dialog box.
5- علم Unlimited Concentration و اقبل قيم بقية الحقول. اضغط Close.
6- عد إلى Constituent Alternative Editor، اختر Chlorine من Constituent list box، اضغط Pipe tab للتأكد من Bulk Reaction.
7- ادخل التركيز الأولي في تبويبة Junction و تبويبة Pump و تبويبة Valve تبويبة Reservoir (2 mg/l) تبويبة Tank مثلا (0.5 mg/l) (1 mg/l).
8- اغلق Editor و Alternatives Manager.
9- اضف Scenario جديد باختيار Scenario Management>New>Child. سمها.
10- ضغط مزدوج السيناريو الجديد ضع البديل Alternative Constituent=
11- اضغط Calculation Options ضغط مزدوج السيناريو الجديد.
12- ضع Calculatin Type=Constituent اضغط Close.
13- في Scenario Tab اضغط Compute > Batch Run.
14- اختر Chlorine Analysis ثم اضغط Batch. اغلق Scenario Manager.
15- اختر السيناريو الجديد = current Scenario.
16- ضع color coding، color code by Calculated Concentration.
17-

- **Step 3: Performing a Trace Analysis**

A trace analysis determines the percentage of water at all nodes and links in the system from a specific source node (the trace node). In systems with more than one source, it is common to perform multiple trace analyses using the various source nodes as the trace nodes in successive analyses. For this run, you will perform a trace analysis to determine the percentages of water coming from the tank.

1. Select **Analysis** > **Alternatives**.

2. Click the Trace alternative to highlight it.
3. Click **New**.
4. Name the new alternative **Trace Analysis for Tank**, and double-click to open.
5. Click the Ellipsis (...) next to the Trace Element drop-down menu and select the Tank from the drawing.
6. Click on the Tank tab to make sure that the initial trace percentage is set to zero, and close the editor.
7. Close the Alternatives Manager.
8. Next, set up a new scenario to run an Extended Period Simulation incorporating the new alternative.
    a. Select **Analysis > Scenarios**.
    b. Create a new child for the Age Analysis scenario by highlighting it and clicking **New > Child Scenario**.
    c. Enter **Trace Analysis** as the new scenario name.
    d. Double-click on the new scenario to open the Properties dialog box.
    e. Under the Alternatives Trace field, select **Trace Analysis for Tank** from the drop-down menu.
    f. Click the Calculation tab. On the Calculation tab, set the Calculation Type to **Trace**.
    g. Click **Close** to exit the dialog box.
9. Go to Analysis > Scenarios and click on **Batch Run**.
10. Select the new **Trace Analysis** scenario and click **Batch**.
11. Click Yes and OK to accept the message boxes. Close the Scenario Manager.
12. Use color coding (by Calculated Trace), tables, and graphs to view the results of this run. As you scroll through the time periods using the EPS Results Browser, notice how the colors spread outward from the tank during periods when the tank is draining and recede when the tank begins to fill.
13. Close the open dialog boxes and save this project

الفصل الخامس

الجريان غير المستقر

5-1- تصنيف الجريان غير المستقر

5-2- معادلات الجريان غير المستقر

5-2-1 الجريان شبه المستقر

5-2-2 الجريان بشروط العمود الصلب

5-2-3 الجريان بشروط المطرقة المائية

الجريان غير المستقر

Unsteady Flow

تعريف الجريان غير المستقر: هو الجريان الذي تكون متحولاته في مقطع من الأنبوب (الضواغط و الغزارات) تابعة للزمان.

5-1- **تصنيف الجريان غير المستقر:**

يصنف الجريان غير المستقر في ثلاث فئات:

1- الجريان شبه المستقر: حيث التغير في الغزارة و الضاغط مع الزمن تدريجي، يمكن اعتباره مستقر خلال فترات زمنية قصيرة، يهمل تأثير العطالة و المرونة على سلوك السائل.

2- الجريان بشروط العمود الصلب: حيث التغير في الغزارة و الضاغط مع الزمن سريع بحيث تلعب العطالة دورا مهما في التأثير على سلوك السائل؛ تغير قيم الغزارة و الضاغط، و يمكن إهمال تأثير مرونة الأنابيب و السائل.

3- الجريان بشروط المطرقة المائية: يكون التغير في الغزارة و الضاغط سريعا بحيث تلعب العطالة و مرونة الأنابيب و السائل دورا بالتأثير على سلوك السائل.

5-2- **معادلات الجريان غير المستقر:**

تستنتج معادلات الجريان غير المستقر من مبدأي مصونية الكتلة و كمية الحركة.

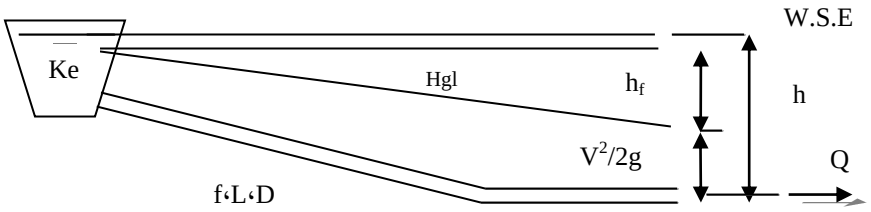
5-2-1- **الجريان شبه المستقر**[3]**:**

أمثلة: تفريغ خزان – التغير في السحب في شبكات التوزيع خلال 24 ساعة.

بفرض خزان بمساحة سطح الماء كبير عند أي ارتفاع بالمقارنة مع مقطع أنبوب التفريغ. و وجود سكر عند نهاية الأنبوب. و بغض النظر عن سرعة فتح السكر فإن الماء سيتفرغ ببطء لكبر أبعاد الخزان مقارنة بمساحة مقطع الأنبوب. عند دراسة الجريان في أي لحظة يتبين أن هناك تسارع زمني تدريجي، تأثير عطالي مهمل، و

تسارع مكاني عند مدخل الأنبوب. سيلاحظ بعد فترة هبوط منسوب الماء و إفراغ الخزان في نهاية المطاف. في حال كون مقطع الأنبوب كبير سيفرغ الخزان بسرعة و يتعرض السائل لتسارع مهم و يظهر تأثير العطالة على الجريان العابر. ويصبح التسارع الزماني أو المكاني عاملا مهما في مبدأ الطاقة.

لنفرض أنبوبا، كما في الشكل 5-1، بالمواصفات التالية: منسوب سطح الماء WSE أعلى من منسوب خروج الماء بمقدار h ، معامل احتكاك دارسي f ، الطول L، القطر D، مساحة المقطع A_p، ينقل غزارة مقدارها Q من الخزان. عند خروج الماء من الخزان إلى الأنبوب يتعرض إلى فاقد محلي h_e بمعامل فاقد K_e، فاقد احتكاك دارسي h_f، و يخرج بضاغط سرعة وسطية $V^2/2g$، وبتطبيق مبدأ مصونية الطاقة:



الشكل 5-1
خط التدرج Hgl، فاقد الضغط h_f ،
ضاغط السرعة والفاقد المحلي

$$h = \frac{V^2}{2g} + f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} + K_e\frac{V^2}{2g} \Rightarrow$$

$$h = \left[1 + f\,L/D + K_e\right]V^2/(2g) \Rightarrow$$

$$V = \sqrt{2gh}\Big/\left[1 + f\,L/D + K_e\right]^{\frac{1}{2}} \qquad 5\text{-}1$$

و يحسب الزمن اللازم لإفراغ الخزان من العلاقة:

$$Qdt = A(-dh) \qquad 5\text{-}2$$

حيث A مساحة مقطع الخزان و حيث dh الهبوط التفاضلي للماء في الخزان.

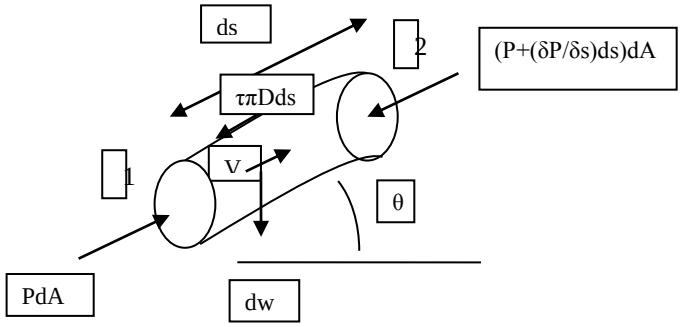
الزمن اللازم لهبوط الماء من منسوب h_1 إلى h_2:

$$t_2 - t_1 = \int_{t_1}^{t_2} dt = -\int_{h_1}^{h_2} (Adh/Q) \qquad 5\text{-}3$$

5-2-2- **الجريان بشروط العمود الصلب**[3]**:**

في حال حدوث تغير سريع بحيث يصبح تأثير العطالة مهما مع إهمال مرونة الأنبوب و السائل مما يعني انتقال أي تغير في السرعة آنيا إلى كامل الأنبوب.

معادلة الحركة - معادلة اويلر:



الشكل 5-2
مخطط حساب معادلة الحركة

يظهر الشكل 3-2 القوى التي تؤثر على جزء من الأنبوب بطول ds حيث يجري الماء من المقطع -1- إلى المقطع -2- بسرعة V، P الضغط المطبق على المقطع -1- ، P+(∂P/∂s)ds الضغط المطبق على المقطع -2-، τπDds قوة الاحتكاك بين الماء و الأنبوب، dW وزن الماء في ds، θ زاوية ميل الأنبوب مع محور أفقي.

بتطبيق معادلة الحركة ينتج:

$$\Sigma F_s = m * a_s = m\frac{dV}{dt}$$

$$PdA - \left(P + \frac{\partial P}{\partial s}ds\right)dA - dW\sin(\theta) - \tau\pi Dds = \frac{dW}{g}\frac{dV}{dt}$$

نقسم على dW فينتج :

$$-\frac{1}{\gamma}\frac{\partial P}{\partial s} - \frac{\partial z}{\partial s} - \frac{4\tau}{\gamma D} = \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}$$

إجهاد القص على الجدار:

$$\tau = \frac{1}{\gamma} f\rho V|V|$$

$$\frac{1}{g}\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma}\frac{\partial P}{\partial s} + \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{f}{D}\frac{V|V|}{2g} = 0$$

$$P = \rho g(H - z) \qquad , \qquad \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial s}$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial s}\left(H+\frac{V^2}{2g}\right)+\frac{f}{D}\frac{V|V|}{2g}=0 \qquad 5\text{-}4$$

حيث $\partial v/\partial t$: المشتق الجزئي للسرعة بالنسبة للزمن، v: السرعة، H: المنسوب البيزومتري، D: قطرالأنبوب، f:معامل الاحتكاك.

إن سرعة الجريان، في حال الجريان بشروط العمود الصلب، واحدة في كامل الأنبوب في كل لحظة و بالتالي يمكن تطبيق صيغة معادلة الاستمرار للجريان المستقر.

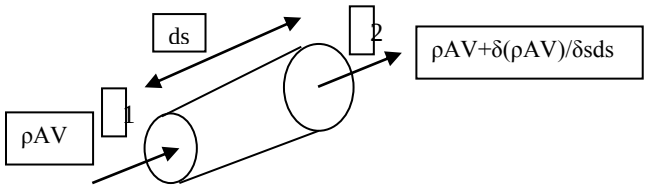
5-2-3- **الجريان بشروط المطرقة المائية**[2،3،6،7،13،14] :

عندما تتغير السرعة في أنبوب بشكل سريع بحيث يصبح من الضروري أخذ مرونة الأنبوب و السائل أثناء التحليل، تبرز ظاهرة المطرقة المائية. و رغم أن تحليل المطرقة المائية أعقد من تحليل العمود الصلب إلا أنها تصف بدقة السلوك الفعلي للجريان، وهي ضرورية لوصف أنظمة الجريان المعقدة و وصف سلوك بعض الأجهزة.

ينطلق فهم ظاهرة المطرقة المائية من مفاهيم أساسية تتعلق بكيفية تشكل موجة الضاغط و الغزارة بفعل حدث سريع و فيزيائية انتقال هذه الموجة عبر الأنبوب. فبفرض أنبوب يخرج من خزان و في نهايته سكر. عند الإغلاق السريع للسكر يزداد الضاغط بشكل حاد بمقدار $\Delta H=a*\Delta V/g$. ينتج عن هذا التغير في الضاغط تغيرين عند السكر، الأول هو زيادة قطر الأنبوب و الثاني زيادة كثافة السائل. تعتمد الزيادة في قطر الأنبوب على القطر و سماكة الأنبوب و معامل مرونة مادة الأنبوب و انضغاطية السائل. وستؤدي الزيادة في كثافة السائل إلى نشوء موجة ضغط، بسعة وجبهة تزدادان بنقصان زمن الإغلاق، و انتشار هذه الموجة جيئة وذهابا عبر الأنبوب بسرعة a تتعلق بالخواص الهندسية للناقل و الخواص الفيزيائية للناقل وللسائل.إن الزيادة المفاجئة في الضاغط عند السكر ستبقى حتى ذهاب الموجة وعودتها إلى السكر، وعندها تعمل الموجة العائدة من الخزان على إنقاص الضاغط عند السكر. و المهم لنشوء ظاهرة المطرقة أن يكون زمن الحدث الذي يؤدي إلى نشوء الموجة أصغر من الزمن المميز للأنبوب L/a2.

معادلة الحركة في نظرية المرونة تماثل معادلة الحركة في نظرية العمود الصلب.

معادلة الاستمرار:



الشكل 5-3
مخطط حساب معادلة الاستمرار

يبين الشكل 5-3 جزء من أنبوب بطول ds حيث تدخل غزارة ρAV من المقطع -1- و تخرج غزارة ρAV+∂(ρAV)/∂sds من المقطع -2- و يتراكم حجم ماء ρAds في الزمن dt في الجزء ds.

$$\rho AV - \left[\rho AV + \frac{\partial}{\partial s}(\rho AV)ds\right] = \frac{\partial}{\partial t}(\rho Ads)$$

$$\frac{\partial}{\partial s}(\rho AV)ds = \frac{\partial}{\partial t}(\rho Ads)$$

بالنشر و التجميع و التقسيم على ρAds :

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A}\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial s} - \frac{1}{ds}\frac{\partial}{\partial t}(ds) = 0$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{k}\frac{\partial P}{\partial t}$$

$$dA = \frac{1}{2}\pi D^2 d\varepsilon_2 \Rightarrow \qquad dA = \frac{1}{2}\pi\frac{D^2}{E}(d\sigma_2 - \mu d\sigma_1)$$

$$\frac{1}{A}dA = \frac{2}{E}(d\sigma_2 - \mu d\sigma_1) \Rightarrow \qquad \frac{1}{A}dA = C\frac{D}{eE}\frac{dP}{dt}$$

$$\frac{1}{k}\frac{dP}{dt} + C\frac{D}{eE}\frac{dP}{dt} + \frac{\partial V}{\partial s} = 0 \Rightarrow \qquad \frac{dP}{dt}\left[\frac{1}{k} + C\frac{D}{eE}\right] + \frac{\partial V}{\partial s} = 0$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{dP}{dt} + a^2\frac{\partial V}{\partial s} = 0 \qquad 5\text{-}5$$

حيث dP/dt مشتق الضغط بالنسبة للزمن، ∂V/∂s مشتق جزئي للسرعة بالنسبة لطول تفاضلي من أنبوب.

$$a = \sqrt{k/\rho}\Big/\sqrt{1+(k/E)(D/e)(C)} \qquad 5\text{-}5'$$

a : سرعة موجة الضغط ، k: عامل المرونة الحجمي للماء، ρ: الكتلة الحجمية للماء، D: قطر الأنبوب،
E: عامل مرونة مادة الأنبوب، e: سماكة جدار الأنبوب.

في حال أنبوب مثبت من طرف و حر من الطرف الآخر: $C = 5/4 - \mu$

في حال أنبوب مقيد محوريا: $C = 1 - \mu^2$

في حال وجود فواصل تمدد طولية على طول الأنبوب: $C = 1$

في حال وجود هواء (غازات) في الماء يتغير عامل انضغاطية السائل:

$$k_{mix} = k_{liq} / (1 + \alpha(k_{liq} / k_{air} - 1)) \qquad 5\text{-}5''$$

حيث α نسبة حجم الهواء إلى الحجم الكلي.

و بالتالي فإن معادلتي الجريان في المطرقة المائية:

$$\frac{dV}{dt} + g\frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f}{2D}V|V| = 0 \qquad 5\text{-}6$$

$$g\frac{dH}{dt} + a^2\frac{\partial V}{\partial s} = 0 \qquad 5\text{-}7$$

بإهمال الحدود اللاخطية ينتج معادلتي موجتين للضاغط و الغزارة كما يلي:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g\frac{\partial H}{\partial s} = 0 \qquad 5\text{-}8$$

$$a^2\frac{\partial V}{\partial s} + g\frac{dH}{dt} = 0 \qquad 5\text{-}9$$

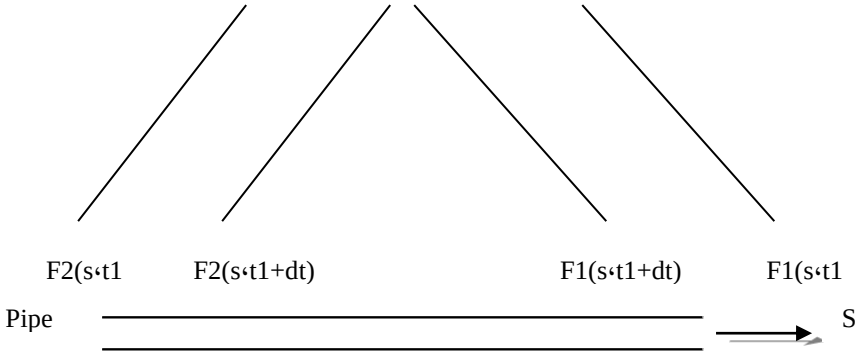
$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + a^2\frac{\partial^2 H}{\partial s^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + a^2\frac{\partial^2 V}{\partial s^2} = 0 \qquad 5\text{-}10$$

يمكن كتابة الحل العام لمعادلة الضاغط كالتالي:

$$H - H_0 = F_1(t + s/a) + F_2(t - s/a) \qquad 5\text{-}11$$

تصف F_1 موجة تتحرك باتجاه تناقص s، و تصف F_2 موجة تتحرك باتجاه تزايد s (جهة الغزارة في الحالة t_0). H_0 ثابت تكامل يثبت مستوى مرجعي للضاغط H.

الشكل 5-4.



الشكل 5-4
الموجتان F1،F2

إن إهمال Nonlinear Convective Acceleration، الحدود اللاخطية، مبرر لأن:

$$V(\partial V/\partial s) \approx (V/a)(\partial V/\partial t) \quad ، \quad V(\partial H/\partial s) \approx (V/a)(\partial H/\partial t)$$

في الحالة العامة يكون V/a<<1، و الحدود اللاخطية اصغر من الحدود الخطية.

الفصل السادس

المطرقة المائية في الشبكات

6-1- نظرية العمود الصلب في الشبكات

6-2- حالات دراسية : تشكيل المعادلات

المطرقة المائية في الشبكات

Water Hammer in Networks

مقدمة:

إن معرفة الشروط التي تكون عندها دراسة أو محاكاة الشبكة بالزمن الممتد كاف، و متى يجب إدخال التأثيرات العطالية، ومتى يكون من الضروري إدخال خواص المرونة للأنابيب و السائل في الدراسة بحاجة لمزيد من البحث. فعلى الرغم من وجود عدد من العوامل المساعدة لاتخاذ القرار تبقى الخبرة الفنية و المهنية من العوامل الأساسية.

يكون التحليل المرن ضروريا عندما يكون معدل التغير في سرعة الحدث كبيرا بحيث يؤدي إلى تغيرات أساسية في متغيرات الجريان في أزمنة أقل من عدة مرات من قيمة L/a للأنبوب المدروس. مثال الإغلاق السريع للسكورة، إملاء أنبوب بسائل يتحرك بسرعة كبيرة و يجبر الهواء على الخروج بسرعة صوتية من الأنبوب، تغيرات مفاجئة في عمل المضخة، أو أي حدث يتم بسرعة تمنع الماء من التأقلم التدريجي مع التغير.

يمكن تطبيق نظرية العمود الصلب عندما تكون التغيرات أو التعديلات في الأجهزة المكونة للمنظومات الهيدروليكية سريعة، و لكن ليست آنية أو سريعة بما يكفي لأخذ خواص مرونة الأنابيب و الماء في الدراسة، كالتغير في السحوبات، ولكنها تؤدي إلى تأثيرات عطالية في تسريع السائل و بالتالي تأثيرات مهمة على الضاغط. و كأمثلة على ذلك ما يحدث في ساعات الصباح في المدن الكبيرة عندما تشغل المضخات الإضافية لتأمين الزيادة في الطلب، أو عندما يغلق أو يفتح بسرعة مستخدم رئيسي للمياه. تؤدي هذه التغيرات إلى تسريع السائل و بالتالي تغير الضاغط في الأنابيب الطويلة في العقد الدنيا عن قيمته فيما إذا أخذ الاحتكاك فقط بعين الاعتبار. في بعض الحالات يمكن إهمال التأثير العطالي و التأثير المرن، و عندها

يمكن دراسة الشبكة بطريقة المحاكاة بالزمن الممتد أو بشروط الجريان شبه المستقر، حيث أن سرعة التغير في هذه الحالات تجعل التأثير العطالي و التأثير المرن مهملا على النتائج.

6-1- نظرية العمود الصلب في الشبكات[3]:

تفترض نظرية العمود الصلب أنه في حالة تغير سريع في أحد المتغيرات بحيث يؤدي إلى تأثيرات عطالية مع اهمال تأثير إنضغاطية السائل و مرونة الأنبوب على المتغيرات.

معادلة الحركة:

$$\frac{dV}{dt} = -g\frac{\partial H}{\partial s} - \frac{fV|V|}{2D} \qquad 6\text{-}1$$

و التي يمكن إعادة كتابتها بالشكل:

$$\frac{dQ_K}{dt} = gA_K\frac{H_i - H_j}{L_K} - \frac{f_K Q_K|Q_K|}{2D_K A_K} \qquad 6\text{-}1'$$

حيث K: دليل الأنبوب A_K: مساحة مقطع، D_k: قطر، L_k: طول، f_k: عامل احتكاك، Q_K: الغزارة، H_J،H_i : الضاغط في العقدتين i ،j.

يمكن إهمال التسارع المكاني مقارنة بالتسارع الزمني و كذلك إهمال الفرق بين منسوب الطاقة و منسوب الضاغط البيزومتري عند السرع الصغيرة.

معادلة الاستمرار في العقدة I:

$$\Sigma Q_k - QJ_i = 0 \qquad 6\text{-}2$$

حيث Q_K: الغزارة في أنابيب تلتقي في العقدة i، QJ_i: السحب في العقدة i.

يمكن حل جملة معادلات جبرية و تفاضلية بطرق عددية تعتمد على التكرار. ويجب أن تكرر عملية الحل على فترة زمنية طويلة بما يكفي لمعرفة سلوك المنظومة. تسمح طريقة نيوتن- رافسون و طريقة غاوس- سايدل بحل جملة معادلات جبرية وتفاضلية بعد حل المعادلات التفاضلية بطرق عددية كطريقة Runge-Kutta.

في الحالة العامة تحل منظومة بـ NP أنبوب و NJ عقدة ، تشكل مجموعة NP معادلة حركة تفاضلية و NJ معادلة استمرار جبرية ، وتحدد بعض السحوبات أو

الضواغط كتابع للزمن ، على ألا يحدد السحب و الضاغط في عقدة بما يؤدي إلى حل مستحيل، و لا يزيد عدد المجاهيل عن عدد المعادلات.

تتم عملية حل معادلات الجريان غير المستقر بطريقة نيوتن بالخطوات التالية:

1- تقسيم الفترة الزمنية لدراسة الجريان غير المستقر إلى NT خطوة زمنية.

2- تعطى للغزارات و للضواغط قيم أولية من حالة مستقرة او حالة أولية محددة.

3- تحدد السحوبات عند كل خطوة زمنية.

4- عند كل خطوة زمنية، تحدد المعادلات (الجبرية و التفاضلية التي تحل بطريقة Runge-Kutta، و تصاغ المعادلات الجبرية كتابع يساوي الصفر.)

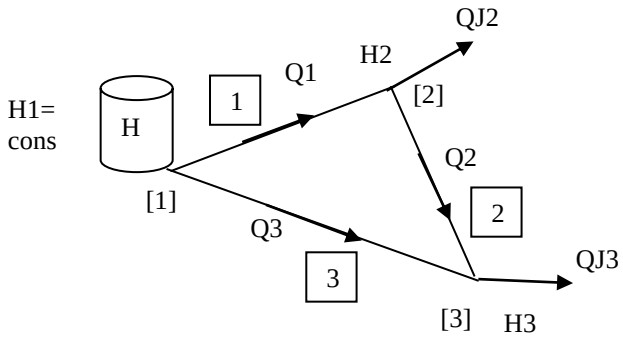
5- تحسب مصفوفة الجاكوبيان ، و تحل منظومة المعادلات الخطية الناتجة.

6- تكرر الخطوات 3 - 6 إلى أن يصل التقارب المحدد إلى قيمة معيارية.

7- تكتب قيم الغزارات و الضواغط لهذه الفترة الزمنية و تكرر الخطوات من 3 و حتى 7 حتى يغطي حل الجريان غير المستقر كامل الفترة الزمنية.

6-2- حالات دراسية:

- **حالة دراسية**: شبكة، الشكل 6-1، تضم 3 انابيب، عقدة الطاقة في [1].



الشكل 6-1

شبكة تضم: 1 خزان - 2 عقدة تفرع -3 أنابيب

يبين الشكل 6-1 شبكة تضم خزان في العقدة -1- بضاغط ثابت H1=cons و عقدتي تفرع -2- بضاغط H2 و -3- بضاغط H3 ، و ثلاثة أنابيب -1- بغزارة Q1، 2-- بغزارة Q2، 3-- بغزارة Q3.

و باعطاء جدول زمني لتغير السحوبات في العقدتين -2-، -3- ،

يطلب حساب: Q1،Q2،Q3،H2،H3 .

و كخطوة أولى توضع المعادلات الناظمة لهذه المنظومة بصيغة تحل بطريقة نيوتن:

معادلة الاستمرار في العقدة [2]:

$$Q_1 - Q_2 - QJ_2 = 0 \Rightarrow \qquad F_1 = Q_1 - Q_2 - QJ_2 = 0 \qquad \text{(i)}$$

معادلة الاستمرار في العقدة [3]:

$$Q_2 + Q_3 - QJ_3 = 0 \Rightarrow \qquad F_2 = Q_2 + Q_3 - QJ_3 = 0 \qquad \text{(ii)}$$

معادلة الحركة في الأنبوب -1-:

$$\frac{dQ_1}{dt} = gA_1 \frac{H_1 - H_2}{L_1} - \frac{f_1 Q_1 |Q_1|}{2D_1 A_1} \Rightarrow \quad F_3 = Q_1 - Q_{ODE1} = 0 \qquad \text{(iii)}$$

معادلة الحركة في الأنبوب -2-:

$$\frac{dQ_2}{dt} = gA_2 \frac{H_2 - H_3}{L_2} - \frac{f_2 Q_2 |Q_2|}{2D_2 A_2} \Rightarrow \quad F_4 = Q_2 - Q_{ODE2} = 0 \qquad \text{(iv)}$$

معادلة الحركة في الأنبوب -3-:

$$\frac{dQ_3}{dt} = gA_3 \frac{H_1 - H_3}{L_3} - \frac{f_3 Q_3 |Q_3|}{2D_3 A_3} \Rightarrow \quad F_5 = Q_3 - Q_{ODE3} = 0 \qquad \text{(v)}$$

حيث Q_{ODE} حل معادلة الحركة التفاضلية في زمن محدد.

- **حالة دراسية:** عدة مضخات تغذي خط:

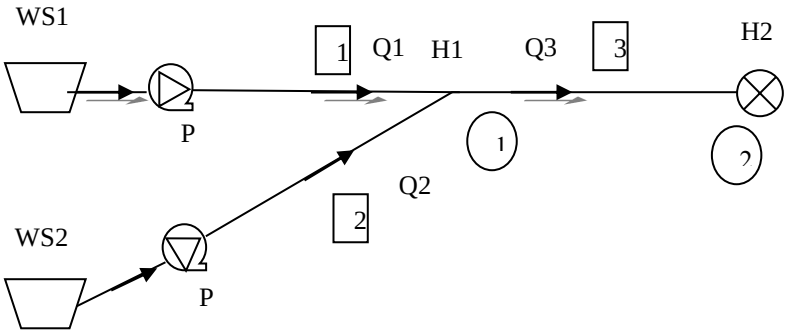
بفرض عدة خزانات كل خزان مزود بمضخة تضخ الماء في أنبوب، تلتقي هذه الأنابيب في أنبوب واحد يوضع في عقدته الثانية سكر أو أي شرط محيطي و يعطى الضاغط أو السحب في هذه العقدة كتابع للزمن، و في هذه الحالة تم فرض أن السحب ثابت. في حال عدد الأنابيب الحاوية على مضخات هو NPM يكون عدد الأنابيب NP=NPM+1.

في حالة مضختين و ثلاثة أنابيب :

يبين الشكل 6-2 منظومة هيدروليكية تضم :خزانين ws1،ws2 مع مضختين؛ الأنبوب -1- بغزارة Q1، الأنبوب -2- بغزارة Q2، الأنبوب -3- بغزارة Q3، العقدة -1- بضاغط H1.

معادلة الاستمرار في العقدة -1-:

$$F_1 = Q_1 + Q_2 - Q_3 = 0 \qquad \text{(i)}$$



الشكل 6-2
شبكة تضم :- خزانين ؛ مضختين؛ 2 عقدة تفرع ؛ 3 أنابيب

معادلة الحركة في الأنبوب -1-:

$$\frac{dQ_1}{dt} = gA_1 \frac{WS1 + h_{p1} - H_1}{L_1} - \frac{(f_1 L_1 / D_1 + K_e) Q_1 |Q_1|}{2 D_1 A_1} \Rightarrow \qquad \text{(ii)}$$

$$F_2 = Q_1 - Q_{ODE1} = 0 \quad ؛ \qquad h_{p1} = (A_1 Q_1 + B_1) Q_1 + C_1$$

معادلة الحركة في الأنبوب -2-:

$$\frac{dQ_2}{dt} = gA_2 \frac{WS2 + h_{p2} - H_1}{L_2} - \frac{(f_2 L_2 / D_2 + K_e) Q_2 |Q_2|}{2 D_2 A_2} \Rightarrow \qquad \text{(iii)}$$

$$F_3 = Q_2 - Q_{ODE2} = 0 \quad ؛ \qquad h_{p1} = (A_1 Q_1 + B_1) Q_1 + C_1$$

معادلة الحركة في الأنبوب -3-:

$$\frac{dQ_3}{dt} = gA_3 \frac{H_1 - H_2}{L_3} - \frac{(f_3 L_3 / D_3) Q_3 |Q_3|}{2 D_3 A_3} \Rightarrow \qquad \text{(iv)}$$

$$F_4 = Q_3 - Q_{ODE3} = 0$$

- **حالة دراسية:منظومة هيدروليكية** مزودة بحماية؛

EQUATIONS of Hydraulic System : Protection Devices;

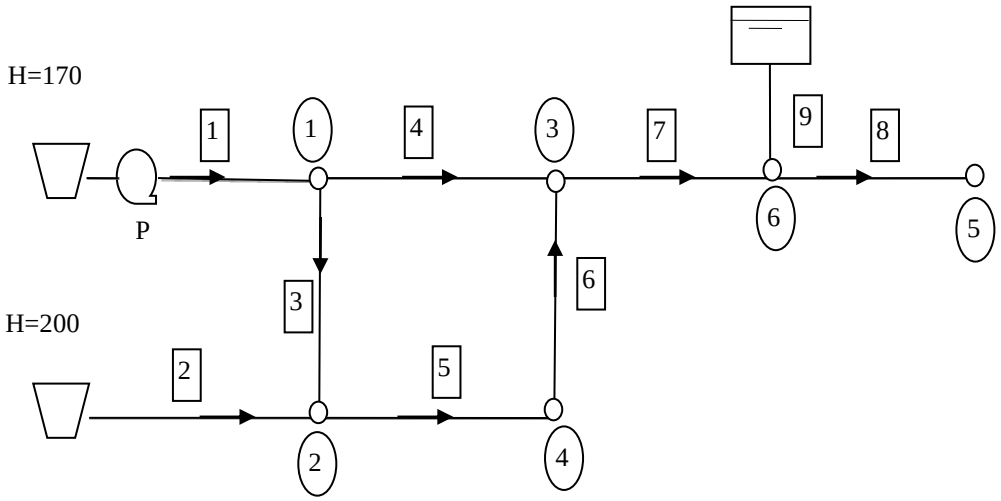
الهدف من هذه الأجهزة حماية الأنابيب من الضغوط الحدية الزائدة المتولدة نتيجة تغيرات كبيرة في السرعة. عند إضافة أي جهاز إلى شبكة، يجب إضافة المعادلات التي تصف هذا الجهاز إلى مجموعة معادلات الاستمرار ومعادلات الحركة غير المستقرة، و حل منظومة المعادلات الناتجة.

في حال خزان الضغط يكون الجزء العلوي من الخزان هواء مضغوط، و يجري على الهواء عمليات ترموديناميكية بين الايزوثيرمال و الاديابتك وفي حال تمت عملية الانضغاط في زمن قصير ستكون العملية اديابتك و معادلة الحالة:

$$P/(\rho^K) = const \Rightarrow (\Delta P_{AIR} + P_{ATM})/(\rho^K) = P_0/\rho_0^K = const \Rightarrow$$

$$\Delta P_{AIR} = P_0(\rho/\rho_0)^K - P_{ATM} \qquad 6\text{-}3$$

- **حالة دراسية:** شبكة تحوي:- خزانين؛ - مضخة؛ - 9 انابيب؛ - 5 عقد:



الشكل 6-3
شبكة تحوي خزانين، مضخة،8 أنابيب،5 عقد

يبين الشكل 6-3 شبكة تبين الجداول التالية الخواص الهندسية و الهيدروليكية لمكوناتها:

.

Pipe id	D ،in	L ،f	Q ،ft^3/s
1	12	3000	5.9
2	10	3500	2.9
3	10	2000	1.3
4	10	4000	3.3
5	10	4000	2.6
6	8	2500	1.2
7	10	1500	3
8	10	1500	3
9	6	100	0

جدول معلومات الأنابيب

Node id	q ft^3/s	H ،ft
1	1.5	170.71
2	1.6	166.55
3	1.5 ; QJ3	121.76
4	1.4	135.47
5	3	91.15

جدول معلومات العقد

Qp ،ft^3/s	Hp ،ft
5	50
6	45
7	39

جدول الخط المميز للمضخة

Tank id	Ht ،ft
1	170
2	200

جدول معلومات الخزانين

D : القطر، L: الطول ، Q : الغزارة في الأنابيب، q : السحب، H : الضاغط في العقد، Hp،Qp : نقاط الخط المميز للمضخة، Ht : منسوب الماء في الخزان، e=0.005" : عامل خشونة جميع الأنابيب، منسوب جميع العقد= 0.0' .

في العقدة [5] سكر فراشة معامل الفاقد فيه $C_D = C_0 EXP(CD)$ حيث D هي درجة الفتحة (من 0 في حالة الإغلاق إلى 90 عند الفتح الكامل) . في البداية عندما كان الجريان مستقر كانت t_0 ،D=40° و يغلق السكر خطيا بمعدل 7/ sec ° لمدة 5 ثواني ليقف عند الدرجة 5°. QJ_3 تابع خطي للضاغط عند العقدة [3] و بقيمة 1.5 ft^3/s عندما يأخذ H_3 قيمة حالة الاستقرار. يتفرع من العقدة 6 أنبوب 9 ينتهي بخزان ضغط.

المعادلات الناظمة:

الاستمرار عند العقد i=1،2،3،4،6

$$F_i = \Sigma Q_J - QJ_i = 0$$

الاستمرار عند العقدة [3]

$$F_5 = QJ_3 - C_3(H_3 - ELEV_3) = X(17) - 0.0123H_3 = 0$$

الاستمرار عند العقدة[5]

$$F_7 = Q_8 - C_0 * EXP(CD)(H_5 - ELEV_5)^{1/2} = Q_8 - 0.0324 * EXP(0.0568D)H_5^{1/2}$$

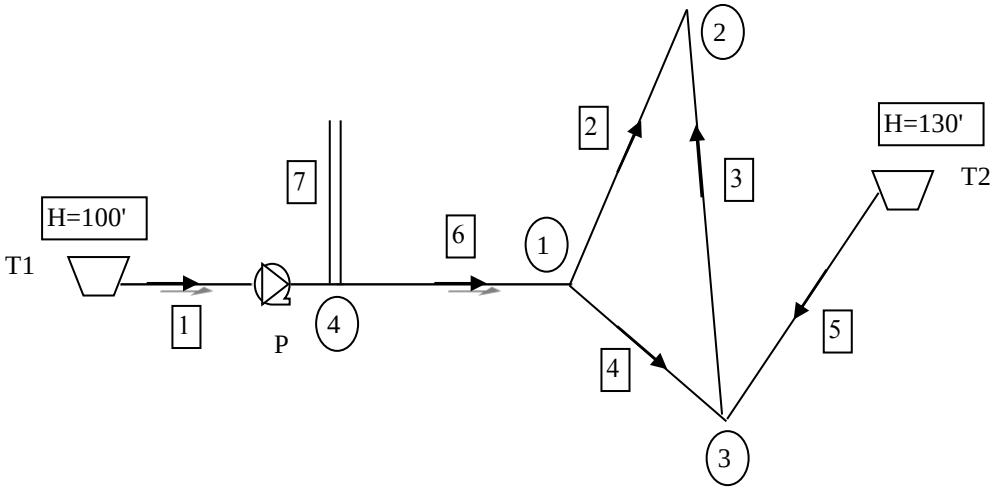
معادلات الحركة i=8-16 في الأنابيب K=1-9 :

$$F_i = Q_{ODEK} - Q_K = 0 \Rightarrow \frac{dQ_K}{dt} = gA_K \frac{H_u - H_d}{L_K} - \frac{f_K Q_K |Q_K|}{2D_K A_K}$$

معادلة خزان الضغط:

$$F_{17} = H_7 - (X - X_0)\left[P_0 \left(M / \{\rho_0 [(V_{AIR})_0 - \int Q_7 dt]\} \right)^K - P_{atm} \right] / \gamma_w = 0$$

- **حالة دراسية:** منظومة مزودة بأنبوب قائم (STANDPIPE) :



الشكل 6-4
شبكة تحوي خزانين، مضخة،7 أنابيب،4 عقد

يبين الشكل 6-4 شبكة تبين الجداول التالية الخواص الهندسية و الهيدروليكية لمكوناته:

Pipe id	D ،in	L ،f	Q ،ft^3/s
1	8	250	1.81
2	6	2000	0.78
3	6	2000	0.72
4	8	2500	0.53
5	8	1000	0.69
6	8	1250	1.81
7	1	1	0

جدول معلومات الأنابيب

Node id	q ft^3/s	H ،ft
1	0.5	130.97
2	1.5	110.49
3	0.5	128.08

جدول معلومات العقد

Qp ،ft^3/s	Hp ،ft
1.5	50
2	48
2.5	45

جدول الخط المميز للمضخة

Tank id	Ht ،ft
1	100
2	130

جدول معلومات الخزانين

T ،sec	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
QJ2	1.25	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0

جدول يبين تغير السحب من العقدة -2- مع الزمن

H : الضاغط في العقد، Hp،Qp : نقاط الخط المميز للمضخة، Ht : منسوب الماء في الخزان، e=0.005" :
عامل خشونة جميع الأنابيب، منسوب جميع العقد= 0.0'

يطلب ايجاد غزارات الأنابيب و ضواغط العقد عند تغير السحب في العقدة -2-.

المعادلات الناظمة:

معادلة الاستمرار في العقدة -1-: $F_1 = Q_6 - Q_2 - Q_4 - QJ_1 = 0$

معادلة الاستمرار في العقدة -2-: $F_2 = Q_2 + Q_3 - QJ_2 = 0$

معادلة الاستمرار في العقدة -3-: $F_3 = Q_5 + Q_4 - Q_3 - QJ_3 = 0$

معادلة الاستمرار في العقدة -4-: $F_4 = Q_1 - Q_6 - Q_7 = 0$

معادلة الحركة في الأنبوب -1-:

$$\frac{dQ_1}{dt} = gA_1 \frac{WS1 + h_p - H_{dp}}{L_1} - \frac{f_1 Q_1 |Q_1|}{2D_1 A_1} \Rightarrow \quad F_5 = Q_1 - Q_{ODE1} = 0$$

معادلة الحركة في الأنبوب -2-:

$$\frac{dQ_2}{dt} = gA_2 \frac{H_1 - H_2}{L_2} - \frac{f_2 Q_2 |Q_2|}{2D_2 A_2} \Rightarrow \quad F_6 = Q_2 - Q_{ODE2} = 0$$

معادلة الحركة في الأنبوب -3-:

$$\frac{dQ_3}{dt} = gA_3 \frac{H_3 - H_2}{L_3} - \frac{f_3 Q_2 |Q_2|}{2D_3 A_3} \Rightarrow \quad F_7 = Q_3 - Q_{ODE3} = 0$$

معادلة الحركة في الأنبوب -4-:

$$\frac{dQ_4}{dt} = gA_4 \frac{H_1 - H_3}{L_4} - \frac{f_4 Q_4 |Q_4|}{2D_4 A_4} \Rightarrow \qquad F_8 = Q_4 - Q_{ODE4} = 0$$

معادلة الحركة في الأنبوب -5-:

$$\frac{dQ_5}{dt} = gA_5 \frac{WS_2 - H_3}{L_5} - \frac{f_5 Q_5 |Q_5|}{2D_5 A_5} \Rightarrow \qquad F_9 = Q_5 - Q_{ODE5} = 0$$

معادلة الحركة في الأنبوب -6-:

$$\frac{dQ_6}{dt} = gA_6 \frac{H_{dp} - H_1}{L_6} - \frac{f_6 Q_6 |Q_6|}{2D_6 A_6} \Rightarrow \qquad F_{10} = Q_6 - Q_{ODE6} = 0$$

معادلة الحركة في الأنبوب -7-:

$$\frac{dQ_7}{dt} = gA_7 \frac{H_{dp} - z}{z} - \left[\frac{f_7}{2D_7 A_7} + \left(\frac{A_7}{A_0} \right)^2 \right] Q_2 |Q_2| \Rightarrow \quad F_{11} = Q_7 - Q_{ODE7} = 0$$

$$F_{12} = Z - Z_{ODE} = 0 \Rightarrow \frac{dZ}{dt} = \frac{Q_7}{A_7}$$

الفصل السابع

طريقة المميزات المحددة

7-1- معادلات المميزات المحددة

7-2- الحل العددي

7-3- الشبكة Δs، Δt

7-4- بارامترات دقة الحل

7-5- الشروط المحيطية

طريقة المميزات المحددة

Explicit Characteristic Method

7-1- معادلات المميزات المحددة[3،13،14]:

إن أساس هذه الطريقة هو تحويل معادلتي الحركة و الاستمرار التفاضلية الجزئية:

$$\frac{dV}{dt} + g\frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f}{2D}V|V| = 0 \qquad 7\text{-}1$$

$$a^2\frac{\partial V}{\partial s} + g\frac{dH}{dt} = 0 \qquad 7\text{-}2$$

إلى معادلات تفاضل تام بمعونة مضاريب لاغرانج الخطية λ، (7-2)+(7-1)*λ :

$$\lambda\frac{dV}{dt} + \frac{\lambda}{\rho}\frac{\partial P}{\partial s} + \lambda g\frac{dz}{ds} + \lambda\frac{f}{2D}V|V| + a^2\frac{\partial V}{\partial s} + g\frac{dP}{dt} = 0 \qquad 7\text{-}3$$

$$\lambda\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho}\frac{dP}{dt} + \lambda g\frac{dz}{ds} + \lambda\frac{f}{2D}V|V| = 0 \qquad 7\text{-}4$$

$$\Rightarrow \lambda\frac{ds}{dt} = \lambda V + a^2 \quad , \quad \frac{1}{\rho}\frac{ds}{dt} = \frac{\lambda}{\rho} + \frac{V}{\rho} \quad \Rightarrow \lambda = \pm a$$

$$\Rightarrow \frac{ds}{dt} = \lambda + a \ , \quad \frac{ds}{dt} = \lambda - a$$

معادلات المطرقة المائية:

$$C^+: \quad \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a}\frac{dH}{dt} - \frac{g}{a}\frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D}V|V| = 0 \quad \text{when} \quad \frac{ds}{dt} = \lambda + a \qquad 7\text{-}5$$

$$C^-: \quad \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a}\frac{dH}{dt} + \frac{g}{a}\frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D}V|V| = 0 \quad \text{when} \quad \frac{ds}{dt} = \lambda - a \qquad 7\text{-}6$$

7-2- الحل العددي:

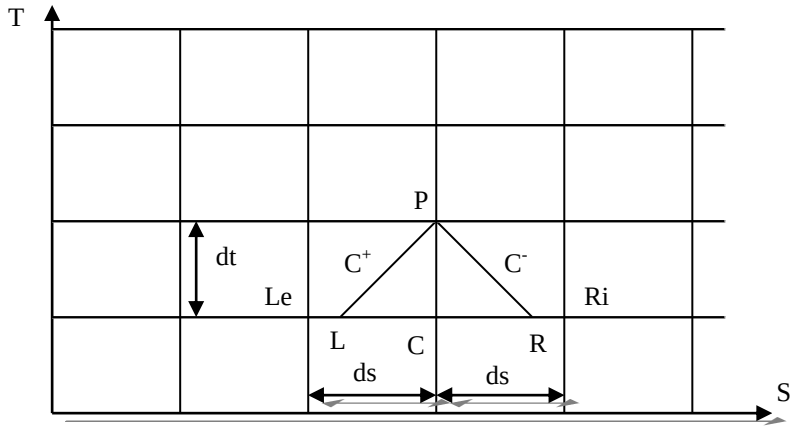
ينطلق الحل العددي من شبكة مستوية بإحداثي أفقي s و إحداثي شاقولي t، لتمثيل معادلتي المطرقة المائية، الشكل 7-1.

هذا التمثيل يسمى بالخطوط المميزة. و بينما تمثل الخطوط المميزة بخطوط مستقيمة في حال تقريب المعادلتين C^-،C^+ بإهمال الحدود اللاخطية، فإن الخطوط المميزة

العامة منحنية. يمكن أخذ Δt صغيرا بحيث يمكن تمثيل الخطوط المميزة بخطوط مستقيمة.و هذا ممكن بسبب:

1- يمكن جعل Δt صغيرا حسب المراد.

2- عادة $a>>V$ و منه ds/dt ثابت تقريبا.



الشكل 7-1
شبكة الحساب (T,s) ؛ الخطان المميزان C^+،C^-

بفرض أن الغزارة و الضاغط معلومان من حلول سابقة، في النقطتين Le،Ri، في الزمن t_0، و المطلوب معرفة الغزارة و الضاغط عند النقطة p في الزمن $t_0+\Delta t$، حيث p هي نقطة تقاطع خطين مميزين ينطلق أحدهما من L بميل $ds/dt=V+a$ و الثاني من R بميل $ds/dt=V-a$.

بتكامل المعادلتين (7-5) ،(7-6) على الخطين المميزين على الشبكة T-s ينتج:

$$C^+: \quad \frac{V_p-V_l}{\Delta t}+\frac{g}{a}\frac{H_p-H_l}{\Delta t}-\frac{g}{a}V_l\frac{dz}{ds}+\frac{f}{2D}V_l|V_l|=0 \qquad 7\text{-}7$$

$$C^-: \quad \frac{V_p-V_r}{\Delta t}+\frac{g}{a}\frac{H_p-H_r}{\Delta t}-\frac{g}{a}V_r\frac{dz}{ds}+\frac{f}{2D}V_r|V_r|=0 \qquad 7\text{-}8$$

حيث:

$$V_l=V_c+a\frac{\Delta t}{\Delta s}(V_{le}-V_c) \qquad , \qquad V_r=V_c+a\frac{\Delta t}{\Delta s}(V_{ri}-V_c)$$

ولحساب الضاغط و الغزارة (السرعة) عند مقطع داخلي في الأنابيب، حيث يتقاطع الخطان المميزان C^+،C^-، تحل المعادلتان (7-8)،(7-7) آنيا للحصول على المعادلتين:

$$V_P=\frac{1}{2}\left[\ (V_L+V_R)+\frac{g}{a}(H_L-H_R)+\frac{g}{a}\Delta t(V_L-V_R)\sin\theta-\frac{f\Delta t}{2D}\left(V_l|V_l|+V_R|V_R|\right)\ \right] \qquad 7\text{-}9$$

$$H_P = \frac{1}{2}\left[\frac{a}{g}(V_L - V_R) + (H_L + H_R) + \Delta t(V_L + V_R)\sin\theta - \frac{a}{g}\frac{f\Delta t}{2D}\left(V_l|V_l| - V_R|V_R|\right) \right] \qquad 7\text{-}10$$

حيث sin = dz/ds هو ميل الأنبوب.

7-3- الشبكة Δt, Δs :

إن الشكل العام للخطوط المميزة كمنحنيات وتقريبها كخطوط مستقيمة على فترات زمنية صغيرة يؤديان إلى مواجهة مشكلة إيجاد قيم مناسبة لـ Δt،Δs تعطي حلولا صحيحة و مستقرة. و الحصول على شعاع لقيم Δt،Δs سيؤدي إلى صعوبات إجرائية برمجية لأنه من الصعب تتبع هذه القيم و معرفة أين ومتى حدث كل منها. لحل هذه المسألة يتم اختيار شبكة مستطيلة منتظمة في المستوي t،s حيث Δs، Δt تثبت لكل الأزمنة عند قيم تخفض الاستقراء و تسهل البرمجة . تدعى هذه الطريقة طريقة الشبكة المستطيلة. لتأسيس هذه الشبكة: يقرر إلى كم جزء N سيقسم أنبوب طوله l و بذلك يثبت Δs=l/N. ثم تحسب Δt من المعادلات المميزة المتكاملة:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{V + a} \qquad \text{for } C^+$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{V - a} \qquad \text{for..} C^-$$

و لكن يجب أن تحقق Δt شرط كوران:

$$\Delta t \le \frac{\Delta s}{\max|V + a|} \qquad 7\text{-}11$$

يضمن تحقيق شرط كوران الاستقرار الرياضي و صحة النتائج، وعلى الشبكة الحسابية يضمن شرط كوران أن تقع النقطتان R،L داخل المجال Ri،Le.

إن وقوع النقطتين R،L خارج المجال Ri،Le سيؤدي إلى تطور مسألة عدم الدقة و لا استقرار الحلول. لأنه في هذه الحالة تحل مسألة تقاطع الخطين في نقطة في زمن لم تكن قد وصلت الموجتان القادمتان من اليسار و اليمين.

إن اختيار Δt بحيث يتطابق L،Le ستؤدي إلى استقراء في حده الأدنى و دقة أكبر ، شكل الموجة مربع. أما عند اختيار قيمة أعلى لـ Δt ستزاح L إلى خارج Le مما

يؤدي إلى عدم استقرار و ابتعاد تدريجي عن الحل الدقيق. أما القيم الصغيرة لـ Δt تعطي استقراء ضعيف و بالتالي نتائج غير دقيقة.

يجب الاهتمام لاختيار Δt حيث أن الآثار الناجمة عن سوء هذا الاختيار ربما لا تظهر إذا كانت فترة المحاكاة ليست كبيرة.

7-4- البارامترات التي تؤثر على دقة الحل[3،14،15]:

1- تأثير الاحتكاك: الضاغط الأعظمي الذي يحدث عند إغلاق مفاجئ:

$$H_{max}=H_0+h_f+\Delta h$$

حيث H_0 الضاغط الأولي، h_f فاقد الاحتكاك ، Δh زيادة ضاغط المطرقة المائية.

2- تأثير زيادة N (عدد المقاطع): يؤثر اختيار N على دقة الحل في حالة التغير السريع للسرعة. لكن يتناسب زمن التنفيذ للبرنامج على الحاسب مع N^2.

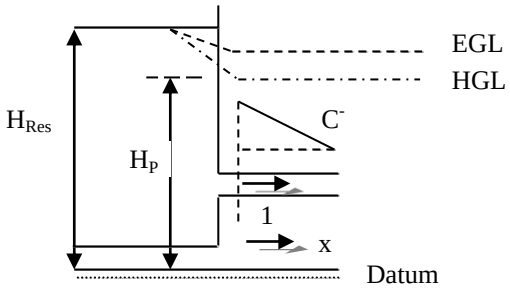
3- تأثير ميل الأنبوب: من المفضل أن يقوم المصمم بتنعيم شكل المقطع الطولي لخفض عدد الأنابيب بميل أكبر من 25% إلى أنابيب بميول أقل و محدودة.

7-5- <u>الشروط المحيطية</u>[3،7،11،12]:

في حال حساب الضاغط و الغزارة (السرعة) عند مقطع محيطي، حيث لا يوجد سوى خط مميز واحد و مجهولان، يجب إضافة معادلة ثانية اعتماد على الشروط المحيطية. عند وجود جهاز هيدروليكي (مضخة – سكر تحكم بالغزارة – سكر تحكم بالضاغط) بين أنبوبين، تحل مسألة المطرقة المائية في المقطعين على طرفي الجهاز بإضافة معادلات المنحنيات المميزة للجهاز إلى معادلتي المطرقة المائية لجزئي الأنبوبين على طرفي الجهاز.

- **<u>خزان</u>**:

- **خزان في بداية الأنبوب**: في حال وجود خزان كبير، يمكن فرض أن منسوب الضاغط البيزومتري عند الخزان ثابت؛ الشكل 7-2.



الشكل 7-2

خزان محدد المنسوب

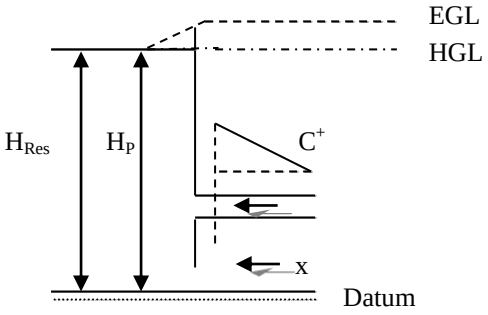
في هذه الحالة الشرط المحيطي:

$$H_p=H_{Res}-(1+k)*Q_P^2/(2gA^2)= \text{Const.}$$

حيث H_{Res} منسوب الماء في الخزان عن منسوب مقارنة ثابت. و منه السرعة:

$$V_P = [\ (V_R)+\frac{g}{a}(H_P - H_R)-\frac{g}{a}\Delta t(V_R)\sin\theta-\frac{f\Delta t}{2D}(V_R|V_R|)\ ] \qquad 7\text{-}12$$

- **خزان في نهاية الأنبوب**: في هذه الحالة يمكن فرض أن منسوب الضاغط البيزومتري عند الخزان ثابت؛ الشكل 7-3.



الشكل 7-3

خزان محدد المنسوب

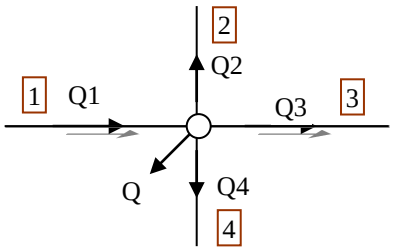
الشرط المحيطي: $H_p=H_{Res}= \text{Const.}$. و منه السرعة:

$$V_P = [\ (V_L)-\frac{g}{a}(H_P - H_L)+\frac{g}{a}\Delta t(V_L)\sin\theta-\frac{f\Delta t}{2D}(V_R|V_R|)\ ] \qquad 5\text{-}12'$$

❖ **مصالبة** (التقاء 4 أنابيب):

- **عقدة** التقاء 4 أنابيب: 4- pipe junction one-in three-out

و يخرج من العقدة سحب Q، الشكل 7-4.



الشكل 7-4

عقدة تفرع 4-pipe 1-in 3-out

معادلات الخطوط الأربعة المميزة:

Pipe -1- C^+ $\quad V_{P1} = C_1 - C_2 H_{P1}$

Pipe -2- C^- $\quad V_{P2} = C_3 + C_4 H_{P2}$

Pipe -3- C^- $\quad V_{P3} = C_5 + C_6 H_{P3}$

Pipe -4- C^- $\quad V_{P4} = C_7 + C_8 H_{P4}$

علاقة الاستمرار:

$$V_{P1} A_1 = V_{P2} A_2 + V_{P3} A_3 + V_{P4} A_4 + Q$$

علاقة العمل-الطاقة بإهمال الفواقد المحلية:

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

بحل هذه المعادلات آنيا بدلالة قيم الضاغط ينتج:

$$H_{P1} = H_{P2} = H_{P3} = H_{P4} = \frac{C_1 A_1 - C_3 A_2 - C_5 A_3 - C_7 A_4 - Q}{C_2 A_1 + C_4 A_2 + C_6 A_3 + C_8 A_4} \qquad 7\text{-}13$$

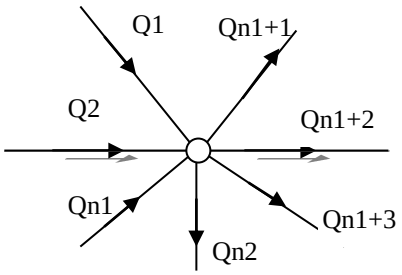
و بالتعويض في المعادلات المميزة يتم الحصول على قيم السرع في الأنابيب.

و عموما عندما يختلف اتجاه الغزارات عما هو في الشكل 5-4، يجري ما يلي:

- عند كتابة معادلات الخطوط المميزة: تؤخذ معادلة الخط المميز- C^+ - للغزارة الداخلة إلى العقدة، و معادلة الخط المميز- C^- - للغزارة الخارجة من العقدة.
- عند كتابة معادلة الاستمرار: توضع الغزارة الداخلة إلى العقدة في الطرف الأيسر و توضع الغزارة الخارجة من العقدة في الطرف الأيمن.
- عند حساب الضاغط من المعادلة 5-13: من المعادلات المميزة $V_P = C_i \pm C_j H_P$ يوضع الجداء $C_i A_p$ في البسط باشارة موجبة للغزارة الداخلة، وباشارة سالبة للغزارة الخارجة.

▪ **عقدة** (التقاء n أنبوب): n- pipe Junction n1- in n2- out

يدخل إلى العقدة n1 pipes، و يخرج n2 pipe. و يخرج سحب Q، الشكل 7-4'.



الشكل 7-4'

عقدة تفرع؛ n1- in; n2- out

معادلات الخطوط المميزة للجزء الأخير من الأنابيب الداخلة إلى العقدة:

Pipe -in- C$^+$ $$V_P[i] = C_{in}[i]_1 - C_{in}[i]_2 H_P[i]$$

معادلات الخطوط المميزة للجزء الأول من الأنابيب الخارجة من العقدة:

Pipe -out- C- $$V_P[o] = C_{out}[o]_3 + C_{out}[o]_4 H_P[o]$$

علاقة الاستمرار:

$$\sum_{i=1}^{n1} V_P[i] Ar_{in}[i] = \sum_{o=1}^{n2} V_P[o] Ar_{out}[o] + Q$$

علاقة العمل-الطاقة بإهمال الفواقد المحلية:

$$H_P[i] = H_P[o]$$

بحل هذه المعادلات آنيا بدلالة قيم الضاغط ينتج:

$$H_P[i] = H_P[o] = \frac{\sum_{i=1}^{n1} C_{in}[i]_1 Ar_{in}[i] - \sum_{o=1}^{n2} C_{out}[o]_3 Ar_{out}[o] - Q}{\sum_{i=1}^{n1} C_{in}[i]_2 Ar_{in}[i] + \sum_{o=1}^{n2} C_{out}[o]_4 Ar_{out}[o]} \qquad 7\text{-}13'$$

و بالتعويض في المعادلات المميزة يتم الحصول على قيم السرع في الأنابيب.

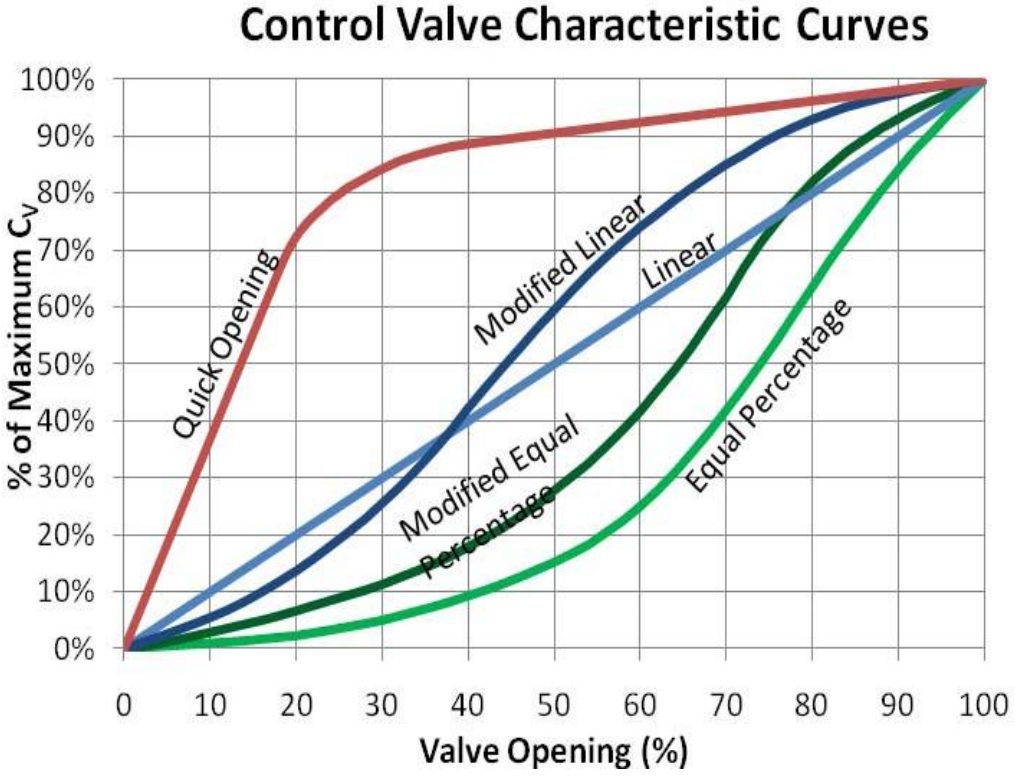
❖ **سكر**:

لدراسة تشكل موجة الضغط – الغزارة الناتجة عن إغلاق أو فتح السكر و انتشار و انعكاس موجة المطرقة المائية عند السكر، يلزم إضافة المعادلة المميزة

للسكر إلى المعادلات المميزة لبقية المكونات. يعبر عن المعادلة المميزة للسكر بفرق الضغط dh اللازم تطبيقه على فتحة السكر من اجل تمرير غزارة q بالشكل:

$$q = c_v \sqrt{dh} \qquad 7\text{-}14$$

حيث c_v عامل الغزارة flow coefficient، احد عوامل فاقد السكر valve loss coefficients، و هو يرتبط بفتحة السكر و بميكانيكية السكر. يوضح، الشكل 5-5، عدة طرق لارتباط عامل الغزارة كتابع لفتحة السكر.



الشكل 7-5

C_v تابع لنسبة فتحة السكر لعدة طرق لفتح السكر

إن تأثير فتحة السكر على سلوك السكر، عند الفتح أو الإغلاق ، يحدث بشكل أساسي عندما تكون الفتحة بين 0 إلى 10 % من الفتحة الكاملة. و بالتالي للحد من تأثير المطرقة المائية الناتجة عن إغلاق أو فتح سكر يجب أن يتم الفتح والإغلاق بسرعتين؛ سرعة بطيئة من 0 إلى 10 % ، و سرعة اكبر من 10 إلى 100 %، أو وضع برنامج سرعة بعد إجراء عدة سيناريوهات تحليل للمنظومة الهيدروليكية

لعدة منحنيات سرعة و اختيار المنحني الذي يعطي أفضل أداء للمنظومة عند حدوث المطرقة المائية.

يمكن أن تكتب المعادلة المميزة للسكر بالشكل:

$$Q_P = C_d A_G \sqrt{2g\Delta H} \qquad 7\text{-}14'$$

حيث ΔH: الفاقد في الضاغط خلال السكر، Q_P : الغزارة المارة خلال السكر، A_G: مساحة فتحة السكر، C_d:ثابت تصريف السكر.

و يمكن أن تعطى المعادلة المميزة للسكر 7-14' بدلالة τ الذي يمثل وضعية فتحة السكر إلى وضعيته في الحالة المستقرة و الذي يعطى بدلالة Cd حسب المعادلة :

$$\tau = C_d A_G / (C_d A_G)_0$$

و يمكن أن تعطى المعادلة المميزة للسكر بالشكل:

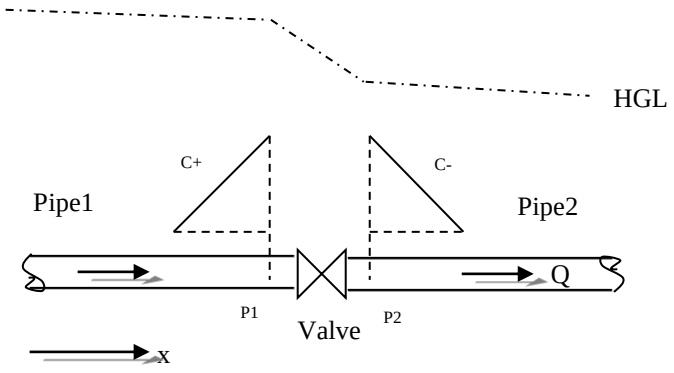
$$\Delta H = K_L V^2 / (2g) \qquad 7\text{-}14''$$

حيث K_L : معامل فاقد السكر، Valve loss coefficient.

لدراسة المطرقة المائية الناجمة عن إغلاق أو فتح سكر تضاف المعادلة المميزة للسكر إلى المعادلات المميزة لبقية المنظومة حسب الحالات التالية:

- **سكر بين أنبوبين** (شرط محيطي داخلي):

في حال وجود سكر بين أنبوبين يدخل الماء من الأنبوب -1- ويخرج من الأنبوب -2- ، الشكل 7-6، و يغلق هذا السكر أو يفتح وفق برنامج أو جدول زمني محدد بسرعة واحدة أو أكثر بين وضعيتين خلال فترة زمنية T_c.



الشكل 7-6

سكر بين أنبوبين

مثال: عندما يغلق السكر بحيث تتحول نسبة فتحة 100% إلى الصفر خلال زمن T_c، يمكن للشرط المحيطي أن يكون:

$$\tau = (1 - t/T_c) \qquad 0 \le t \le T_c$$

$$\tau = 0 \qquad t \ge T_c$$

المعادلات المميزة:

Pipe -1- C^+ $\qquad V_{P1} = C_1 - C_2 H_{P1}$

Pipe -2- C^- $\qquad V_{P2} = C_3 + C_4 H_{P2}$

معادلة الاستمرار:

$$V_{P1} A_1 = V_{P2} A_2$$

معادلة العمل-الطاقة:

$$H_{P1} = H_{P2} + K_L \frac{V_{P2}^2}{2g}$$

$$C_v = (Q_0 \tau)/(2H_0) \; K_L = (2 * g * ar^2)/C_v^{\,2}$$ ؛

بتعويض الضاغط من المعادلتين المميزتين للأنبوب -1- ، -2- في علاقة العمل و اخذ علاقة الاستمرار، تنتج المعادلة التالية للسرعة في الأنبوب -2-:

$$V_{P2}^2 + \frac{2g}{K_L}\left(\frac{1}{C_4} + \frac{A_2}{C_2 A_1}\right) V_{P2} - \frac{2g}{K_L}\left(\frac{C_3}{C_4} + \frac{C_1}{C_2}\right) = 0$$

$$C_5 = 2g\left(1/C_4 + A_2/C_2 A_1\right) \quad , \qquad C_6 = 2g\left(C_3/C_4 + C_1/C_2\right)$$

$$V_{P2} = \frac{C_5}{2K_L}\left[\, -1 + \sqrt{1 + 4C_6 K_L / C_5^2} \,\right] \qquad 7\text{-}15$$

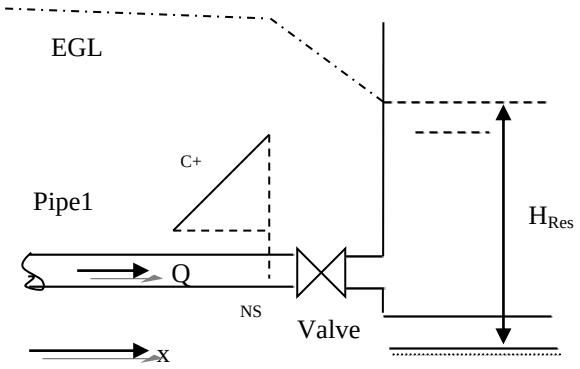
هذه العلاقة صحيحة طالما بقي اتجاه الجريان بنفس الاتجاه في الحالة المستقرة.

عند انعكاس الجريان، تصبح معادلة السرعة:

$$V_{P2} = \frac{C_5}{2K_{LREV}}\left[\, 1 - \sqrt{1 - \frac{4C_6 K_{LREV}}{C_5^2}} \,\right] \qquad 7\text{-}15'$$

- **سكر و خزان في نهاية أنبوب** (شرط محيطي):

في حال وجود سكر و خزان في نهاية أنبوب -1-، الشكل 7-7، تكتب المعادلات التالية :



الشكل 7-7

سكر و خزان في نهاية أنبوب

المعادلة المميزة:

Pipe -1- C^+ $\qquad V_{P1} = C_1 - C_2 H_{P1}$

معادلة العمل-الطاقة:

$$H_{P1} = H_{\mathrm{Res}} + K_L \frac{V_{P1}^2}{2g}$$

بتعويض الضاغط من المعادلة المميزة للأنبوب -1- في علاقة العمل تنتج المعادلة التالية للسرعة في الأنبوب -1-:

$$V_{P1}^2 + \frac{2g}{K_L}(\frac{1}{C_2})V_{P1} + \frac{2g}{K_L}(H_0 - \frac{C_1}{C_2}) = 0$$

$$C_5 = 2g(1/C_2) \qquad , \qquad C_6 = 2g(H_0 - C_1/C_2)$$

$$V_{P2} = \frac{C_5}{2K_L}[\ -1 + \sqrt{1 - 4C_6 K_L / C_5^2}\ ] \qquad 7\text{-}16$$

1- **سكر في نهاية أنبوب** (شرط محيطي):

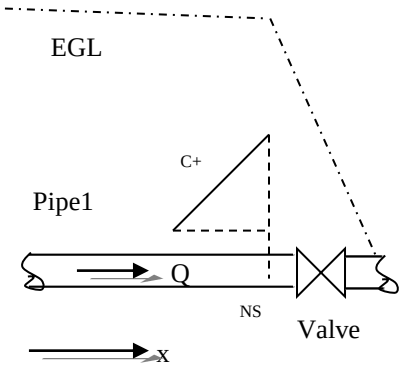
في حال وجود سكر في نهاية أنبوب، الشكل 7-8، تكتب المعادلات التالية:

المعادلة المميزة:

Pipe -1- C^+ $\qquad V_{P1} = C_1 - C_2 H_{P1}$

معادلة العمل-الطاقة:

$$H_{P1} = K_L \frac{V_{P1}^2}{2g}$$



الشكل 7-8
سكر في نهاية أنبوب

بتعويض الضاغط من المعادلة المميزة للأنبوب -1- في علاقة العمل تنتج المعادلة التالية للسرعة في الأنبوب -1-:

$$V_{P1}^2 + \frac{2g}{K_L}\left(\frac{1}{C_2}\right)V_{P1} - \frac{2g}{K_L}\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = 0$$

$$C_5 = 2g\left(1/C_2\right) \qquad , \qquad C_6 = -2g\left(C_1/C_2\right)$$

$$V_{P2} = \frac{C_5}{2K_L}\left[\ -1 + \sqrt{1 - \frac{4C_6K_L}{C_5^2}}\ \right] \qquad 7\text{-}16'$$

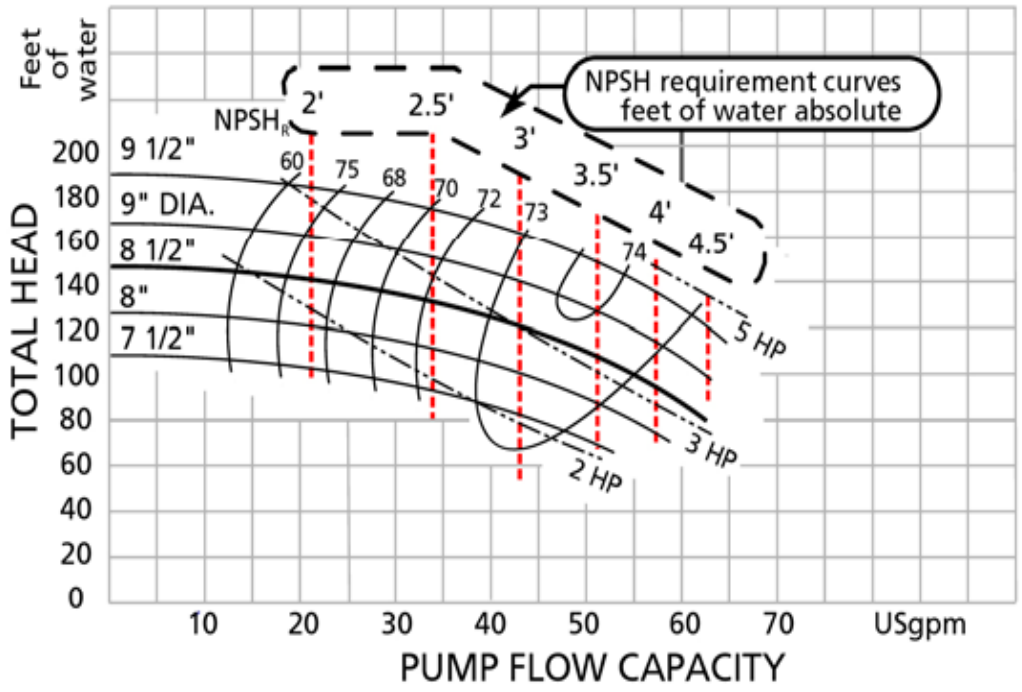
❖ **مضخة**:

تقدم المضخة ضاغطا h_p لواحدة الوزن من تيار السائل الذي يمر بالمضخة. و يعبر عن الاستطاعة التي تقدمها المضخة للتيار المار بغزارة Q بالعلاقة $P_W = Q * \gamma * h_p$. و لمعرفة الطبيعة الهندسية المميزة لعمل المضخة والوصف الرياضي لعمل المضخات مع المنظومة الهيدروليكية، يجب معرفة المنحنيات المميزة للمضخة التي تعرف بالعلاقات:

$$F\left(D, n, Q, h_p, P_W, \eta, NPSH\right) = 0$$

والتي تعطي الضاغط h_p، الاستطاعة المقدمة من المحرك P_W، المردود η، و إحتياطي التكهف NPSH، بدلالة الغزارة Q، سرعة دوران الدولاب العامل n، rpm، وقطر الدولاب العامل D. و تعطى عادة أربع معادلات للمنحنيات المميزة

التالية(الشكل 7-9): الضاغط، الاستطاعة المقدمة من المحرك، المردود، و إحتياطي التكهف كتوابع للغزارة بدلالة سرعة دوران وقطر الدولاب العامل:



الشكل 7-9
الضاغط، الاستطاعة، المردود، إحتياطي التكهف تابع للغزارة

$$F(D,n,Q,h_p)=0$$

$$F(D,n,Q,P_W)=0$$

$$F(D,n,Q,NPSH)=0$$

$$F(D,n,Q,\eta)=0$$

و لجعل التعامل مع هذه المعادلات و المعالجات الرياضية أكثر سهولة يستخدم بالتوازي مع المعادلات المميزة، علاقات التشابه homologous التالية:

$$\left(\frac{Q}{ND^3}\right)_1=\left(\frac{Q}{ND^3}\right)_2.,\left(\frac{h_p}{N^2D^2}\right)_1=\left(\frac{h_p}{N^2D^2}\right)_2.$$

$$\left(\frac{P_w}{\rho N^3D^5}\right)_1=\left(\frac{P_w}{\rho N^3D^5}\right)_2$$

و السرعة المميزة Specific Speed NS، تحتوي متغيرات المضخة بالعلاقة التالية:

$$N_S=\frac{NQ^{1/2}}{(gh_p)^{3/4}} \qquad \text{(لا واحدي)}$$

في الحالة المستقرة تقدم المضخة التي يدور دولابها العامل بسرعة اسمية rpm للغزارة Q المارة عبرها ضاغط h_p للتغلب على فرق منسوب و على ضياع الطاقة بالاحتكاك. تعطى معادلة المنحني المميز للضاغط h_p كتابع للغزارة Q بدلالة السرعة الاسمية:

$$h_p = A_p Q^2 + B_p Q + C_p \qquad 7\text{-}17$$

المنحني المميز للمنظومة كتابع لفرق المنسوب الطبوغرافي و فاقد الضاغط بالاحتكاك:

$$h_s = h_g + \lambda \frac{l}{d} \frac{Q^2}{2gA^2} \qquad 7\text{-}17'$$

إن نقطة تقاطع المنحنيين هي نقطة عمل المنظومة (hr، Qr) .

عند حدوث طارئ كانقطاع التيار الكهربائي عن المحرك، تبدأ سرعة دوران الدولاب العامل بالتناقص، مما يؤدي إلى تغير المحني المميز للمضخة بدلالة سرعة الدوران:

$$h_p = -AQ^2 + BNQ + CN^2 \qquad 7\text{-}18$$

تتحرك نقطة تقاطع المنحني المميز للمضخة و المنحني المميز للمنظومة على منحني يعطي الضاغط hp كتابع للغزارة Q من الدرجة الثانية بدلالة سرعة الدوران، ولمعرفة طبيعة هذا المنحني يجب حل المعادلات المميزة للمضخة، و معادلة التحريك للدولاب العامل، مع معادلات المطرقة المائية للمنظومة.

عند وجود مضخة بين أنبوبين -1- و -2-، الشكل 7-10، تكتب المعادلات التالية:

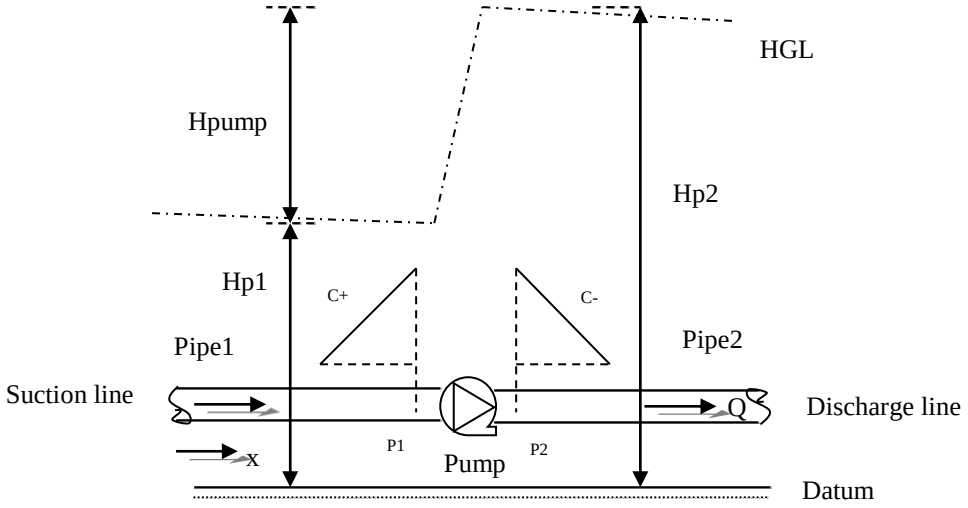
المعادلات المميزة:

Pipe -1- C+ $\qquad V_{Ps} = C_1 - C_2 H_{Ps}$

Pipe -2- C- $\qquad V_{Pd} = C_3 + C_4 H_{Pd}$

معادلة الاستمرار:

$$V_{Ps} A_s = V_{Pd} A_d$$



الشكل 7-10
مضخة بين أنبوبين

علاقة العمل-الطاقة:

$$H_{Ps} + h_p = H_{Pd} \;; \qquad h_p = A_p Q^2 + B_p Q + C_p$$

أثناء إقلاع أو إيقاف مضخة تتغير سرعة دوران الدولاب حسب العلاقة التالية:

$$N(t+\Delta t) = N(t) - \frac{60}{2\pi I} T(t)\Delta t \qquad 5\text{-}19$$

حيث N(t) سرعة الدولاب في اللحظة t و ترتبط بالسرعة الزاوية بالعلاقة $w(t)=2\pi N(t)/60$ ، I عزم عطالة الاجزاء الدوارة من المضخة و المحرك، T(t) العزم المطبق على الدولاب العامل و يعطى بدلالة الاستطاعة بالعلاقة $T(t)=P(t)/w(t)$.

لحل هذه المعادلات آنيا يمكن إتباع الخوارزمية التالية:

2- إرجاع معادلة الخط المميز للمضخة (Q،H) إلى مجموعة من الخطوط المستقيمة تربط بين كل نقطتين متتاليتين، Piecewise Linear Representation ، و استخدام معادلة الخط المستقيم الذي يمر من نقطتين A،B يحدس الباحث أن نقطة العمل المؤقتة تقع بينهما. تتحول معادلة المنحني المميز من الدرجة الثانية إلى الدرجة الأولى:

$$\frac{h_p}{N^2} = N_{st}\left[\left(\frac{\left(h_p/N^2\right)_A - \left(h_p/N^2\right)_B}{\left(Q/N\right)_A - \left(Q/N\right)_B}\right)\frac{Q}{N} - \left(\frac{\left(h_p/N^2\right)_A - \left(h_p/N^2\right)_B}{\left(Q/N\right)_A - \left(Q/N\right)_B}\right)\left(\frac{Q}{N}\right)_B + \left(\frac{h_p}{N^2}\right)_B\right]$$

$$\frac{h_p}{N^2} = N_{st}\left[\; C_7 \frac{Q}{N} + C_8 \;\right] \qquad 7\text{-}20$$

3- حل مجموعة المعادلات بدلالة السرعة في أنبوب الدفع -2- يعطي:

$$V_{Pd} = \frac{\frac{C_1}{C_2} + N_{st} N^2 C_8 + \frac{C_3}{C_4}}{\frac{1}{C_4} + \frac{A_d}{C_2 A_s} - \frac{N_{st} N A_d C_7}{N_{pu}}} \qquad 7\text{-}21$$

حيث N_{st} عدد مراحل المضخة. N_{pu} عدد المضخات العاملة على التوازي.

4- إذا كان V_{pd} اكبر من الصفر يتم إيجاد بقية المجاهيل بالرجوع إلى معادلات الخطوط المميزة لأنبوبي السحب و الدفع و المضخة.

5- إذا كان h_p اصغر من الصفر يتم فتح bypass ، و وضع $h_p=0$ و $H_{pd}=H_{ps}$ ثم حساب السرع من المعادلتين:

$$V_{Ps} = \frac{A_d}{A_S} V_{pd} \,.\, , \; V_{Pd} = (C_1 C_4 + C_2 C_3)/(C_2 + C_4 \, A_d / A_s) \qquad 7\text{-}22$$

و حساب H_{ps} و H_{pd} من الخطين المميزين لأنبوب السحب و الدفع.

6- إذا كان V_{pd} اصغر من الصفر يتم وضع $V_{pd} = 0$ و $V_{ps} = 0$ و حساب H_{ps} و H_{pd} من الخطين المميزين لأنبوب السحب و الدفع.

7- حساب Q/N و التأكد من كونها بين نقطتي حساب مستقيم الخط المميز للمضخة، إن لم تكن، يتم البحث عن نقطتين من المنحني المميز للمضخة تقع Q/N بينهما و إعادة حساب C7، C8 و إعادة إجراءات الحل.

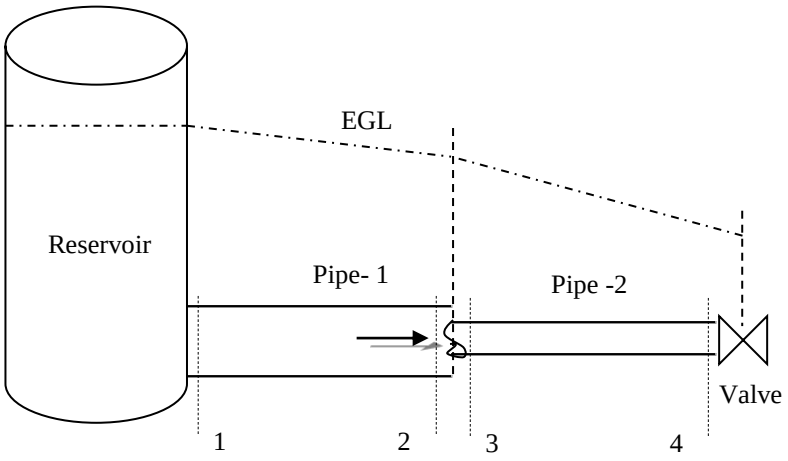
- حالة دراسية: اغلاق سكر

المنظومة في الشكل 7-11 تتغذى من خزان منسوب الماء فيه 67.7 m بغزارة $1\ m^3/s$ المطلوب حساب تغيرات الضغط و الغزارة بسبب اغلاق السكر.

المعطيات:

Specification	Pipe -1-	Pipe -2-
L (m)	550	450
D (m)	0.75	0.6
Wave speed a (m/s)	1100	900
f	0.01	0.012

يعطى $\tau=0.900$ للسكر في اللحظة $t=0.5$ s.



الشكل 7-11

يقسم كل أنبوب إلى جزأ واحد:

$\Delta x_1=550$ m , $B_1=\alpha_1/(A_1 g)=253.81$, $R_1=\lambda_1.\Delta x_1/(2g.D_1.A_1^2)=1.9144$

$\Delta x_2=450$ m , $B_2=\alpha_2/(A_2 g)=324.47$, $R_2=\lambda_2.\Delta x_2/(2g.D_2.A_2^2)=5.7361$

$\Delta t=0.5$ s

المنسوب البيزومتري في الحالة المستقرة:

$H_1=H_f=67.7$ m

$H_2=H_3=H_R-R_1Q_0^2=65.78$ m

$H_4=H_3-R_2Q_0^2=60.05$ m

المقطع (4) اللحظة $t=0.5$ s ، $\tau=0.900$:

$H_{p4}=C_p-B_2Q_p$

$C_p=H_3+Q_3(B_2-R_2|Q_3|)=384.51$, $C_v=(Q_0.\tau)^2/(2H_0)=6.744*10^{-3}$

$Q_{p4}=0.970$ m^3/s

$H_{p4}=C_p-B_2Q_p=69.78$ m

المقطع (3,2) اللحظة $t=0.5$ s :

$H_{p3}=C_M-B_2Q_{p3}$

$H_{p2}=C_p-B_1Q_{p2}$

$C_M=H_4-Q_4(B_2-R_2|Q_4|)=-251.83$, $C_p=H_1+Q_1(B_1-R_1|Q_1|)=319.596$

$Q_{p2}=Q_{p3}$, $H_{p2}=H_{p3}$

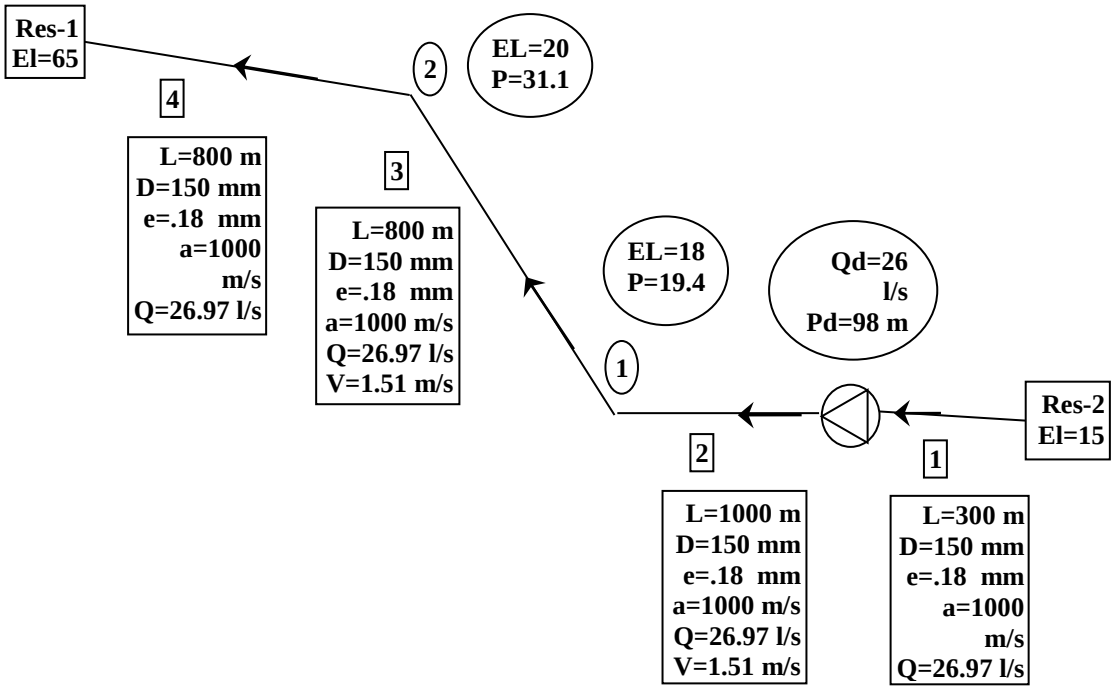
$Q_{p2}=Q_{p3}=(C_M-C_p)/(B_1+B_2)=0.988$

$H_{p2}=H_{p3}=C_p-B_1Q_{p2}=68.78$ m

و هكذا حتى الوصول الاستقرار.

- **حالة دراسية: انقطاع التيار الكهربائي عن مضخة**

حساب تغيرات الضاغط و الغزارة للمنظومة في الشكل 7-12 بالاستعانة ببرنامج طور بلغة C^{++} بطريقة المميزات المحددة.

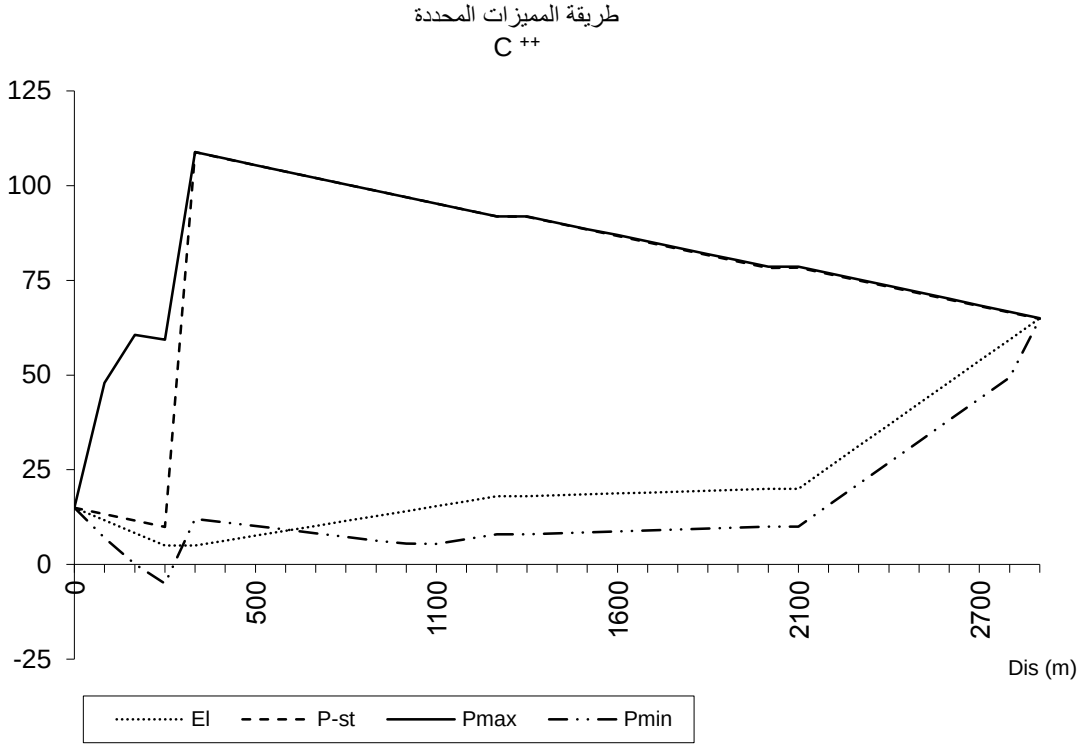


الشكل 7-12

منظومة ضخ.

- **نتائج طريقة المميزات المحددة:** الحساب برمجيا بلغة C^{++}

منسوب البيزومتري الأعظمي و الأصغري؛ توقف مضخة، الشكل 7-13 :



الشكل 7-13

المنسوب البيزومتري الأعظمي Pmax و الأصغري Pmin

عند توقف مضخة، وفق طريقة المميزات المحددة: C^{++}

المنسوب البيزومتري الستاتيكي Pst؛ المقطع الطولي للمنظومة.

- **نتائج طريقة المميزات المحددة:** الحساب برمجيا بلغة C^{++}.

تغير المنسوب البيزومتري أعلى و أدنى المضخة مع الزمن؛ توقف مضخة، الشكل 7-14:

الشكل 7-14

تغير المنسوب البيزومتري أعلى P-up و أدنى P-dn المضخة

مع الزمن،عند توقف المضخة، وفق طريقة المميزات المحددة: C^{++}

الفصل الثامن

طريقة المميزات الضمنية

8-1- معادلات المميزات الضمنية

8-2- معادلات الشروط المحيطية

طريقة المميزات الضمنية

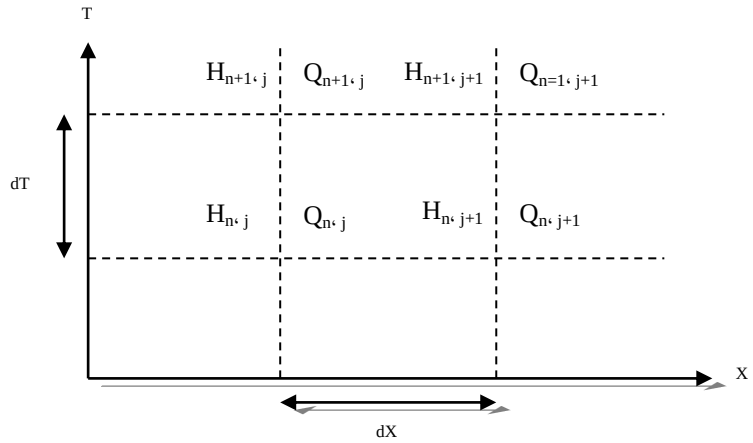
Implicit Characteristic Method

8-1- معادلات المميزات الضمنية[9]:

تشكل معادلتا الاستمرار و مصونية كمية الحركة لظاهرة المطرقة المائية، زوج معادلات تفاضلية جزئية، قطعية، لا خطية، لا يمكن حلها تحليليا. بالتالي تم تطوير طرق لا تحليلية لحل معادلات المطرقة المائية. كون المعادلات قطعية يعني أن الحل يتبع مسارات مميزة معينة. تعتبر سرعة الموجة بارامتر مميز.

تعتمد طريقة المميزات الضمنية في حل معادلات المطرقة المائية على طريقة الفروق المحدودة الضمنية Implicit finite difference method . في هذه الطريقة يتم استبدال المشتقات الجزئية بفروق محدودة، وبالتالي الحصول على مجموعة معادلات يتم حلها آنيا. إن هذه الطريقة مستقرة بدون شروط مهما كانت الفترة الزمنية المستخدمة time step . علما أنه في الأنظمة الكبيرة يلزم حل عدد كبير من المعادلات اللاخطية آنيا.

إن فضاء الحل هو شبكة في المستوي x،t ،الشكل 8-1، ويعين Q،H في أي نقطة (x,t) ليتم الحصول على شبكة من Q(x,t) و H(x,t).



الشكل 8-1
المخطط الحسابي لطريقة المميزات الضمنية

إن أي عقدة في شبكة الحل هي إما عقدة في المنظومة الهيدروليكية أو عقدة حسابية تقع ضمن الأنابيب. و الخط الواصل بين عقدتين على الشبكة الحسابية يمثل أنبوب، و يمكن تمثيل السكور و المضخات كخط بين عقدتين على الشبكة. و تشكل معادلتا المطرقة المائية علاقات للضاغط و الغزارة في المتغيرين x،t. إن مخطط طريقة العناصر المحدودة و إجراء تحويل للمعادلات الناظمة إلى فروق محدودة يتم لكافة عناصر المنظومة الهيدروليكية.

في هذه الطريقة تفرض علاقة المشتق الجزئي لـ H بالنسبة للزمن H_t كما يلي:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \left(H_{n+1,j+1} + H_{n+1,j} - H_{n,j+1} - H_{n,j}\right)/(2*\Delta t) \qquad 8\text{-}1$$

حيث H_n،$_j$: الضاغط في العقدة j في اللحظة ndt.

وبشكل مماثل المشتق الجزئي لـ Q بالنسبة للزمن Q_t:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \left(Q_{n+1,j+1} + Q_{n+1,j} - Q_{n,j+1} - Q_{n,j}\right)/(2*\Delta t) \qquad 8\text{-}2$$

حيث $Q_{n,j}$: الغزارة في العقدة j في اللحظة ndt.

تفرض علاقة المشتق الجزئي لـ H بالنسبة للمكان H_x بالشكل التالي:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \left(H_{n+1,j+1} + H_{n,j+1} - H_{n+1,j} - H_{n,j}\right)/(2*\Delta x) \qquad 8\text{-}3$$

وبشكل مماثل المشتق الجزئي لـ Q بالنسبة للمكان Q_x:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \left(Q_{n+1,j+1} + Q_{n,j+1} - Q_{n+1,j} - Q_{n,j}\right)/(2*\Delta x) \qquad 8\text{-}4$$

أعطت العلاقات الأربعة للمشتقات الجزئية نتائج جيدة عند حساب مغلفات المنسوب البيزومتري (HGL). آثر بعض الباحثين إضافة معامل وزن، θ، على علاقة المشتق الجزئي المكاني لمزيد من الاستقرار الرياضي، لتصبح المعادلات:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\theta}{\Delta x}\left(H_{n+1,j+1} - H_{n+1,j}\right) + \frac{(1-\theta)}{\Delta x}\left(H_{n,j+1} - H_{n,j}\right) \qquad 8\text{-}3'$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\theta}{\Delta x}\left(Q_{n+1,j+1} - Q_{n+1,j}\right) + \frac{(1-\theta)}{\Delta x}\left(Q_{n,j+1} - Q_{n,j}\right) \qquad 8\text{-}4'$$

بتعويض العلاقات التقريبية للمشتقات في معادلتي كمية الحركة و الاستمرار تتحول المعادلتان التفاضليتان إلى معادلتين جبريتين.

معادلة كمية الحركة:

$$\frac{\Delta x_j}{2g\theta A_j \Delta t}\left(Q_{n+1,j+1}+Q_{n+1,j}-Q_{n,j+1}-Q_{n,j}\right)+\left(H_{n+1,j+1}-H_{n+1,j}\right)+$$

$$+\left(\frac{1-\theta}{\theta}\right)\left(H_{n,j+1}-H_{n,j}\right)+\frac{\Delta x_j f_j}{4g\theta D_j A_j^2}\left(Q_{n,j}\left|Q_{n,j}\right|+Q_{n,j+1}\left|Q_{n,j+1}\right|\right)=0 \quad 8\text{-}5$$

تم تقريب، $Q|Q|$، إلى الشكل: $\left(Q_{n,j}\left|Q_{n,j}\right|+Q_{n,j+1}\left|Q_{n,j+1}\right|\right)/2$، لتصبح المعادلة خطية.

معادلة الاستمرار:

$$\left(H_{n+1,j+1}+H_{n+1,j}-H_{n,j+1}-H_{n,j}\right)+$$

$$+\frac{2\Delta t C_j^2\theta}{gA_j\Delta x_j}\left(Q_{n+1,j+1}-Q_{n+1,j}\right)+\frac{2\Delta t C_j^2(1-\theta)}{gA_j\Delta x_j}\left(Q_{n,j+1}+Q_{n,j}\right)=0 \quad 8\text{-}6$$

يمكن كتابة المعادلتين 8-5 و 8-6 بشكل أكثر أناقة، بوضع رموز مختصرة لمعاملات المعادلتين كالتالي:

$$\alpha_j=\frac{2\Delta t c_j^2\theta}{gA_j\Delta x_j} \quad \text{(i)}$$

$$\beta_j=\left(H_{n,j+1}+H_{n,j}\right)-\frac{(1-\theta)}{\theta}\alpha_j\left(Q_{n,j}-Q_{n,j+1}\right) \quad \text{(ii)}$$

$$\gamma_j=\frac{\Delta x_j}{2g\theta A_j\Delta t} \quad \text{(iii)}$$

$$\delta_j=\left(\frac{1-\theta}{\theta}\right)\left(H_{n,j}-H_{n,j+1}\right)-\frac{\Delta x_j f_j}{4g\theta D_j A_j^2}\left(Q_{n,j}\left|Q_{n,j}\right|+Q_{n,j+1}\left|Q_{n,j+1}\right|\right) \quad \text{(iv)}$$

تحسب معاملات معادلتي المطرقة المائية اعتمادا على خواص الأنابيب و قيم الضغط و الغزارة في خطوة زمنية سابقة. بأخذ الاختصارات السابقة تأخذ معادلتا المطرقة المائية للجزء j-th من الأنبوب الشكل التالي:

$$-H_{n+1,j}+H_{n+1,j+1}+\gamma_j\left(Q_{n+1,j}+Q_{n+1,j+1}\right)=\delta_j \quad 8\text{-}7$$

$$H_{n+1,j}+H_{n+1,j+1}+\alpha_j\left(Q_{n+1,j+1}+Q_{n+1,j}\right)=\beta_j \quad 8\text{-}8$$

باستخدام العلاقات 8-1, 8-2, 8-3, 8-4 أمكن تحويل معادلات المطرقة المائية التفاضلية، إلى معادلات جبرية تصف سلوك الضواغط و الغزارة في العقد الداخلية للأنابيب.

عند النمذجة الحاسوبية يمثل الرمز $H_{i,k}$ المنسوب البيزومتري في الأنبوب i عند المقطع k ،و الرمز $Q_{i,k}$ الغزارة في الأنبوب i عند المقطع k، في اللحظة الزمنية t.

إن عدد هذه المعادلات اقل من عدد المجاهيل، أي يجب إضافة عدة مجموعات من المعادلات ليصبح عدد المعادلات مساو لعدد المجاهيل. مجموعة المعادلات الإضافية هي معادلات الشروط المحيطية الداخلية و الخارجية، معادلات الاستمرار، معادلات الطاقة، و المعادلات المميزة للأجهزة الهيدروليكية.

و لحل منظومة المعادلات الجبرية التي تصف سلوك المنظومة الهيدروليكية (الضواغط و الغزارات) و التي يحوي بعضها حدود لا خطية، يمكن استخدام إحدى الطرق العددية التي تعتمد التقريب المتتالي، طريقة نيوتن- رافسون، Newton-Raphson Method ، و التي تتطلب وضع كافة المعادلات بصيغة بحيث يكون الطرف الثاني يساوي الصفر.

8-2- معادلات الشروط المحيطية[9]:

عند وجود أجهزة هيدروليكية، تيه، مصالبة، خزانات، سكور، مضخات، في المنظومة الهيدروليكية، تضاف مجموعة المعادلات المميزة لهذه الأجهزة اضافة إلى معادلات الاستمرار، إلى مجموعة المعادلات 6-7 و 6-8 ، و تحل مجموعة المعادلات الناتجة بإحدى طرق التقريب المتتالي.

- **تيه أو مصالبة**:
  - **عقدة** التقاء 4 أنابيب: و يخرج من العقدة سحب Q ؛الشكل 8-2.

تقدم المصالبة أربعة معادلات شروط محيطية هي:

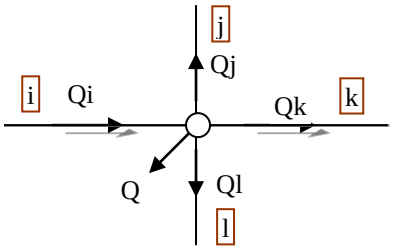
معادلات الطاقة:

$$f_1 = H_{i,ns} - H_{j,1} - loss_{ij} \qquad 8\text{-}9$$

$$f_2 = H_{i,ns} - H_{k,1} - loss_{ik} \qquad 8\text{-}10$$

$$f_3 = H_{i,ns} - H_{l,1} - loss_{il} \qquad 8\text{-}11$$

حيث $loss_{ij}$ الفاقد في الضاغط في العقدة بين المقطع i,ns و المقطع j,1.



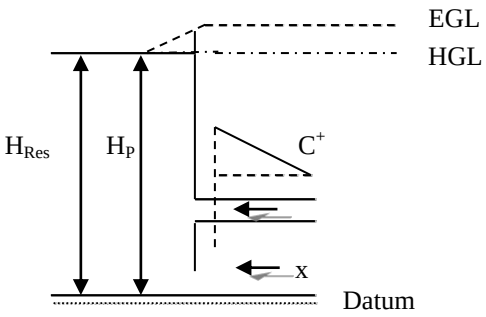
الشكل 8-2 ، عقدة تفرع

معادلة الاستمرار:

$$f_4 = Q_{i,ns} - Q_{j,1} - Q_{k,1} - Q_{l,1} - Q \qquad 8\text{-}12$$

❖ خزان:

يقدم الخزان ، الشكل 8-3،معادلة الشرط المحيطي الأتية:



الشكل 8-3
خزان محدد المنسوب

$$f_{res} = H_{i,k} - H_{res}. \qquad 8\text{-}13$$

حيث H_{res} منسوب الماء في الخزان مقارنة بمنسوب قياسي.

❖ المضخة:

تقدم المضخة التي يدور دولابها العامل بسرعة اسمية rpm للغزارة Q المارة عبرها ضاغط h_p للتغلب على فرق منسوب و على ضياع الطاقة بالاحتكاك. تعطى معادلة المنحني المميز للضاغط h_p كتابع للغزارة Q بدلالة السرعة الاسمية:

$$h_p = A_p Q^2 + B_p Q + C_p \qquad 8\text{-}14$$

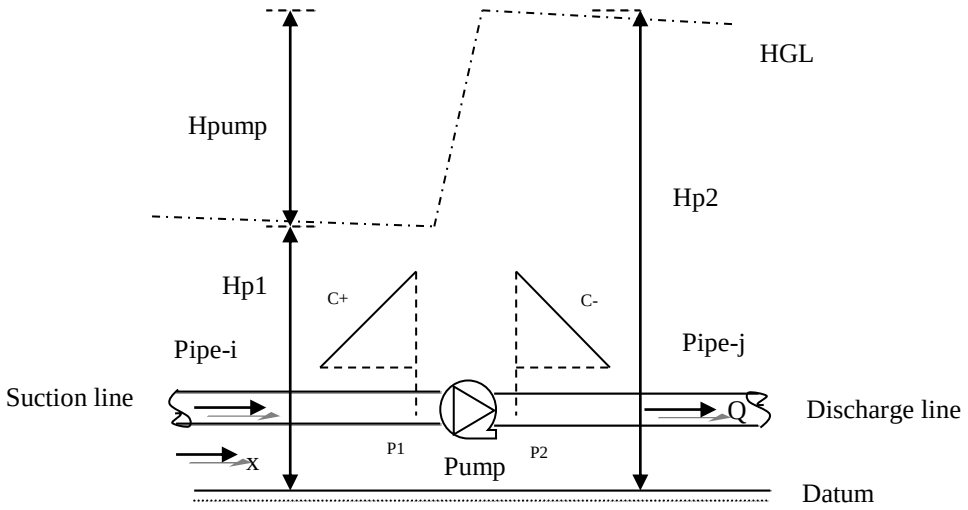
عند توقف أو إقلاع المحرك، تأخذ سرعة دوران الدولاب العامل بالتغير كتابع لعزم المحرك، و بعد حساب سرعة دوران الدولاب العامل تقيم ثوابت معادلة المنحني المميز للمضخة؛ A_p، B_p، C_p ، كتوابع لسرعة الدوران.

تتطلب المعالجة الرياضية للمضخات معرفة المنحنيات المميزة للمضخة التي تعطي الضاغط h_p، الاستطاعة المقدمة من المحرك P_W، المردود η، و احتياطي التكهف NPSH، بدلالة الغزارة Q، سرعة دوران n، rpm، وقطر D الدولاب العامل.

في حال وجود مضخة بين أنبوبين، الشكل 8-4، اضافة إلى معادلتي الطاقة للأنبوبين و معادلة الاستمرار:

$$f_1 = Q_{i,ns} - Q_{j,1} \qquad 8\text{-}15$$

تقدم المضخة المعادلة التالية:



الشكل 8-4
مضخة بين أنبوبين

$$f_2 = H_{i,ns} - H_{j,1} + A_P QQ + B_P Q + C_P \qquad 8\text{-}16$$

اعتمادا على معادلة سرعة دوران الدولاب العامل يتم حساب ثوابت معادلة المنحني المميز للمضخة؛ A_p، B_p، C_p.

❖ **السكر**:

يقصد هنا سكر التحكم بالغزارة الذي يعمل على امرار الغزارة المطلوبة بالتحكم بفتحة السكر. يمكن التحكم بالسكر كهربائيا، هيدروليكيا، و يدويا. يتعلق السلوك

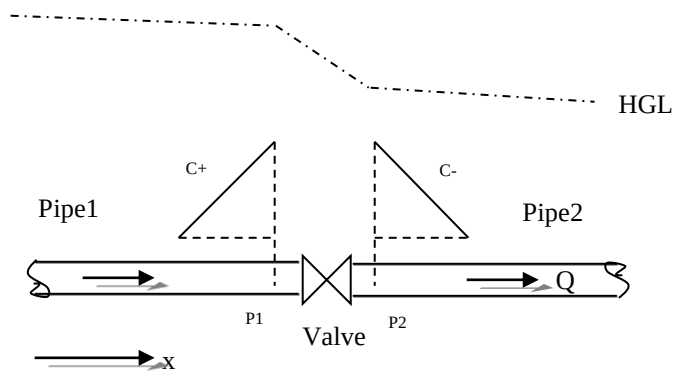
الهيدروليكي للسكربثلاث عوامل؛ تحدد فتحة ومعامل السكر فرق الضاغط اللازم بين طرفي السكر لامرارغزارة محددة، و تحدد آلية او برنامج سرعة الفتح التغير بطريقة سلسة في الغزارة المارة.

يعامل مرور الماء عبر سكر معاملة عبور الماء خلال فتحة تحت ضغط، بالعلاقة:

$$Q = C_d A\sqrt{g\Delta H}; \qquad 8\text{-}17$$

- **سكر بين أنبوبين** i،j (شرط محيطي داخلي)، الشكل 8-5. اضافة إلى معادلتي الطاقة للأنبوبين و معادلة الاستمرار:

$$f_1 = Q_{i,ns} - Q_{j,1} \qquad 8\text{-}18$$



الشكل 8-5
سكر بين أنبوبين

يؤدي وجود السكر إلى معادلة شرط محيطي، الطاقة:

$$f_2 = H_{i,ns} - H_{j,1} - kl * Q_{j,1} * \left|Q_{j,1}\right| / (2 * g * A_j * A_j) \qquad 8\text{-}19$$

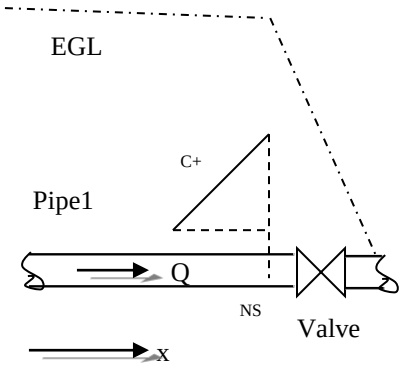
يستبدل، $(Q_{j,1})^2$، بالتعبير، $Q_{j,1}\left|Q_{j,1}\right|$، ليؤخذ تغير الإشارة بعين الاعتبار.

من جدول فتحة السكر مع الزمن وجدول معامل فاقد السكر، valve loss coefficient، kl ، المقابل لفتحة السكر، يحدد kl.

- **سكر في نهاية أنبوب** i (شرط محيطي خارجي)، الشكل 8-6. يؤدي وجود هذا السكر إلى معادلة شرط محيطي؛ الطاقة.

لوضع معادلة الطاقة يجب معرفة فتحة السكر. من جدول فتحة السكر مع الزمن وجدول معامل فاقد السكر، kl ، المقابل لفتحة السكر، يحدد kl، و منه معادلة الطاقة:

$$f_1 = H_{i,ns} - k_l * Q_{i,ns} * \left|Q_{i,ns}\right| / (2 * g * A_i * A_i) \qquad 8\text{-}20$$



الشكل 8-6
سكر في نهاية أنبوب

يستبدل، $(Q_{i,ns})^2$، بالتعبير، $Q_{i,ns}|Q_{i,ns}|$، ليؤخذ تغير الإشارة بعين الاعتبار.

و يفضل كتابة الفاقد في الضاغط ΔH خلال السكر بالعلاقة:

$$\Delta H = \frac{2|Qo|}{C_d^2 D^4 g} Q_{i,ns} - \frac{1}{C_d^2 D^4 g} Qo|Qo|; \qquad 8\text{-}21$$

حيث Qo الغزارة المارة عبر السكر في اللحظة الحالية، و يعطى معامل الغزارة C_d بدلالة معامل الفاقد C_h بالعلاقة:

$$C_d = \frac{\Delta h}{V^2/2g} \quad , \quad C_d = \frac{\pi}{\sqrt{8}\sqrt{C_h}}$$

انطلاقا من معادلات المطرقة المائية للأنابيب و العقد، والشروط الأولية و الشروط المحيطية، يتم حل مصفوفة المعادلات الخطية آنيا لمعرفة قيم الضغط و الغزارة في أي نقطة من المنظومة. يتابع الحل اعتمادا على قيم الخطوة الزمنية الحالية لمعرفة قيم الضغط و الغزارة في أي نقطة في الخطوة الزمنية التالية.

الفصل التاسع

طريقة الممانعة

9-1- التشابه بين الممانعة الهيدروليكية و الكهربائية.

9-2- حل معادلات المطرقة المائية الخطية.

9-3- مفهوم و معادلة الممانعة.

طريقة الممانعة

Impedence Method

مقدمة:

تعتبر ظاهرة الطنين من ظواهر المطرقة المائية الأكثر خطورة، و التي يمكن حدوثها في شبكات الأنابيب .فإذا حدثت تذبذبات في الضاغط أو الغزارة في إحدى نهايتي خط ، يمكن لهذه التغيرات أن تتراكب إذا ماثل تواترها عدد صحيح من الزمن المميز للخط و بالتالي نشوء موجة واقفة بشدة كبيرة . لقد أدت هذه الظاهرة إلى كوارث حيث انفجرت بعض الأنابيب بينما كانت سعة الاهتزاز صغيرة المقدار.و يعبر السكر الهزاز واحد من شروط نشوء تذبذبات في الضاغط و الغزارة .فإذا كان الأنبوب يمتلك توافقيات لتواتره الأساسي (4L/a) تماثل تواتر الجهاز المسبب للذبذبات فان اهتزازا طنينيا سينشأ. يمكن للعديد من الآليات أن تولد اهتزازا طنينيا. ففي المحطات الهيدروليكية ، يمكن للرياح أن تولد أمواجا بسعات من 1.5 إلى 3 م على سطح الخزان المغذي للمحطة. و يمكن لهذه الأمواج أن تمتلك تواترا يماثل التواتر الأساسي أو توافقيات نظام الأنابيب في المحطة و بالتالي نشوء الطنين.و جرت العادة أن يتم إغلاق الجريان في الأنابيب الكبيرة القطر بسكر فراشة . لا تمتلك هذه السكورة كتامة كاملة و الجوان المطاطي الموجود على محيط قرص السكر ينتفخ بالماء عند الإغلاق الكامل . و عند حدوث تسرب فانه يدفع الجوان إلى الاهتزاز مولدا أمواج ضغط صغيرة إلى عالية الأنبوب وحدوث الطنين .و عموما في حال وجود احتمال و لو صغير لحدوث الطنين ، يجب القيام بتحليل الطنين و تقييم الخطر و التأكد من أن إجراءات التخفيف فعالة.

يمكن تحليل ظاهرة الطنين بطريقة المميزات . و توجد طريقة تحليلية دقيقة و مناسبة و تعطي حلا برمجيا بجزء من الزمن اللازم للحل بطريقة المميزات.

9-1- التشابه بين الممانعة الهيدروليكية و الكهربائية:

تعتمد هذه الطريقة على التشابه بين الجريان الهيدروليكي و السريان الكهربائي. في نظرية نقل التيار المتردد على خطوط التوتر معادلتان تشبهان إلى حد كبير معادلات المطرقة المائية.

في خطوط التوتر:

$$\frac{\partial V}{\partial x}+L\frac{\partial i}{\partial t}+R_{el}i=0 \qquad 9\text{-}1$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{C}\frac{\partial i}{\partial x}=0 \qquad 9\text{-}2$$

في الأنابيب:

$$\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{2f}{gD}V|V|=0 \qquad 9\text{-}3$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+V\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{a^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0 \qquad 9\text{-}4$$

حيث C سعة المكثفة في واحدة الطول، L التحريض في واحدة الطول، R_{el} المقاومة في واحدة الطول، V الفولتاج، i التيار.

بالنظر للتشابه بين الضاغط و الفولتاج و بين الغزارة و شدة التيار و باهمال الحدود من المرتبة الثانية و تحويل حد الفاقد إلى حد خطي يصبح التشابه كاملا بين مجموعتي المعادلات.

أن الحد $V\frac{\partial h}{\partial x}$ صغير بالمقارنة مع $\frac{\partial h}{\partial t}$ اذا كان a>>V و كذلك الحد $\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}$ بالمقارنة مع $\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$ وبالتالي يمكن إعادة كتابة المطرقة المائية بالشكل :

$$\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{1}{gA}\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{2f}{A^2gD}q|q|=0 \qquad 9\text{-}5$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{a^2}{gA}\frac{\partial q}{\partial x}=0 \qquad 9\text{-}6$$

لتحويل معادلات المطرقة المائية إلى شكل خطي يجب تحويل $\frac{2f}{A^2gD}q|q|$ إلى حد خطي.

يمكن كتابة $q = \bar{q} + q'$ حيث $\bar{q}$ الغزارة في حالة الاستقرار q' مركبة الغزارة غير المستقر. و منه:

$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \frac{\partial q'}{\partial x}$, $\frac{\partial \bar{q}}{\partial x} = 0$ لأن $\bar{q}$ ثابتة على طول الأنبوب و منه: $\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial q'}{\partial x}$

و بشكل مماثل $\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial q'}{\partial t}$, $\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0$ في الجريان المستقر و منه: $\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q'}{\partial t}$

أيضا يمكن كتابة الضاغط بالشكل: $h = \bar{h} + h'$ ولكن $\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} = -\frac{2f}{A^2 gD}\bar{q}\left|\bar{q}\right|$ ، $\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = 0$

في الجريان المستقر.

معادلة الاستمرار:

$$\partial\left(\bar{h} + h'\right)/\partial t + \frac{a^2}{gA}\partial\left(\bar{q} + q'\right)/\partial x = 0$$

$$\frac{\partial(h')}{\partial t} + \frac{a^2}{gA}\frac{\partial(q')}{\partial x} = 0 \qquad 9\text{-}7$$

معادلة الحركة:

$$\partial\left(\bar{h} + h'\right)/\partial x + \frac{1}{gA}\partial\left(\bar{q} + q'\right)/\partial t + 2f\left(\bar{q} + q'\right)\left|\left(\bar{q} + q'\right)\right|/\left(gDA^2\right) = 0$$

$$-2f\bar{q}\left|\bar{q}\right|/\left(gDA^2\right) + \partial(h')/\partial x + \frac{1}{gA}\partial(q')/\partial t + 2f\left(\bar{q} + q'\right)\left|\left(\bar{q} + q'\right)\right|/\left(gDA^2\right) = 0 \qquad 9\text{-}8$$

في الحالة العامة يكتب حد الاحتكاك بالشكل: $2f\left(\bar{q} + q'\right)^n/\left(gDA^2\right)$ و بالنشر:

$$2f\left(\bar{q} + q'\right)^n/\left(gDA^2\right) = 2f/\left(gDA^2\right)\left(\bar{q}^n + n\bar{q}^{n-1}q' + \frac{n(n-1)}{1*2}\bar{q}^{n-2}q'^2 + \ldots\right)$$

إذا كانت q′ صغيرة بالمقارنة بـ q يمكن إهمال حدود المرتبة الثانية وتصبح المعادلة:

$$-2f\bar{q}^n/\left(gDA^2\right) + \partial(h')/\partial x + \frac{1}{gA}\partial(q')/\partial t + 2f\bar{q}^n/\left(gDA^2\right) + 2nf\bar{q}^{n-1}q'/\left(gDA^2\right) = 0$$

$$\partial(h')/\partial x + \frac{1}{gA}\partial(q')/\partial t + nf\bar{q}^{n-1}q'/\left(gDA^2\right) = 0 \qquad 9\text{-}9$$

إذا رمز لـ $nf\bar{q}^{n-1}q'/\left(gDA^2\right)$ بـ R عندئذ تصبح المعادلتان:

$$\frac{\partial h'}{\partial t}+\frac{a^2}{gA}\frac{\partial q'}{\partial x}=0 \qquad 9\text{-}10$$

$$\partial h'/\partial x+\frac{1}{gA}\partial q'/\partial t+R*q'=0 \qquad 9\text{-}11$$

وهما تماثلان تماما معادلات خط التوتر على اعتبار أن السعة C تقابل gA/C^2 و التحريض L يقابل $1/(gA)$ و المقاومة R تقابل $nf\bar{q}^{n-1}q'/(gDA^2)$.

9-2- حل معادلات المطرقة المائية الخطية:

بتفاضل معادلة الاستمرار بالنسبة للزمن:

$$\frac{\partial^2 h'}{\partial t^2}=-\frac{a^2}{gA}\frac{\partial^2 q'}{\partial x\partial t}\Rightarrow \qquad \frac{\partial^2 q'}{\partial x\partial t}=-\frac{gA}{a^2}\frac{\partial^2 h'}{\partial t^2}$$

من معادلات الحركة: $\partial q'/\partial t=-gA(\partial h'/\partial x+R*q')=0$ ، بالمفاضلة بالنسبة لـ x:

$$\frac{\partial^2 q'}{\partial x\partial t}=-gA(\frac{\partial^2 h'}{\partial x^2}+R\frac{\partial q'}{\partial x})=0$$

$$\frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 h'}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 h'}{\partial x^2}+R\frac{\partial q'}{\partial x} \quad , \quad \frac{\partial q'}{\partial x}=-\frac{gA}{a^2}\frac{\partial h'}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 h'}{\partial x^2}-g\frac{RA}{a^2}\frac{\partial h'}{\partial t}-\frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 h'}{\partial t^2}=0 \qquad 9\text{-}12$$

وهي معادلة موجة.

بتطبيق ضاغط جيبي في عالية الخط ، يكون الحل بالشكل :

سعة الموجة : H , $h'=He^{i\Omega t}$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}e^{i\Omega t}-g\frac{RA}{a^2}i\Omega He^{i\Omega t}+\frac{\Omega^2}{a^2}He^{i\Omega t}=0$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}=\frac{RA\Omega}{a^2}\left(-\frac{\Omega}{gA}+iR\right)H$$

بفرض $\gamma^2=\frac{RA\Omega}{a^2}\left(-\frac{\Omega}{gA}+iR\right)$ ، ومنه $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}=\gamma^2 H$

حلها $H=c1e^{mx}$ ومنه:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = c1m^2 e^{mx} \Rightarrow m = \pm\gamma \Rightarrow \Rightarrow m^2 = \gamma^2 \Rightarrow c1m^2 e^{mx} = \gamma^2 c1e^{mx}$$

$$H = ae^{\gamma x} + be^{-\gamma x} \qquad ; \text{a ،b const}$$

$$h' = \left(ae^{\gamma x} + be^{-\gamma x}\right)e^{i\Omega t} \qquad 9\text{-}13$$

بالمفاضلة بالنسبة للزمن:

$$\frac{\partial h'}{\partial t} = i\Omega\left(ae^{\gamma x} + be^{-\gamma x}\right)e^{i\Omega t}$$

$$\frac{\partial q'}{\partial x} = -\frac{gA}{a^2}\frac{\partial h'}{\partial t} \Rightarrow$$

$$q' = g\frac{A\Omega}{ia^2\gamma}\left(ae^{\gamma x} - be^{-\gamma x}\right)e^{i\Omega t} \qquad 9\text{-}14$$

و بتقييم γ كعدد عقدي: $\gamma = a + ib$ يستنتج:

$$\gamma^2 = -\frac{\Omega^2}{a^2} + \frac{iAg\Omega R}{a^2} \quad , \gamma = r_\gamma e^{i\varphi_\gamma} \Rightarrow \gamma^2 = (a+ib)^2 = r_{\gamma^2} e^{i\varphi_{\gamma^2}} \Rightarrow$$

$$r_{\gamma^2} = \left(r_\gamma\right)^2 \qquad , \varphi_{\gamma^2} = 2\varphi_\gamma$$

$$r_\gamma = \sqrt{\frac{Ag\Omega}{a^2}}\left(\left(\frac{\Omega}{gA}\right)^2 + R^2\right)^{1/4} \qquad , \qquad \varphi_\gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{RgA}{\Omega}\right)$$

ومنه يحسب a, b.

9-3- مفهوم و معادلة الممانعة:

بشكل مشابه لتعريف الممانعة الكهربائية بأنها نسبة الفول تاج إلى التيار وتهمل مركبات التيار المستمر مع إهمال مركبات التيار، تعرف الممانعة الهيدروليكية بأنها الضاغط إلى الغزارة المستمر مع إهمال مركبات التيار المستقر.

$$Z(x) = \frac{h'}{q'}$$

$$Z(x) = \frac{ia^2\gamma}{gA\Omega}\left(\frac{ae^{\gamma x} + be^{-\gamma x}}{ae^{\gamma x} - be^{-\gamma x}}\right) \qquad 9\text{-}15$$

إن الحد $\frac{-ia^2\gamma}{gA\Omega} = \frac{a^2\gamma}{igA\Omega}$ له أبعاد الممانعة و يدعى الممانعة المميزة ويرمز له Z_c .

$$Z_c = \frac{a^2\gamma}{igA\Omega} \qquad \Rightarrow Z_c = \frac{a^2(b-ia)}{gA\Omega}$$

بحسب القواعد المتبعة في نظرية الإرسال على خط توتر يعتبر الطرف المرسل أي جهاز توليد الاهتزاز الضاغط عند x_0 و الطرف المستقبل عند x_l.

9-3-1- معادلة الممانعة:

$$h'_x = H_x e^{i\Omega t}$$

عند نقطة الإرسال x_0 :

$$h'_0 = H_0 e^{i\Omega t} = H_s e^{i\Omega t} \ , \qquad q'_0 = Q_0 e^{i\Omega t} = Q_s e^{i\Omega t}$$

$$H_s = ae^{\gamma x_0} + be^{-\gamma x_0} = a+b, \quad Q_s = g\frac{A\Omega}{ia^2\gamma}\left(ae^{\gamma x} - be^{-\gamma x}\right) = g\frac{A\Omega}{ia^2\gamma}(a-b)$$

$$a = \frac{1}{2}\left(H_s - Z_c Q_s\right) \ , \qquad b = \frac{1}{2}\left(H_s + Z_c Q_s\right)$$

$$h'_x = e^{i\Omega t}\left(H_s \cosh(\gamma x) - Z_c Q_s \sinh(\gamma x)\right)$$

$$q'_x = e^{i\Omega t}\left(-\frac{H_s}{Z_c}\sinh(\gamma x) + Q_s \cosh(\gamma x)\right)$$

$$Z(x) = \frac{Z_s - Z_c \tanh(\gamma x)}{1 - Z_s / Z_c \tanh(\gamma x)}, \qquad Z_0 = Z_s$$

$$Z_l = Z_R = \frac{Z_s - Z_c \tanh(\gamma l)}{1 - Z_s / Z_c \tanh(\gamma l)}, \qquad Z_s = \frac{Z_R + Z_c \tanh(\gamma l)}{1 + Z_R / Z_c \tanh(\gamma l)}$$

9-3-2- الشروط المحيطية:

يتم تحديد الشروط المحيطية في الشبكات بحيث يمكن تحديد الممانعة في طرف أنبوب و ربط الممانعات لأنابيب الشبكة ببعضها للحصول على ممانعة الشبكة.

خزان: بسبب ثبات الضاغط، ارتفاع الماء $\bar{h} = const$ ، $h'=0$ ومنه $Z=0$

نهاية مغلقة: $q'=0$ ومنه $Zh'/q=\infty$.

عقدة تفرع:

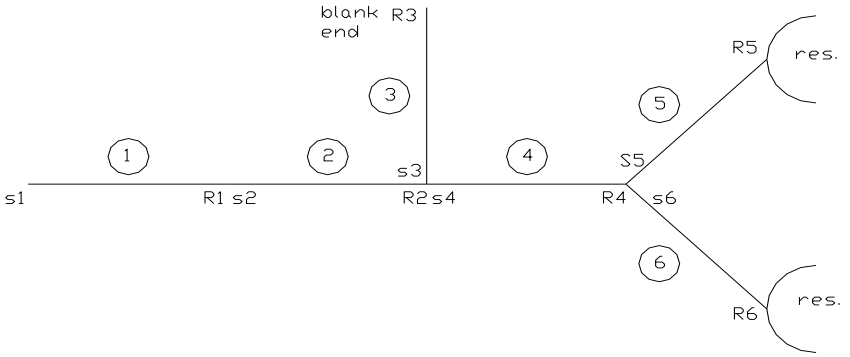
$$\Sigma q_{in} = \Sigma q_{out} \qquad \Rightarrow \Sigma q'_{in} = \Sigma q'_{out} \qquad \Rightarrow \Sigma \frac{q'_{in}}{h'} = \Sigma \frac{q'_{out}}{h'} \qquad \Rightarrow \Sigma \frac{1}{Z_{in}} = \Sigma \frac{1}{Z_{out}}$$

وصلة: $\frac{1}{Z_{R1}} = \frac{1}{Z_{s2}} \quad \Leftarrow \quad Z_{R1} = Z_{s2}$

9-3-3- ممانعة شبكة:

يتم البدء من مقاطع ذي ممانعة معلومة، و بإجراء حسابات الممانعة لمقاطع عناصر الشبكة بالعلاقة إرسال - استقبال يتم الحصول على ممانعة الشبكة.

مثال: حساب الممانعة لأنابيب الشبكة في الشكل 9-2.



الشكل 9-2

شبكة شجرية تحوي خزانين

$$Z_{R3} = \infty \quad , \quad Z_{R5} = Z_{R6}$$

$$Z_{s5} = \frac{Z_{R5} + Z_{c5}\tanh(\gamma_5 l_5)}{1 + Z_{R5}/Z_{c5}\tanh(\gamma_5 l_5)}, \; Z_{s5} = Z_{c5}\tanh(\gamma_5 l_5)$$

وبشكل مشابه $Z_{s6} = Z_{c6}\tanh(\gamma_6 l_6)$

عقدة التفرع 4-5-6: $\frac{1}{Z_{R4}} = \left(\frac{1}{Z_{s5}} + \frac{1}{Z_{s6}}\right)$ و منه تحسب Z_{R4}

$$Z_{s4} = \frac{Z_{R4} + Z_{c4}\tanh(\gamma_4 l_4)}{1 + Z_{R4}/Z_{c4}\tanh(\gamma_4 l_4)}$$

$$Z_{R3} = \infty \quad , \quad Z_{s3} = \frac{Z_{c3}}{\tan(\gamma_3 l_3)}$$

عقدة التفرع 2-3-4: $\frac{1}{Z_{R2}} = \left(\frac{1}{Z_{s3}} + \frac{1}{Z_{s4}}\right)$ و منه تحسب Z_{R2}

$$Z_{s2} = \frac{Z_{R2} + Z_{c2}\tanh(\gamma_2 l_2)}{1 + Z_{R2}/Z_{c2}\tanh(\gamma_2 l_2)}$$

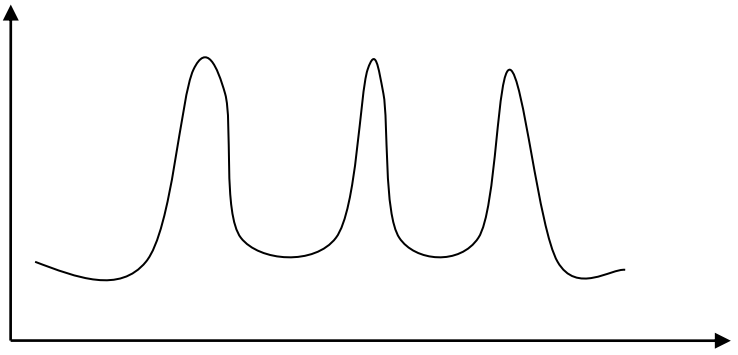
وصلة 1:

$$Z_{R1} = Z_{s2} \qquad , \qquad Z_{s1} = \frac{Z_{R1} + Z_{c1}\tanh(\gamma_1 l_1)}{1 + Z_{R1}/Z_{c1}\tanh(\gamma_1 l_1)}$$

9-3-4- التحليل التوافقي :

إن نتائج حساب ممانعة شبكة هي سلسلة من الأعداد العقدية ، يعتمد مقدارها على السرعة الزاوية Ω ولذلك يتغير طول العدد العقدي تبعا لقيمة Ω.

بحساب طويلة الممانعة Z في أي نقطة من الشبكة من أجل مجال من قيم Ω، ينشأ منحني كما في الشكل 9-1:



الشكل 9-1

منحني Z- Ω

يتضح من المخطط أنه يمكن تقييم خطر تطور شرط الطنين في الشبكة في أي مقطع. إذا كان تواتر الحدث المسبب للاهتزاز لا يساوي أي من تواترات الطنين، فالشبكة في أمان، ومع هذا يجب تقييم إمكانية نشوء ظاهرة الطنين. إن مقدار سعة الضاغط المهتز يعتمد على سعة قوة الاهتزاز . وعموما يكفي تحديد التواترات الخطرة و التأكد من عدم إمكانية حدوثها.

من الممكن إجراء التحليل التوافقي باستخدام طرقة المميزات، ولكن يجب اجراء عدة سيناريوهات عدة مرات للحصول على تراكب كافة الاهتزازات، بينما بطريقة الممانعة يتم تشغيل البرنامج مرة واحدة.

9-3-5- تحريض الاهتزاز في شبكة:

يحدث الطنين بسبب تراكب الأمواج المحرضة بآليات تحريض الاهتزاز مع الأمواج المنعكسة من أجزء بعيدة للشبكة. ويتطور الطنين عندما يماثل تواتر الاهتزاز الناشئ في الشبكة التواتر الأساسي أو توافقيات الشبكة. وعموما من الصعب تحديد التواتر الأساسي في شبكة إذا لم تكن الشبكة بسيطة. لا يرتبط تواتر الاهتزاز الطبيعي للشبكة بتابع سهل بالأزمنة المميزة للأنابيب التي تشكل الشبكة .وما يزيد المسألة تعقيدا هو الانتشار و الانعكاس الجزئي للأمواج عند العقد.

لحساب الضاغط الفعلي في شبكة من الضروري معرفة سعة الاهتزاز المولد في الشبكة . و هذا الحساب سهل في بعض الحالات مثل شبكة مرتبطة بخزان تقوم الرياح بتحريض أمواج على سطحه لتشكل قوة محرضه.

يمكن لشكل الموجة أن يكون جيبي أو تراكب لأمواج جيبية. تجرى الحسابات للحصول على سعات الضاغط في نقاط مختلفة من الشبكة من أجل كل موجة جيبية من موجة التحريض، تراكب النتائج سيعطي سعة الموجة الناتجة في كل مقطع.

مثال: بفرض طرف الإرسال في عالية الأنبوب ، تعطى القوة المحركة بالعلاقة:

$h_0' = H_0 \exp(i\Omega t)$ ، ومنه

$$H_0 = H_s \quad , \; q_0 = \frac{h_0'}{Z_s} \quad \Rightarrow Q_s = \frac{H_s}{Z_s} \Rightarrow$$

$$h_x' = e^{i\Omega t}\left(H_s \cosh(\gamma x) - Z_c Q_s \sinh(\gamma x)\right)$$

$$H_x = H_s \cosh(\gamma x) - Z_c Q_s \sinh(\gamma x)$$

$$Q_x = Q_s \cosh(\gamma x) - H_s / Q_s \sinh(\gamma x)$$

يمكن تحديد سعة موجة الضاغط و الغزارة في أي مقطع من الشبكة.

- السكر الهزاز:

المعادلة المميزة للسكر: $q = a_e\sqrt{2gh}$ ، حيث a_e مساحة مقطع السكر الفعال.

$$\bar{q} + q' = a_e\sqrt{2g\left(\bar{h} + h'\right)}$$

و باعتبار h′ صغيرة بالمقارنة مع h

$$\bar{q}+q'=(\bar{a}_e+a'_e)\sqrt{2g\bar{h}}\left(1+\frac{h'}{2\bar{h}}\right)$$

حيث a'_e المركبة المهتزة لمساحة مقطع السكر.

$$q'=a'_e\sqrt{2g\bar{h}}+\bar{q}\frac{h'}{2\bar{h}}+\frac{a'_0}{\bar{a}_0}\bar{q}\frac{h'}{2\bar{h}}$$

$$\bar{\varepsilon}=\frac{\bar{a}_e}{a_{eo}} \qquad , \qquad \varepsilon'=\frac{a'_e}{a_{eo}}$$

$$q'=\bar{q}\left(\frac{h'}{2\bar{h}}+\left(1+\frac{h'}{2\bar{h}}\right)\frac{\varepsilon'}{\bar{\varepsilon}}\right)$$

حيث a_{eo} المساحة الفعالة و السكر مفتوح كاملا .

إذا كانت سعة اهتزاز ضاغط السكر صغيرة بالمقارنة مع ضاغط الاستقرار

$$q'=\bar{q}\left(h'/2\bar{h}+\varepsilon'/\bar{\varepsilon}\right)\Rightarrow \qquad 9\text{-}16$$

$$Z=h'/q'=\frac{h'}{\bar{q}\left(h'/2\bar{h}+\varepsilon'/\bar{\varepsilon}\right)} \qquad 9\text{-}17$$

يعتمد وضع السكر المهتز على الضاغط عند السكر. يتم التحكم بهذه السكورة بمحرك سيرفو يعمل على فتح السكر أكثر إذا زاد الضاغط على المدخل عن قيمة معينة ، وإغلاقه إذا زاد الضاغط عند المخرج عن قيمة محددة ، وذلك لتأمين حماية الخط من الضغوط الزائدة .

- اهتزازات في عدة نقاط من شبكة طنينية:

أمثلة شبكة تتغذى من عدة خزانات تنشأ على سطح كل منها أمواج بأنواع و تواترات مختلفة . مجموعة توربينات في محطة هيدروكهربائية ، توصل الماء إلى التوربينات شبكة أنابيب ، يمكن لهذه التوربينات أن تولد اهتزازات تؤدي إلى حادثة الطنين . مضخة داخل أنبوب تولد موجتين احدها أسفل المضخة و الثانية عالية المضخة، يمكن أن تتلاقى الموجتان إذا كانت الشبكة حلقية ويحدث التراكب.

يجب القيام في هذه الشبكات بتحاليل ممانعة عديدة بمقدار ما يوجد منابع اهتزاز. و حيث أن هذا التحليل خطي، يحسب التراكب ويحدد الخطر على الشبكة من الطنين بتراكب التحاليل التوافقية.

الفصل العاشر

طريقة الحساب اللا تقسيمية

10-1- النظرية الناظمة.

10-2- نمذجة معادلتي المطرقة المائية .

10-3- الشروط المحيطية- الشروط الاولية.

10-4-الخوارزمية

طريقة الحساب اللاتقسيمية

Meshless Method

مقدمة:

تتضمن طريقة حساب المطرقة المائية لا تقسيميا تتبع انتشار الأمواج (أمواج الضغط - الغزارة)، انعكاسها، تداخلها. تعطي هذه الطريقة حلول دقيقة لمسألة المطرقة المائية بدون فواقد ضغط في أنظمة متعددة الأنابيب. تفيد هذه الطريقة بإجراء Parameter Variation Studies ، دراسات تغيير بارامترات، بدون إعادة معايرة أو تعديل بارامترات الدراسة مثل تعديل سرع الأمواج أو أطوال الأنابيب، و لا تحتاج للاستقراء الداخلي أو التقريب المتتالي. لا تتطلب هذه الطريقة تقسيم الأنابيب، و إعادة التقسيم مثل طريقة المميزات (Characteristics Method) أو العناصر المحدودة (Finite-Element). يمكن تعميم هذه الطريقة و جعلها اكثر شمولية ، عند دراسة المطرقة المائية ، لتأخذ بالاعتبار تفاعل الماء مع جدار الانابيب و التتجهيزات الانشائية (fluid-structure interaction). تتميز هذه الطريقة بأنها تحل أنظمة معادلات من مرتبة أعلى من الثانية كالمعادلات التي طورها Burmann لنمذجة دقيقة لظاهرة المطرقة المائية، التي تتطلب إيجاد القيم الذاتية و الأشعة الذاتية بطرق لا تحليلية.

10-1- النظرية الناظمة:

المعادلات القطعية العامة:

تاخذ المعادلات الخطية العامة لانتشار الأمواج في بعد مكاني واحد الشكل التالي:

$$A\frac{\partial}{\partial t}\phi(x,t)+B\frac{\partial}{\partial x}\phi(x,t)+C\phi(x,t)=0 \qquad 10\text{-}1$$

المصفوفتان A،B عكوستان، و $A^{-1}B$ يمكن تحويلها لقطرية. المصفوفة C، يمكن أن تكون لا عكوسة، تسبب تشتت التردد. تصف المعادلة N متغيرا تابعا و مرتبطا ϕ_i، تابعة للمكان و الزمان، تشكل مكونات تابع الحالة Φ.

يمكن حل هذه المعادلة المصفوفية اعتمادا على المخطط العام لطريقة المميزات MOC (اعتماد المفاهيم العامة و المتغيرات التابع) و ذلك باخذ مجموعة جديدة من المتغيرات التابع كالتالي:

$$\phi(x,t) = S\eta(x,t) \qquad \text{or} \qquad \eta(x,t) = S^{-1}\phi(x,t) \qquad 10\text{-}2$$

بحيث تكون η_i تركيب خطي من المتغيرات الاصلية ϕ_i. بتعويض 10-2 في 10-1 و اخذ $C = 0$ ينتج:

$$AS\frac{\partial}{\partial t}\eta(x,t) + BS\frac{\partial}{\partial x}\eta(x,t) = 0$$

نضرب بـ $S^{-1}A^{-1}$ ينتج:

$$\frac{\partial}{\partial t}\eta(x,t) + \Lambda\frac{\partial}{\partial x}\eta(x,t) = 0 \qquad 10\text{-}3$$

حيث: $\Lambda = S^{-1}A^{-1}BS$

يمكن الحصول على مجموعة معادلات غير مرتبطة decoupled equations عندما تكون المصفوفة Λ قطرية.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \qquad 10\text{-}4$$

و بتعويض 10-4 في 10-3 و الحل بدلالة S تنتج حلول لا صفرية عندما تكون العناصر القطرية لـ Λ قيم ذاتية تحقق المعادلة المميزة:

$$\det(B - \lambda A) = 0. \qquad 10\text{-}5$$

و الاشعة الذاتية ξ_i المكونة لـ S والمقابلة للقيم الذاتية λ_i :

$$S = (\xi_1 \quad \xi_2). \qquad 10\text{-}6$$

تتحول المعادلات غير المرتبطة:

$$\frac{\partial}{\partial t}\eta_i(x,t) + \lambda_i\frac{\partial}{\partial x}\eta_i(x,t) = 0, \qquad i = 1,2.$$

إلى معادلات من الشكل الآتي:

$$\frac{d}{dt}\eta_i(x,t) = 0, \qquad i = 1,2. \qquad 10\text{-}7$$

تتحقق هذه المعادلات على الخطوط المميزة في المستوي (t,x) المعرفة بالمعادلات:

$$\frac{dz}{dt} = \lambda_i, \qquad i = 1,2. \qquad 10\text{-}8$$

إن حل المعادلات التفاضلية التامة 10-6 و 10-7 هو من الشكل الآتي:

$$\eta_i(x,t) = \eta_i(x - \lambda_i \Delta t, t - \Delta t) \qquad i = 1,2. \qquad 10\text{-}9$$

أي أن المتغير التابع η_i يحافظ على قيمته على الخط المميز بين نقطتين يفصل بينهما زمنيا Δt، و مكانيا $\lambda_i \Delta t$.

وفي الحالة العامة:

$$\eta_i(P) = \eta_i(A_i) \qquad i = 1,2. \qquad or \qquad \eta(P) = \begin{pmatrix} \eta_1(A_1) \\ \eta_2(A_2) \end{pmatrix} \qquad 10\text{-}10$$

لا تتغير قيمة المتغير η_i على طول الخط المميز $A_i P$.

يتم الحصول على المتغيرات الأصلية ϕ من المتغيرات الوسيطة η_i بتراكيب من الشكل الآتي:

$$\phi(P) = \sum_{i=1}^{2} SR_i S^{-1} \phi(A_i). \qquad 10\text{-}11$$

حيث العنصر القطري ذي الترتيب i-th من المصفوفة R_i يساوي 1 و العناصر الأخرى تساوي 0.

10-2- نمذجة معادلتي المطرقة المائية Water-hammer two-equation model:

يمكن اعتمادا على المعادلة العامة 10-1 وصف المطرقة المائية بشعاع الحالة:

$$\phi = \begin{pmatrix} V \\ P \end{pmatrix} \qquad 10\text{-}12$$

باستخدام المعاملات :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & K^{*-1} \end{bmatrix} \qquad , \qquad B = \begin{bmatrix} 0 & \rho^{-1} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad 10\text{-}13$$

$$\frac{1}{K^*} = \frac{1}{K} + \frac{2R}{Ee}.$$

R=inner pipe radius , E=Young modulus , e=wall thickness.

بتعويض المصفوفتين 10-13 في معادلة (التشتت) المميزة 10-5 ينتج:

$$\lambda_{1,2}^2 = \frac{K^*}{\rho} = c^2 \qquad 10\text{-}14$$

حيث λ_1 موجب، λ_2 سالب.

تعطى مصفوفة التحويل 10-6 بالعلاقة الآتية:

$$S = (TA)^{-1} \qquad 10\text{-}15$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1 \\ 1 & \lambda_2 \end{bmatrix}$$

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & (\rho c)^{-1} \\ 1 & -(\rho c)^{-1} \end{bmatrix} \qquad 10\text{-}16$$

علما أنه يمكن لمصفوفات التحويل أن تأخذ أكثر من صيغة، مثلا $S = (TB)^{-1}$.

10-3- **الشروط المحيطية - الأولية** Boundary, Initial Conditions**:**

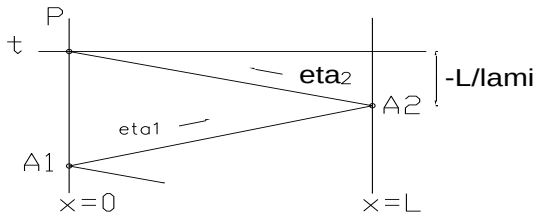
10-3-1- **الشروط المحيطية**:

تصف المعادلتان 10-9 و 10-10 متغيرين تابعين $\eta_i(P), \quad i = 1,2.$ في جميع عقد الشبكة. اما في العقد المحيطية، حيث توجد معادلة واحدة ، يجب اضافة معادلة تعبر عن الشرط المحيطي لايجاد المتغيرين المجهولين.

تعطى معادلات الشروط المحيطية كشروط خطية كما يأتي:

$$d_{x_b}^T(t)\phi(x_b,t) = q_{x_b}(t) \qquad or \qquad d_{x_b}^T(t)S\eta(x_b,t) = q_{x_b}(t) \qquad 10\text{-}17$$

حيث $d_{x_b}^T$ شعاع سطري بمعاملين، و العدد q_{x_b} تحريض محيطي boundary excitation.



الشكل 10-1

النقطة المحيطية P و الخط المميز في المستوي x-t

-**الشروط عند العقد** Junction Conditions**:**

في الحالة العامة يوجد انقطاع رياضي عند العقد في المتغيرات ل $\eta_i(P), \quad i = 1,2.$.

تقدم العلاقتان 9-10 أو 10-10 معادلتين، و يلزم معادلتين إضافيتين لإيجاد المتغيرات المجاهيل الأربعة على جانبي العقدة. تعطى المعادلتان الإضافيتان كشروط عقدية خطية كالتالي:

$$J1(t)\phi(x_j^-,t) = J2(t)\phi(x_j^+,t) + r(t). \quad or$$

$$J1(t)S1\eta1(x_j^-,t) = J2(t)S2\eta2(x_j^+,t) + r(t). \qquad 10\text{-}18$$

حيث J2،J1 مصفوفتان بأبعاد 2*2 ، و الشعاع r هو شعاع تحريض عقدي .

يوجد انقطاع رياضي عند العقد في المتغيرات المجاهيل ϕ . وعموما تكون ثوابت ريمن Riemann invaiants $\eta1 = S1^{-1}\phi$ و $\eta2 = S2^{-1}\phi$ مختلفة على جانبي العقدة.و عندما تكون:

$$J1(t)S1 = J2(t)S2$$

لا يحصل انعكاس أمواج عند العقدة.

تعطى المعادلات في العقد كشروط في العقد بدلالة المصفوفتين J2،J1 و شعاع التحريض r ، مثلا تتطلب معادلتي استمرار الغزارات و الضواغط أن يكون:

$$J1 = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad J2 = \begin{bmatrix} A_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad r = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad 10\text{-}19$$

تعرف الشروط المحيطية بدلالة الأشعة $d_{x_b}^T$ و شعاع التحريض q.

أمثلة:

- خزان في بداية أنبوب:

$$d_0^T = (0 \quad 1) \quad \text{and} \quad q_0 = P_{res} \qquad 10\text{-}20$$

- خزان في نهاية أنبوب:

$$d_l^T = (1 \quad 0) \quad \text{and} \quad q_l = P_{res} \qquad 10\text{-}21$$

- سكر في بداية أنبوب:

$$d_0^T = (0 \quad 1) \quad \text{and} \quad q_0 = V_{vlv} \qquad 10\text{-}22$$

- سكر في نهاية أنبوب:

$$d_l^T = (1 \quad 0) \quad \text{and} \quad q_l = V_{vlv} \qquad 10\text{-}23$$

- **سكر**: يلزم حل آني لمعادلة السكر:

$$\Delta Q = C_d A_v \sqrt{2g\Delta P} \qquad 10\text{-}24$$

مع معادلة خطية واحدة او معادلتين بدلالة المتغيرين V_1،P_1،V_2،P_2.

❖ سكر في نهاية أنبوب: يمكن صياغة منظومة المعادلات كالتالي:

$$a_1 V + a_2 P = a_3$$

$$b_1 V^2 + b_2 P = b_3$$

$$a_2 b_1 V^2 - a_1 b_2 V + a_3 b_2 - a_2 b_3 = 0$$

$$V = \frac{a_1 b_2 \pm \left[a_1^2 b_2^2 - 4a_2 b_1 (a_3 b_2 - a_2 b_3)\right]^5}{2a_2 b_1} \qquad 10\text{-}25$$

$$a_1 = S(i)_{11}^{-1}, \qquad a_2 = S(i)_{12}^{-1}, \qquad a_3 = \eta_1(A_1),$$

$$b_1 = k_l/(2g), \qquad b_2 = \pm 1, \qquad b_3 = 0.$$

حيث $k_l(t)$ معامل إغلاق السكر.

❖ سكر بين انبوبين: يمكن صياغة منظومة المعادلات كالتالي:

$$a_1 V_1 + a_2 P_1 = a_3$$

$$a_4 V_2 + a_5 P_2 = a_6$$

$$b_1 V_2^2 + b_2 (P_1 - P_2) = b_3$$

$$c_1 V^2 + c_2 V + c_3 = 0$$

$$c_1 = b_1 \ , \ c_2 = b_2\left(-a_1 a r_2/(a_2 a r_1) + a_4/a_5 \right) \quad c_3 = -b_3 + b_2 a_3/a_2 - b_2 a_6/a_5$$

$$a_1 = S(i)_{00}^{-1}, \qquad a_2 = S(i)_{01}^{-1}, \qquad a_3 = \eta_0(A_1),$$
$$a_4 = S(i)_{10}^{-1}, \qquad a_5 = S(i)_{11}^{-1}, \qquad a_6 = \eta_1(A_2),$$

$$b_1 = k_l/(2g), \qquad b_2 = \pm 1, \qquad b_3 = 0.$$

$$V = \frac{-c_2 \pm \left[c_2^2 - 4c_1 c_3\right]^{0.5}}{2c_1} \qquad 10\text{-}26$$

حيث $k_l(t)$ معامل إغلاق السكر.

- **مضخة**: يلزم حل اني لمنظومة المعادلات:

$$a_1 V_s + a_2 P_s = a_3$$

$$a_4 V_d + a_5 P_d = a_6$$

$$b_1 V_d^2 + b_2 V_d + b_3 = (P_d - P_s)$$

$$c_1V^2 + c_2V + c_3 = 0$$

$$c_1 = b_1\ , \quad c_2 = \left(b_2 - a_1 a r_2 / \left(a_2 a r_1\right) + a_4 / a_5 \right) \quad , c_3 = b_3 + a_3 / a_2 - a_6 / a_5$$

$$a_1 = S(i)_{00}^{-1}, \qquad a_2 = S(i)_{01}^{-1}, \qquad a_3 = \eta_0(A_1),$$
$$a_4 = S(i)_{10}^{-1}, \qquad a_5 = S(i)_{11}^{-1}, \qquad a_6 = \eta_1(A_2),$$

$$b_1 = f_1(rpm), \qquad b_2 = f_2(rpm), \qquad b_3 = f_3(rpm).$$

$$V_d = [-c_2 \pm (c_2^2 - 4c_1c_3)^{0.5}]/(2c_1) \qquad \text{10-27}$$

- الشروط الأولية:

عند البدء بالحساب يلزم وجود شروط أولية في اللحظة t_0 و التي هي حلول الحالة المستقرة $\phi(x,0) = \phi_0$ حيث يكون شعاع الحالة الثابت ϕ_0 منسجما مع الشروط المحيطية و الشروط عند العقد.

نمذجة ظاهرة انفصال عمود الماء: تحدث ظاهرة انفصال عمود الماء عندما ينقص الضغط المطلق absolute pressure حتى يبلغ ضغط التبخر P_v vapor pressure . يمكن نمذجة هذه الظاهرة بأخذ الشرط المحيطي $P=P_v$ طالما أن حجم التكهف cavity volume v موجب، يعطى حجم التكهف بالعلاقة:

$$v(t) = v(t - \Delta t) \pm AV(t)\Delta t.$$

10-4- **الخوارزمية**:

هدف الخوارزمية إيجاد الحل الدقيق لشعاع الحالة ϕ في أي نقطة (x،t) في مستوي المسافة-الزمن. تصاغ الخوارزمية لإيجاد ثوابت ريمن Riemann invariants $\eta_i, i = 1,2,$ اعتمادا على طريقة "coast – to – coast approach"، التي يمكن تلخيصها كالتالي: في النقاط P في بداية أنبوب حيث يلزم تطبيق الشروط المحيطية ، يتكون الشعاع η من مركبتين η_1, η_2. المركبة η_2, معلومة ،لأنه بحسب المعادلة -13- ،تساوي η_2, في النقطة A2 في نهاية الأنبوب في لحظة زمنية سابقة. أما المركبة η_1, تحسب من الشرط المحيطي المناسب (سكر، خزان،...).

و بشكل مشابه يتم الحساب في نقاط نهاية الأنابيب عندما تكون نقاط محيطية.

في بقية نقاط الشبكة،عند العقد الداخلية، توجد منظومة المعادلات التالية:

- المعـادلات الخطيـة -2-، بعـدد الأنابيـب التـي تلتقـي فـي العقـدة، بدلالـة المركبـة المجهولة $\eta_1, or, \eta_2,$ في العقدة.

- معادلة استمرار الغزارات بعدد (1).

- معادلات استمرار الضاغط بعدد الأنابيب التي تلتقي في العقدة-1.

الفصل الحادي عشر

المطرقة المائية و الفعل المتبادل بين الماء و جدار الأنبوب و التربة

11-1- معلومات أساسية.

11-2- طرائق الحل العددية.

11-3- .

المطرقة المائية والفعل المتبادل بين الماء وجدار الأنبوب والتربة

Water- Structure- Soil Interaction and its impact on Water Hammer

- مقدمة:

يدرس موضوع المطرقة المائية مسائل نشوء، و انتشار، و انعكاس أمواج الضغط في منظومات أنابيب المياه. التي يمكن أن يكون لها جبهة موجة قائمة، و سعات كبيرة عندما تنتج عن إغلاق آني لسكر (Check Valves) ،أو عن التحام عمود الماء (Collapse of Liquid Column Separations). حيث تستطيع هذه الأمواج تحريك الأنابيب باتجاه قطري، و باتجاه محور الأنابيب. مما يؤدي إلى ضغط التربة المجاورة، و نشوء قوى احتكاك بين الأنابيب و التربة. و بالمقابل يؤدي ضغط التربة المجاورة للأنابيب، و قوى الاحتكاك إلى الحد من حركة الأنابيب، و تؤثر حركة الأنابيب من خلال معادلة الاستمرار على معادلات المطرقة المائية و بالتالي على قيم الضغط و غزارة الجريان.

إن معادلات المطرقة المائية (جريان غير مستقر)، و المعادلات التي تصف السلوك الإنشائي الديناميكي لجدار الأنابيب، و المعادلات التي تصف الفعل المتبادل بين الأنابيب و التربة المجاورة تشكل جملة معادلات موسعة، وهي معادلات تفاضلية جزئية لا خطية. و تقدم حلول جملة المعادلات الموسعة على منظومات هيدروليكية نتائج تقارب القياسات الحقلية بشكل أفضل من نتائج الطريقة الكلاسيكية (معادلات المطرقة المائية) التي تعطي نتائج تختلف بشكل واضح عن نتائج القياسات الحقلية. و لا يمكن حل منظومة المعادلات الموسعة تحليلياً. لذا يتم دراسة و تطوير عدة طرائق عددية لتطبيق جملة المعادلات الموسعة على بعض المنظومات الهيدروليكية.

أعطى تطبيق جملة المعادلات الموسعة على منظومات هيدروليكية معينة نتائج أقرب للقياسات الحقلية من نتائج الطريقة الكلاسيكية. و بسبب عدم وجود طريقة تحليلية لحل هذه منظومة المعادلات الموسعة يجري تطوير عدة طرائق عددية. يواجه تطبيق جملة المعادلات الموسعة على منظومات هيدروليكية الكثير من

الصعوبات الرياضية، و التي كثيراً ما تؤدي إلى حالات عدم استقرار رياضي(عدم الحصول على حل محدد). و لذلك فإن دراسة المزيد من الحالات و إظهار الفروق بين نتائج الطريقة الكلاسيكية و نتائج حل جملة المعادلات الموسعة، الأقرب لنتائج القياسات الحقلية، يبرر المجهود الرياضي المبذول لحل جملة المعادلات الموسعة.

11-1- **معلومات أساسية**:

11-1-1- **معادلات المطرقة المائية** Water Hammer Equation :

انطلاقاً من تطبيق مبدأي مصونية الكتلة و مصونية كمية الحركة على حجم تحكم تُستنتج معادلات المطرقة المائية (الجريان غير المستقر):

- معادلة الاستمرار Continuity Equation:

$$V\frac{\partial P}{\partial s}+\frac{\partial P}{\partial t}+\rho_f a^2\frac{\partial V}{\partial s}=0 \qquad 11\text{-}1$$

- معادلة الحركة (معادلة أويلر) Equation of motion

$$V\frac{\partial V}{\partial s}+\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial P}{\partial s}+g\sin(\theta)+\frac{f}{2D}V|V|=0 \qquad 11\text{-}2$$

حيث:$p(N/m^2)$ - ضغط الماء الداخلي، V (m/s) - سرعة الماء الوسطية، هي توابع للزمن t (s) و الإحداثي المكاني s (m)، ρ_f (kg/m^3) - الكتلة الحجمية للماء، D(mm)– القطر الداخلي

a (m/s) - سرعة موجة الضغط، و تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$a=\sqrt{K/(\rho_f+\rho_f.(K.D/(E.e))} \qquad 11\text{-}3$$

حيث K- معامل انضغاطية الماء، E- معامل مرونة مادة الأنبوب،e- سماكة جدار الأنبوب،

أثناء استنتاج معادلات المطرقة المائية أُهملت قوة الجاذبية، و اللزوجة، و الحدود اللاخطية، بسبب صغرها مقارنة ببقية الحدود، لذلك نتجت جملة معادلات خطية.

تُطبق هذه المعادلات على الأنابيب المصنعة من الفولاذ، و الفونت المرن التي تُظهر سلوكاً مرناً واضحاً عند التشوهات الصغيرة (علاقة خطية بين الإجهاد و التشوهات)، مع وجود فروق بين النتائج النظرية و القياسات الحقلية بسبب التفاعل بين التربة و الأنبوب و مرونة الوصلات. إن تطبيق هذه المعادلات على أنابيب البولي ايتيلين يعطي أخطاءاً، لأن أنابيب البولي ايتيلين تظهر سلوكاً يوصف بالمرونة اللزجة

Viscoelasticity، و يعبر عنه بسلوك مركب (من مرونة الجسم الصلب $\sigma=E.\varepsilon$ و لزوجة السائل $\sigma=\mu.\partial\varepsilon/\partial t$ ، حيث σ الإجهاد، و E معامل المرونة، و ε التشوه، و μ اللزوجة) ينتج عنه الزحف creap و استرخاء الإجهاد stress relaxation. و المعادلة الأساسية التي تربط الإجهاد بالتشوه هي: $\sigma=E\varepsilon+\mu\partial\varepsilon/\partial t$

و باعتبار العلاقة بين الإجهاد المحيطي و الضغط الداخلي: $\sigma = pDc_1/(2e)$

حيث c_1 ثابت يتعلق بتثبيت الأنبوب، و العلاقة بين اللزوجة

و معامل المرونة: $\eta=\tau.E$ حيث τ ثابت تناسب يُعرف بزمن الاسترخاء Relaxation time،

فإن علاقة الإجهاد بالتشوه لأنابيب البولي ايتيلين تأخذ الشكل الآتي:

$$\frac{d\varepsilon}{dt}=\frac{1}{\tau}\left(\frac{pDc_1}{2eE}-\varepsilon\right) \qquad 11\text{-}4$$

و تأخذ معادلة الاستمرار في معادلات المطرقة المائية في أنابيب البولي ايتيلين:

$$\frac{\partial P}{\partial t}+V\frac{\partial P}{\partial s}+\rho_f a^2\frac{\partial V}{\partial s}+2\rho_f a^2\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}=0 \qquad 11\text{-}5$$

- معادلات المطرقة المائية الموسعة Extended water hammer Equations:

عندما تتعرض منظومة أنابيب لقوة باتجاه محور الأنابيب تنشأ حركة محورية تؤدي إلى ظاهرتين: مفعول بواسون و مفعول الحركة المشتركة للأنابيب عند الوصلات Junction Couple، و تأخذ معادلات المطرقة المائية الشكل الآتي:

$$\frac{\partial V}{\partial s}+\frac{1}{\rho_f.a^2}\frac{\partial P}{\partial t}=2\nu\frac{\partial \dot{u}_s}{\partial s} \qquad 11\text{-}6$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial P}{\partial s}=0 \qquad 11\text{-}7$$

و سرعة موجة الضغط تعطى بالعلاقة:

$$a=\sqrt{k/(\rho_f*(1+(1-\nu^2)*(k/E)*(D/e))}$$

11-1-2- معادلات الديناميك الإنشائي للأنابيب: Dynamic Structure Equations

توصف الإجهادات و التشوهات في الأنابيب عند تعرضها لقوة ديناميكية بالمعادلات الآتية:

- المعادلات الموسعة للحركة المحورية لجائز:

Extended beam Equation of motion in axial direction

$$\frac{\partial \dot{u}_s}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t}\frac{\partial \sigma_s}{\partial s} = 0 \qquad 11\text{-}8$$

$$\frac{\partial \dot{u}_s}{\partial s} - \frac{1}{E}\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = -\frac{\nu R}{Ee}\frac{\partial P}{\partial t} \qquad 11\text{-}9$$

- معادلة الحركة القطرية Equation of motion in radial direction:

$$\rho_t \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial (r\sigma_r)}{\partial r} - \frac{\sigma_\varphi}{r} \qquad 11\text{-}10$$

حيث u_s(m) - الانتقال المحوري، u_r (m) - الانتقال القطري، ρ_t (kg/m^3) - الكتلة الحجمية لمادة الأنبوب، σ_s (N/m^2) - الإجهاد المحوري، σ_r (N/m^2) - الإجهاد القطري، σ_φ(N/m^2) - الإجهاد المحيطي

عند استنتاج هاتين المعادلتين أُهملت الحدود اللاخطية، و قوة الجاذبية، و قوى القص، و قساوة العزم، و العطالة الدورانية، و التخميد الإنشائي.

تربط معادلات الحركة بين السرع و الإجهادات، و لتكتمل جملة معادلات الديناميك الإنشائي، يجب إضافة علاقة الإجهاد بالتشوه حسب قانون هوك المعمم generalized Hooke's law ، التي تكتب كما يأتي:

$$\sigma_s = E\frac{\partial u_s}{\partial s} + \nu\sigma_\varphi + \nu\sigma_r \qquad 11\text{-}11$$

تمثل القيم الذاتية لجملة معادلات الهيدروليك-الانشاء التفاضلية الجزئية القطعية الزائدة سرع انتشار في اتجاهين لأمواج محورية في أنابيب مليئة بالماء، و تعطى هذه السرع من علاقة تبعثر ثنائية التربيع:

$$\lambda^4 - \gamma^2\lambda^2 + c_f^2 c_t^2 = 0 \Rightarrow \gamma^2 = (1 + 2\nu^2\frac{\rho_f}{\rho_t}\frac{R}{e}\frac{1}{1+0.5e/R})c_f^2 + c_t^2$$

$$\lambda_{1,2}^2 = \frac{1}{2}[\gamma^2 - (\gamma^4 - 4c_f^2 c_t^2)^{1/2}],\ \lambda_{3,4}^2 = \frac{1}{2}[\gamma^2 + (\gamma^4 - 4c_f^2 c_t^2)^{1/2}]$$

$$c_f^2 = \{\rho_f[\frac{1}{K} + \frac{2}{E}(\frac{R}{e}(1 - \frac{\nu^2}{1+0.5e/R}) + \frac{1+e/R}{1+0.5e/R} + \nu)]\}^{-1},\ c_t^2 = \frac{E}{\rho_t}$$

11-1-3- معادلات ضغط التربة:

يفرض أن التربة تسلك إنشائياً كمادة مرنة لدنة Elastoplastic material ، لأنها تتشوه بتناسب خطي مع الإجهاد، إلى أن يبلغ التشوه deformation الانزياح الحدي limiting displacement، عندها تسلك التربة سلوكاً لدنًا. و تستند المعادلات التي تصف

الفعل المتبادل بين الأنابيب و التربة على نظرية فينكلر Winkler pipe-soil interaction تكتب معادلة التوازن للفعل المتبادل المحوري، كما يأتي:

$$\frac{\partial \sigma_s^a}{\partial s} - \frac{k_s^a}{e} u = 0; \qquad u < u_s \qquad 11\text{-}12$$

حيث u (m) - الانتقال المحوري، σ_s^a (N/m^2) - الإجهاد المحوري، k_s^a – معامل الفعل المتبادل المحوري بين الأنابيب و التربة، e (m) – سماكة جدار الأنبوب، u_s – الإنتقال المحوري الحدي.

في حال التربة المرنة: $k_s^a = G_s / (4(1-\nu_s)D/2)$

و تصاغ معادلة التوازن للفعل المتبادل القطري باعتماد علاقة شبه مستقرة بين الإجهاد المحيطي و الضغط.

يُعطى الإجهاد المحيطي σ^p_θ في الأنابيب النحيفة (D/e>40) نتيجة الضغط الداخلي بالعلاقة:

$$\sigma_\theta^p = (P_i - P_e)\left(\frac{D-e}{2e}\right) \qquad 11\text{-}13$$

حيث: $P_i(N/m^2)$ – الضغط الداخلي، $P_e(N/m^2)$ – الضغط الخارجي.

إن الانتقال القطري للأنبوب مقيد بالقساوة القطرية للتربة المحيطة. و تُعطى علاقة القوة بالانتقال القطري لأنبوب في وسط غير محدود بالصيغة:

$$P_e = k_r^\theta u_r = \frac{E_s}{D/2(1+\upsilon_s)} u_r \qquad 11\text{-}14$$

حيث: k_r^θ (N/m^3) – معامل قساوة التربة بالاتجاه القطري، E_s (N/m^2) – معامل مرونة التربة.

υ_s – معامل بواسون للتربة.

يفترض بأنه لا توجد قيود بالاتجاه القطري في أجزاء الأنبوب عندما لا يكون مسنوداً، و بالتالي $P_e=0$.

يمكن أن يتعرض الأنبوب إلى عزم باتجاه محور الأنبوب، و بتأثير بواسون يُنتج الإجهاد المحوري إجهاداً محيطياً كما يأتي:

$$\sigma_\theta^f = -\upsilon_p \sigma_s^f = -\upsilon_p \left(\frac{M_s D}{2I_{zz}}\right) \qquad 11\text{-}16$$

حيث: υ_p– معامل بواسون للأنبوب، M_z (N.m)– العزم المحوري، I_{zz} (m^4)– عزم عطالة مقطع الأنبوب حول z.

بالتالي يُعطى الإجهاد المحيطي الكلي بالعلاقة:

$$\sigma_\theta^{tot} = \sigma_\theta^p + \sigma_\theta^f \qquad 11\text{-}17$$

تصف جملة المعادلات الموسعة حركية أمواج ضغط Pressure wave بسرعة معينة، و أمواج إجهاد Stress wave بسرعة معينة، و تكون سرعة موجة الإجهاد أكبر بكثير من سرعة موجة الضغط.

11-1-4- **الشروط الابتدائية و المحيطية:**

إن تطبيق جملة المعادلات الموسعة على منظومة هيدروليكية غير كافٍ للحل الهيدروليكي و الإنشائي، أي إيجاد تغيرات الضغط و الغزارة ، و الإجهاد و الانتقال زمنياً و مكانياً. و لإيجاد الحل يجب معرفة الشروط الابتدائية، و جملة شروط محيطية تمثل شروط التماس بين الماء و الأنبوب و معادلات المنحنيات المميزة للأجهزة الهيدروليكية تتم صياغتها عند وجود أجهزة هيدروليكية (عقدة تفرع - مضخة – سكر تحكم بالغزارة و بالضاغط) بين أنبوبين.

تؤخذ عموماً الشروط المحيطية Interface conditions الآتية:

$$\sigma_r|_{r=R} = -p|_{r=R} \qquad - c_1-$$

$$\sigma_r|_{r=R+e} = -p_{out} \qquad - c_2-$$

$$\partial(u_r/\partial t)|_{r=R} = v_r|_{r=R} \qquad - c_3-$$

$$\partial(u_r/\partial t)|_{r=R+e} = (v_r)_{out} \qquad - c_4-$$

الشرطان c_1، c_2 ديناميكيان يعطيان ضغط الماء على جدار الأنبوب.

الشرطان c_3، c_4 حركيان يصفان الحركة عند تماس الأنبوب و الماء.

11-2- **طرائق الحل العددية**:

إن جملة المعادلات التي تصف الفعل المتبادل بين المطرقة المائية و جدار الأنبوب و التربة هي معادلات تفاضلية جزئية لاخطية قطعية زائدة، و لا توجد طريقة تحليلية لحل هذه المعادلات. لذلك تُطور طرائق عددية ما تزال قيد البحث و الدراسة. و تقدم هذه الطرائق العددية حلولاً لجملة جزئية من جملة المعادلات الموسعة في حالات خاصة، مع وضع عدة فرضيات تبسيطية.

طرائق الحل العددي قيد التطوير:

- طريقة المميزات الموسعة MOC.
- طريقة العناصر المحدودة FEM.
- طريقة الفروق المحدودة FDM.

11-2-1- **طريقة** MOC**:**

تُستخدم طريقة MOC لحل جملة المعادلات الهيدروليكية(معادلات المطرقة المائية). و تعتمد طريقة MOC على تحويل المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية بالاستعانة بشبكة المميزات وهي مستوي محدد بمحوري إحداثيات (x,t) ، و يمكن عد الأنبوب يبدأ من مبدأ الإحداثيات ويمتد مسافة تساوي طول الأنبوب على المحور (x) و يقسم بالتساوي بعقد حسابية و تُحدد خطوة زمنية للحل. و يُرسم على الشبكة من كل عقدة خطين مميزين بميل $\pm a$ يرمز لهما C^+،C^- . ثم تُحول المعادلات الهيدروليكية إلى معادلات تفاضل تام ODE، ثم تُكتب بصيغة الفروق المحدودة على الخطين المميزين. فتنتج المعادلتان الآتيتان:

$$C^+: \quad H_P = -B.Q_P + C_p \qquad 11\text{-}18$$

$$C^-: \quad H_P = B.Q_P + C_n \qquad 11\text{-}19$$

حيث $Q=A_f.V$ هي غزارة الجريان، و يشير الدليل P إلى كميات مجهولة،

B، C_n،C_p ثوابت تتحدد بكميات معلومة في الخطوة الزمنية السابقة كما يأتي:

$$B = c_f/(gA_f), \qquad C_p = H_{A1} + B.Q_{A1}, \qquad C_n = H_{A2} - B.Q_{A2}$$

حيث يشير الدليل p للخط المميز الموجب C^+، و الدليل n للخط المميز السالب C^-، و الدليل A1 لنقطة على الخط C^+ في اللحظة الزمنية $(t-\Delta t)$، و الدليل A2 لنقطة على الخط C^- في اللحظة الزمنية $(t-\Delta t)$.

و لتطوير طريقة MOC لتحل جملة معادلات هيدروليك-إنشاءات بكتابتها كالآتي:

$$A.\frac{\partial y}{\partial t} + B.\frac{\partial y}{\partial z} = r \qquad 11\text{-}20$$

حيث: A،B مصفوفتي الأمثال الثابتة $y=\{V \;\; H \;\; u_z \;\; \sigma_z\}^T$ تمثل شعاع المجاهيل.

يمكن تحويل المعادلات التفاضلية الجزئية إلى تفاضل تام، تكتب بالشكل الآتي:

$$\frac{dV}{dt} \pm \frac{1}{\rho_f.\tilde{c}_F}\frac{dP}{dt} + 2\nu\frac{(\tilde{c}_F/c_t)^2}{1-(\tilde{c}_F/c_t)^2}\frac{du_z}{dt} \mp \frac{2\nu}{\rho_f.c_F}\frac{(\tilde{c}_F/c_t)^2}{1-(\tilde{c}_F/c_t)^2}\frac{d\sigma_z}{dt} = 0 \qquad 11\text{-}21$$

$$\frac{d\dot{u}_z}{dt} \mp \frac{1}{\rho_t.\tilde{c}_t}\frac{d\sigma_z}{dt} - \nu\frac{R}{e}\frac{\rho_f}{\rho_t}\frac{(c_F/\tilde{c}_t)^2}{1-(c_F/\tilde{c}_t)^2}\frac{dV}{dt} \mp \nu\frac{R}{e}\frac{1}{\rho_t.\tilde{c}_t}\frac{(c_F/\tilde{c}_t)^2}{1-(c_F/\tilde{c}_t)^2}\frac{dP}{dt} = 0 \qquad 11\text{-}22$$

ثم تُكامل على الخطين المميزين المقابلين للقيم الذاتية (سرعة موجة الضغط) $\hat{c}_f$، $\hat{c}_f$، و على الخطين المميزين المقابلين للقيم الذاتية (سرعة موجة الإجهاد) $\hat{c}_t$، $\hat{c}_t$، فتنتج المعادلات التوافقية compatibility equations الآتية:

$$(TA)_{11}(V_p - V_{A_1}) + (TA)_{12}(H_p - H_{A_1}) + (TA)_{13}(\dot{u}_{zp} - \dot{u}_{zA_1}) + (TA)_{14}(\sigma_{zp} - \sigma_{zA_1}) =$$
$$\Delta t.[T_{11}r_1 + T_{12}r_2 + T_{13}r_3 + T_{14}r_4],$$
$$(TA)_{21}(V_p - V_{A_2}) + (TA)_{22}(H_p - H_{A_2}) + (TA)_{23}(\dot{u}_{zp} - \dot{u}_{zA_2}) + (TA)_{24}(\sigma_{zp} - \sigma_{zA_2}) =$$
$$\Delta t.[T_{21}r_1 + T_{22}r_2 + T_{23}r_3 + T_{24}r_4],$$
$$(TA)_{31}(V_p - V_{A_3}) + (TA)_{32}(H_p - H_{A_3}) + (TA)_{33}(\dot{u}_{zp} - \dot{u}_{zA_3}) + (TA)_{34}(\sigma_{zp} - \sigma_{zA_3}) =$$
$$\Delta t.[T_{31}r_1 + T_{32}r_2 + T_{33}r_3 + T_{34}r_4],$$
$$(TA)_{41}(V_p - V_{A_4}) + (TA)_{42}(H_p - H_{A_4}) + (TA)_{43}(\dot{u}_{zp} - \dot{u}_{zA_4}) + (TA)_{44}(\sigma_{zp} - \sigma_{zA_4}) =$$
$$\Delta t.[T_{41}r_1 + T_{42}r_2 + T_{43}r_3 + T_{44}r_4] \qquad 11\text{-}23$$

حيث $(TA)_{nm}$ أمثال ثابتة.

والتي هي صحيحة على الخطوط المميزة المعرفة بالمعادلات:

$$\frac{dz}{dt} = \pm\tilde{c}_F \qquad \text{and} \qquad \frac{dz}{dt} = \pm\tilde{c}_t$$

حيث سرع أمواج الضغط و أمواج الاجهاد الكلاسيكية:

$$c_F = \{\frac{K^*}{\rho_f}\}^{1/2} \quad \text{and} \quad c_t = \{\frac{E}{\rho_t}\}^{1/2}$$

تختلف عن سرع أمواج الضغط و أمواج الاجهاد (FSI):

$$\tilde{c}_F = \frac{1}{2}\sqrt{2}\{\gamma^2 - (\gamma^4 - 4c_F c_t)^{1/2}\}^{1/2} \ ,$$

$$\tilde{c}_t = \frac{1}{2}\sqrt{2}\{\gamma^2 + (\gamma^4 - 4c_F c_t)^{1/2}\}^{1/2}$$

Where $\gamma^2 = (1 + 2\nu^2\frac{\rho_f}{\rho_t}\frac{R}{e})c_F^2 + c_t^2$

It is noted. $\tilde{c}_F.\tilde{c}_t = c_F.c_t$

11-2-2- **طريقة** FEM**:**

تُستخدم طريقة FEM لحل معادلات الديناميك الإنشائي لجدار الأنبوب، وهي معتمدة في البرامج الإنشائية. حيث يُفرض أن السلوك الإنشائي للأنبوب هو جائز يُقسم إلى عناصر محدودة جائزية، ثم يُحمل ديناميكياً بحمولة موزعة محورياً أساسها الضغط الهيدروليكي المتغير زمانياً و مكانياً.

تتضمن طريقة FEM حساب مصفوفات الكتل M، و مصفوفات القساوة K لجميع العناصر و وضعها في مصفوفات كلية. تُعطى معادلة الديناميك الإنشائي للأنبوب بدلالة الانتقال بالشكل:

$$M\ddot{u} + Ku = f \qquad 11\text{-}24$$

حيث f شعاع القوى، و تُعطى M، K، f بدلالة توابع الشكل s.

في حال اعتبر الأنبوب كجائز وتوابع الشكل خطية عندها:

$$M = \frac{l}{6}\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, K = \frac{1}{l}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, f = \frac{l}{2}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

حيث $l=z_b-z_a$ طول العنصر المحدود.

و يمكن تطوير طريقة FEM بحيث تحل جملة معادلات هيدروليكية-إنشائية. حيث تصاغ المعادلات الإنشائية بدلالة الانتقال u. و تصاغ المعادلات الهيدروليكية بدلالة الضغط P. و الإجراء العام للحل هو إعادة صياغة جملة المعادلات الهيدروليكية-الإنشائية بطريقة العمل الوهمي، ثم تُكامل بالتجزئة لإنقاص مرتبة مشتق الانتقال u بالنسبة للإحداثيات المكانية. يُقسم الأنبوب إلى عناصر محدودة جائزية. و تُعرف توابع الشكل و توابع الاختبار بما يوافق تشوهات الأنبوب الستاتيكية. ثم تُحسب مصفوفة الكتلة M و مصفوفة القساوة K لكل عنصر، و تُوضع في مصفوفات تمثل كامل المنشأة. فتنتج معادلات التفاضل التام الآتية:

$$M\ddot{u} + Ku = f \qquad 11\text{-}25$$

حيث f شعاع القوى، و بحيث تكون الشروط المحيطية جزءً من المعادلة 11-25 و يمكن معرفة أنماط اهتزاز الأنابيب و تواترها بإجراء تحليل اهتزازي للمعادلة 11-25 و ذلك بعد تحويل المصفوفتين إلى مصفوفتين قطريتين، و وضع f=0.

و يمكن حل جملة معادلات المطرقة المائية التي تحوي حدود إنشائية و جملة معادلات الديناميك الإنشائي التي تحوي حدود هيدروليكية باستخدام طريقة MOC و طريقة FEM بإجراء حل تكراري، و ذلك بحل متناوب لكل من المعادلات الهيدروليكية بطريقة MOC و المعادلات الإنشائية بطريقة FEM، باعتبار تعويض نتائج كل منهما بالأخرى في كل خطوة من خطوات الحل، و هكذا حتى يتقارب الحل إلى قيم محددة في كل فترة زمنية.

11-2-3- **طريقة** FDM**:**

تُستخدم طريقة FDM لحل المعادلات المحورية التفاضلية و العزمية التفاضلية و القطرية الجبرية التي تصف الفعل بين الأنابيب و التربة ، حيث تُكتب المعادلات في كل خطوة من خطوات الحل. و يجري التحليل بتقسيم الوسط المحيط بالأنبوب بمجموعة عقد حسابية يصل بينها خطوط تشكل الشبكة الحسابية . و يُفرض شرطان، الأول أن الفعل المتبادل بين الأنابيب و التربة يتم في مستوي التشوه Plane Strain، والثاني أن الفعل المتبادل يتم بشرط الجفاف Dry Conditions . و تختار المسافة بين الشروط المحيطية كبيرة بما يكفي لتخفيف تأثير هذه الشروط. ثم تُعطى الشروط المحيطية لتثبيت الانتقال في الاتجاه x (الاتجاه الأفقي في مستوي التشوه) في كلا الجانبين من الشبكة الحسابية، و يُعطى شرط الانتقال الصلد (التثبيت في الاتجاه y،x) في الجانب السفلي من الشبكة. و كشروط ابتدائية يُعطى توازن التربة تحت تأثير إجهادات الجاذبية. و يُمثل الفعل المتبادل بين الأنابيب و التربة في طريقة FDM بعنصر بيني Interface Element حيث يسمح بالفصل بين الأنابيب و التربة. و يُفرض عدم وجود دوران في العقد الحسابية بسبب السلوك الصلب. و بسبب الفعل المشترك عند الوصلات Junction Couple يمكن حصول انتقال نسبي محوري بين الأنبوب و التربة، لذلك تُفرض زاوية احتكاك بيني $\emptyset_m$ تساوي $\emptyset_p/2$ حيث $\emptyset_p$ زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة، و تتعلق بطبيعة السطح الخارجي للأنبوب.

تكتب المعادلات بطريقة FDM بدلالة قيم المجاهيل عند العقد الحسابية، و تنتقل التغيرات الحاصلة على قيم المجاهيل عند أي عقدة إلى العقد المجاورة عبر الخطوط الواصلة بين العقد.

يمكن الدمج بين طريقة MOC-FEM و طريقة FDM للاستفادة من إيجابيات هاتين الطريقتين و التخفيف من سلبياتهما، و الوصول إلى استقرار رياضي أفضل، أي الحصول على حلول بقيم محدودة بشكل أسرع أو عند إخفاق إحدى الطريقتين.

- **مثال**: **الفعل المتبادل بين الماء و الأنبوب** في حالة الأنبوب المرن:

منظومة هيدروليكية مكونة من خزان – أنبوب مستقيم – سكر. و يُطلب حساب تغير الضاغط مع الزمن عند السكر و في مقطع منتصف طول الأنبوب نتيجة الإغلاق الآني للسكر.

معطيات الأنبوب كما في الجدول (1).

الطول (m)	20
القطر (mm)	797
السماكة (mm)	8
كثافة الأنبوب (Kg/m^3)	7900
معامل يونغ للأنبوب (Gpa)	210
معامل بواسون للأنبوب	0.3
معامل مرونة التربة (Mpa)	100
معامل بواسون للتربة	0.3
سرعة موجة الضغط (m/s)	1024.7
سرعة موجة الإجهاد (m/s)	5280.5
السرعة في الحالة المستقرة (m/s)	1
ضاغط الخزان (m)	0

الجدول (1)

يُقسم الأنبوب إلى أجزاء بطول 10 م، وتحدد الخطوة الزمنية 0.01 ثانية، ثم ترسم شبكة المميزات بطريقة MOC و شبكة حسابية بطريقة FDM.

تُكتب جملة المعادلات الموسعة كما يأتي:

- معادلات المطرقة المائي:

$$B= 1024/(9.81*3.14*0.797^2/4) =209.5$$

$$C_p = H_{A1} + 209.5Q_{A1}, \qquad C_n = H_{A2} + 209.5Q_{A2}$$

$$C^+ :, \qquad H_P = -209.5Q_P + C_p$$

$$C^- :, \qquad H_P = 209.5Q_P + C_n$$

- معادلات الديناميك الإنشائي: بتقسيم الأنبوب إلى عنصر محدود جائزي واحد تُعطى المعادلات بالشكل المصفوفي:

$$\frac{20}{6}\begin{bmatrix}2 & 1\\ 1 & 2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{u}_{za}\\ \ddot{u}_{zb}\end{bmatrix}+\frac{1}{20}\begin{bmatrix}1 & -1\\ -1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{za}\\ u_{zb}\end{bmatrix}=\frac{20}{2}\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix}$$

- معادلات الجيوتكنيك:

$$P_e = \frac{E_s}{D/2(1+\upsilon_s)}u_r = \frac{1000}{0.797/2(1+0.3)}u_r$$

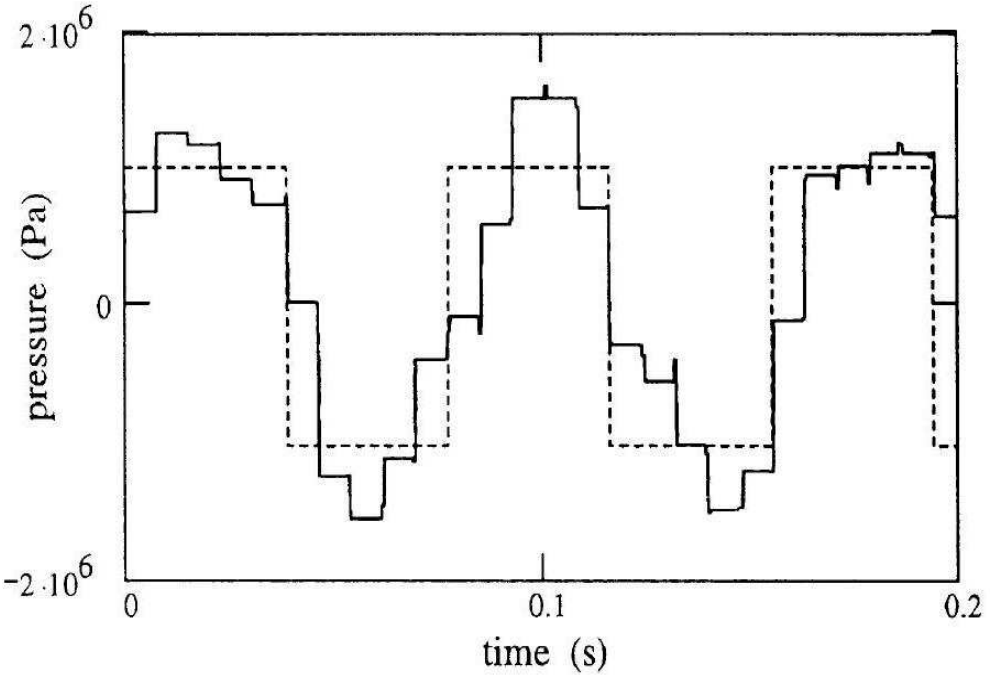
$$\sigma_\theta^p = (P_i - P_e)\left(\frac{0.797-8}{2*8}\right)$$

تُحل هذه المعادلات مع الشروط المحيطية و الإبتدائية في برنامج كُتب بلغة C^{++} لحل جملة المعادلات الموسعة بثلاث طرائق، بطريقة MOC-FEM و بطريقة FDM، و بطريقة ناتجة عن دمج الطريقتين السابقتين، و أُخذت النتائج إلى برنامج Excel لرسم النتائج. و حُلت جملة المعادلات الموسعة في برنامج MATLAB و رسمت النتائج فكانت متطابقة مع نتائج البرنامج بلغة C^{++}.

تعرض نتائج تغير الضغط مع الزمن عند السكر، و في مقطع منتصف المسافة، باستخدام معادلات المطرقة المائية الكلاسيكية و جملة المعادلات الموسعة، و ذلك لتوضيح ضرورة أخذ المعطيات الإنشائية و الفعل المتبادل مع التربة بالاعتبار عند التعامل مع مسائل المطرقة المائية لتكون النتائج مقاربة للقياسات الحقلية.

- **نتائج الحساب برمجيا بلغة C^{++} :**

تغير الضغط مع الزمن عند السكر؛ نتيجة إغلاق آني لسكر، الشكل (1):



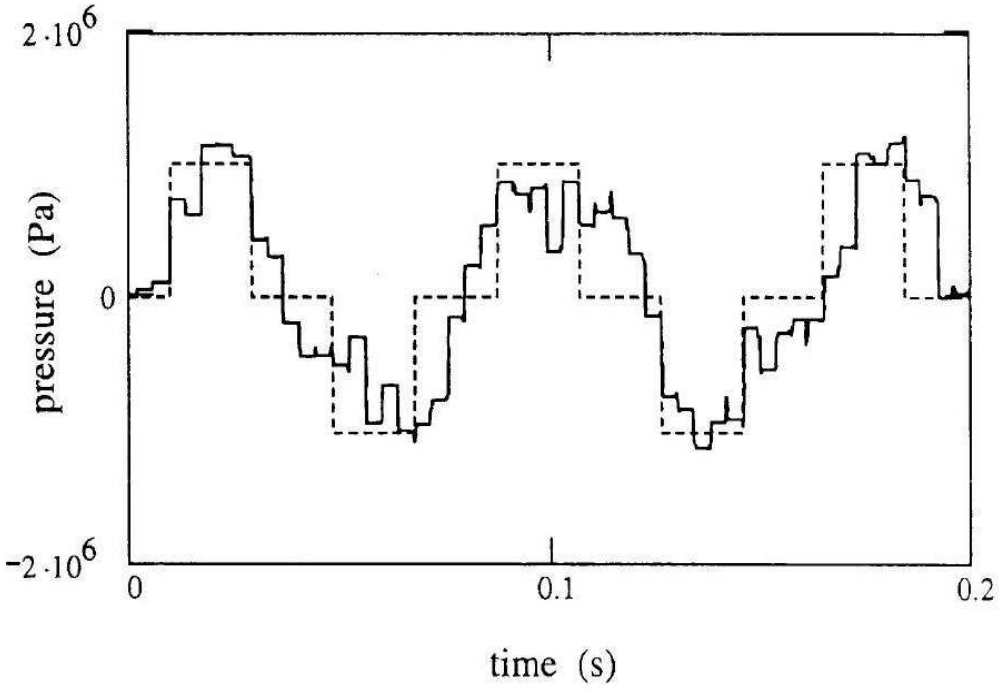
الشكل (1) تغير الضغط بدلالة الزمن عند السكر،
الخط المنقط نتيجة الحساب بالطريقة الكلاسيكية،
و الخط المستمر نتيجة الحساب بجملة المعادلات الموسعة.

يبين الشكل (1) تغير الضغط بدلالة الزمن عند السكر نتيجة توقف مفاجئ لسكر. الخط المنقط نتيجة الحساب بطريقة المطرقة المائية الكلاسيكية، و الخط المستمر نتيجة الحساب باستخدام جملة المعادلات الموسعة.

على الخط المنقط يزداد الضغط عند السكر من 0 MPa إلى 1 MPa ، و بعد ذهاب موجة الضغط من السكر إلى الخزان و العودة إلى السكر ينقص من 1 MPa إلى -1 MPa بشكل دوري بدور يساوي 0.08 s. أما على الخط المستمر فزاد الضغط لحظة الإغلاق إلى أقل من 1 MPa ليزداد بعدها إلى أكثر من 1 MPa، و يلاحظ تغيرات حول الخط المنقط مما يبين أهمية جملة المعادلات الموسعة و إيجابيات طريقة الدمج العددية.

- **نتائج الحساب برمجيا بلغة C^{++}:**

تغير الضغط مع الزمن في مقطع منتصف المسافة؛ نتيجة إغلاق سكر، الشكل (2):



الشكل (2) تغير الضغط بدلالة الزمن في منتصف المسافة،
الخط المنقط نتيجة الحساب بالطريقة الكلاسيكية،
و الخط المستمر النتيجة الحساب بجملة المعادلات الموسعة.

يبين الشكل (2) تغير الضغط في مقطع عند منتصف المسافة مع الزمن نتيجة إغلاق آني لسكر. الخط المنقط نتيجة الحساب بالطريقة الكلاسيكية، و الخط المستمر نتيجة الحساب بجملة المعادلات الموسعة.

على الخط المنقط يحافظ الضغط على قيمته حتى ورود موجة الضغط، حيث يزداد من 0 MPa إلى 1 MPa ، تذهب الموجة إلى الخزان و تعود إلى المقطع المدروس ينقص إلى 0 MPa، ثم تذهب الموجة إلى السكر و تعود لينخفض إلى -1 MPa، ثم تذهب الموجة إلى الخزان و تعود إلى المقطع المدروس لتزداد إلى 0 MPa. و على الخط المستمر يزداد الضغط لحظة الإغلاق إلى أقل من 1 MPa عند وصول موجة الضغط ليزداد بعدها إلى أكثر من 1 MPa، و يلاحظ تغيرات حول الخط المنقط مما يبين أهمية جملة المعادلات الموسعة و أهمية طريقة الدمج العددية.

الفصل الثاني عشر

اجراءات و أجهزة الحماية من المطرقة المائية

12-1- أسباب المطرقة المائية في أنظمة الأنابيب.

12-2-التحكم بضغوط المطرقة المائية.

12-3- خزانات الحماية.

12-4-سكور الهواء.

اجراءات و أجهزة الحماية من المطرقة المائية
Counter Measures and Protection Devices

تسبب المطرقة المائية في أنظمة الأنابيب ضغوطا عاليا أو منخفضة غير مسموحة objectionable . تؤدي هذه الضغوط العالية إلى تحطيم damage المضخات، السكور، و التجهيزات الأخرى في أنظمة الأنابيب، اضافة إلى تمزيق rupturing الأنابيب. و يستخدم مصطلح فشل failure لوصف عدم قدرة منظومة على تلبية أحد متطلبات الأداء، مثل اذا اقتضت متطلبات الأداء بقاء الضغط أعلى من الضغط الجوي و تبين بالتحليل أن الضغط انخفض إلى ما دون الضغط الجوي.

تصل الضغوط المنخفضة إلى قيم يبدأ عندها تحرير الهواء المنحل في الماء، أو تبخر الماء اذا انخفض الضغط إلى ضغط التبخر. و في بعض الحالات يحدث اغلاق أو انهيار جيوب الغاز مما يسبب ضغوط صدمة عالية تقود إلى فشل الأنابيب.

يمكن أن تؤدي المطرقة المائية في بعض الظروف إلى حدوث اهتزاز في الأنابيب. حيث من الجائز لبعض الأحداث التي تؤدي إلى تغير ضغوط جيبي بتردد يقارب التردد الطبيعي للأنابيب. و في هذه الحالة تحدث اجهادات أو تشوهات أو انتقالات غير مرغوبة تسبب انهيار المنظومة.

و يعتبر تصميم منظومة أنابيب تتحمل جميع الضغوط العظمى و الدنيا التي تنشأ في ظروف التشغيل خلال عمر المشروع مسألة غير اقتصادية، ولا بد من طرائق حماية تعتمد إما اجراءات تحكم أو أجهزة حماية تمنع حدوث موجة ضغط غير مسموحة.

12-1- **أسباب المطرقة المائية في أنظمة الأنابيب**:

أهم أسباب المطرقة المائية في الشبكات هي:

- **حركة السكر** Valve movement : تسبب حركة السكر موجة ضغط تنتشر عبر المنظومة. يعتمد مطال هذه الأمواج على نوع السكر، و طريقة حركة السكر، و الخواص الهيدروليكية للمنظومة، اضافة إلى خواص مرونة و تقييد المنظومة. و إن تقييم أثر حركة السكر على الضغوط في منظومة يعتمد المنحني المميز للسكر.
- **سكر عدم الرجوع** Check valve : تحدث ضغوط المطرقة المائية العالية عند اغلاق السكر بشكل مفاجئ بينما يحدث الجريان المعاكس عبر السكر. و تزود سكور عدم الرجوع بآليات تخميد مثل النوابض أو الثقل الموازن لجعل الإغلاق بطيئا بشكل مدروس.
- **الهواء في خطوط الأنابيب** Air in Lines : ينتج املاء الأنابيب، خاصة في أنظمة الضخ، سرعا أعلى من السرع المتوقعة في حالة الجريان المستقر. و في حال عدم وجود سكورة هواء لاخراج الهواء من الأنابيب ، تحدث ضغوط مطرقة مائية عالية غير مسموحة.
- **اقلاع مضخة** Pump startup : عند اقلاع مضخة و وضعها في العمل تحدث تغيرات ضغط موجبة positive pressure surge . و يعتمد مطال هذه الزيادة في الضغوط على الزيادة المفاجئة في السرعة التي تحدث عندما يُجبر سكر عدم لرجوع أن يفتح و يبدأ الماء بالحركة في الأنابيب. و في حال عدم وجود هواء في الخطوط، لا تنشأ ضغوط عالية تتجاوز ضاغط التسكير Shutoff head، إلا عندما يكون ضاغط التسكير عالي غير مسموح.
- **فشل طاقة المضخة** Pump power failure: عندما يكون الرفع الستاتيكي كبيراً و يرتفع بروفيل الخط بسرعة بعد المضخة، تخضع المضخة إلى ضغوط مائية عالية جداً عند انقطاع الكهرباء عن المضخة. و اذا انقطع التيار الكهربائي عن المضخات فجأة ينخفض الضغط بعد

المضخات سريعا و ينتشر انخفاض الضغط بسرعة موجة الضغط عبر الخطوط. و في حال حدوث انفصال عمود الماء يقود إلى موجة صدم عالية خطرة عند اغلاق التكف الغازي.

2-12- **التحكم بضغوط المطرقة المائية** Transient control :

تحدث أمواج ضغط المطرقة المائية في خطوط الأنابيب بسبب التغير في سرعة الجريان الناتجة عن حركة سكر أو اقلاع أو فشل مضخة و انفصال عمود الماء. و حيث أن التغير في الضغط الناتج عن المطرقة المائية يتناسب طرداً مع التغير في السرعة, فإن تجنب تغيرات السرعة المفاجئة سيمنع تغيرات الضغط الكبيرة. لذلك تعمل معظم الاجراءات و أجهزة التحكم، بحسب ظروف و اشتراطات المشروع، من أجل الوصول لضغوط مقبولة في كل ظروف التشغيل.

- **التحكم بحركة السكر** controlled valve movement : يؤثر مخطط اغلاق أو فتح سكر (نسبة فتة السكر كتابع للزمن) على ضغط المطرقة المائية الأعظمي.و يعتبر الجزء الأخير من الإغلاق حرجا في تحديد الضغوط العظمى، مثلا في سكر البوابة Gate valve آخر 2-5% من الاغلاق حرجة. و إن أفضل طريقة لتحديد تأثير مخطط اغلاق سكر على ضغوط المطرقة المائية هي معرفة معامل الفاقد للسكر عند مختلف الفتحات و إجراء محاكاة حاسوبية لسلوك المنظومة استجابة لمخططات اغلاق متنوعة.
- **سكر عدم الرجوع**: إن أفضل سكور عدم الرجوع هي التي لاتغلق فجأة لكن تغلق في لحظة توقف الجريان بالاتجاه التصميمي. و المن المهم التأكيد على أن يكون اغلاق السكر سريعا قبل بدأ الجريان بالاتجاه المعاكس، و أن يغلق ببطئ مع التخميد خلال فترة زمنية أكبر من زمن الاغلاق الحرج 2L/a في حال الجريان بالاتجاه المعاكس.
- **التحكم بعطالة المضخة** Pump inertia control: تهدف زيادة عطالة الأجزاء الدوارة من المضخة و المحرك إلى خفض معدل تباطؤ الضخة بعد انقطاع التيار الكهربائي. يؤثر معدل تباطؤ المضخة على معدل تغير السرعة و بالتالي تغير الضاغط. تتم زيادة العطالة عن طريق اضافة دولاب معدل flywheel . و عمليا توجد حدود عملية على حجم الدولاب المعدل. عادة يعتمد هذا الاجراء في حالات خاصة كالتي يكون فيها الخط قصرا نسبيا و التي يتحمل فيها المحرك تيار اقلاع اضافي.
- **سكر تحرير الضغط** Surge Relief Valves :تتطلب بعض شروط التشغيل إغلاق سريع لسكر ما يسبب انخفاض مفاجئ في السرعة ينتج عنه ضغوط مطرقة مائية عالية. في هذه الأحوال الحل الأكثر اقتصادية هو استخدام سكر تحرير ضغط، الذي يفتح عند زيادة الضغط عن حد معين يسمح لهروب جزء من الماء بحيث يمنع حدوث تغيرات سريعة في سرعة الماء و بالتالي في الضغوط. و هي تتراوح من أجهزة غير مكلفة تعمل بالنابض إلى أجهزة غالية و معقدة. يوضع هذا السكر بالقرب من الجهاز الذي يتوقع أن يسبب ضغوط عالية. و يصمم بحيث لا يفتح فجأة، و يُعاير ليعمل على تخفيض فاقد الماء و تجنب الضغوط العالية عند الاغلاق.
- **اجراءات تفريغ الهواء** Air Venting Procedures : عند املاء منظومة خط أنابيب يجب اتخاذ الحيطة لتمرير الماء في الأنابيب ببطئ بسرعة 0.33 m/s أو أقل. لذلك يجب أن توضع سكور اخراج و ادخال الهواء و اختيار أقطارها بحيث تسمح باخراج الهواء ببطئ من المنظومة، خاصة في أنظمة الضخ. و بالتالي تسمح اجراءات تشغيل المنظومة بالتحكم بمعدل تغير سرعة الماء و سرعة خروج الهواء لكي لا تنتج ضغوط مطرقة مائية عالية.

و يفضل في أنظمة الضخ استخدام أنابيب راجعة bypass ترجع الماء من جزء الضخ إلى جزء السحب لتساعد في تجنب أن تعمل المضخة في شروط اللاجريان، و عدم تشكيل

ضغوط عالية، خفض الحمل الكهربائي على المحرك و ارتفاع درجة الحرارة. و يمكن أن يقود الماء من جزء السحب إلى جزء الضخ عند توقف المضخة ليساعد على منع خفض سرعة الجريان.

- **خزانات الحماية** Surge Tanks: تستخدم للتخفيف mitigate من الضغوط العالية و المنخفضة. حيث تزود المنظومة بالماء عند الضغوط المنخفضة، و تخزن الماء من الخط عند الضغوط المرتفعة. يوجد عدة أنواع من خزانات حماية الخطوط من تأثير الضغوط العالية و المنخفضة و ذلك حسب شروط التشغيل و الاستثمار منها الخزان مفتوح النهاية open-end، خزان اتجاه واحد one-way، خزانات الحماية المهواة vented sutge tank، خزانات الضغط Air tanks.

12-3- **خزانات الحماية** Surge Tanks:

- **خزان الحماية مفتوح النهاية** Open-end surge tanks :

و هو أبسط أنواع خزانات الحماية، و بسبب بساطته يستخدم فقط في حال مرور خط الطاقة في الجريان المستقر من سطح الماء في خزان الحماية. و في حال حدوث تغير في الضغوط عند مقطع اتصال الخزان بالخط تحث غزارة من أو إلى خزان الحماية لتخفف من تغيرات الضغط في المنظومة.

- **خزان الحماية وحيد الاتجاه** One-way surge tank:

يستخدم لتجنب الضغوط المنخفضة في الخطوط بامرار الماء باتجاه واحد من خزان الحماية إلى الخط. حيث يوجد سكر عدم رجوع عند اتصال خزان الحماية مع الخط يمنع دخول الماء من الخط إلى الأنابيب.

المعادلات الناظمة في مقطع اتصال الخط مع خزان الحماية :

- المعادلة المميزة للأنبوب عالية التيار (قبل المقطع):

$$V_{PA} = C_3 - C_4 H_P \qquad 12\text{-}1$$

- المعادلة المميزة للأنبوب أدنى التيار (بعد المقطع):

$$V_{PB} = C_1 + C_2 H_P \qquad 12\text{-}2$$

- معادلة الاستمرار:

$$V_{PA} A_A + Q_s = V_{PB} \qquad 12\text{-}3$$

- معادلة الطاقة:

$$Q_s = C_{out} A_{out} [2g(H_s + z_{AB} - H_P)]^{0.5} \qquad 12\text{-}4$$

$$C_{out} = 1/\sqrt{1 + \sum K_L}$$

- يعطى ارتفاع الماء بالأنبوب بالعلاقة الأتية:

$$H_s = H_{s0} - \frac{1}{A_s} \int_0^t Q_s dt \qquad 12\text{-}5$$

حيث H_{s0} ارتفاع الماء الأولي في خزان الحماية، Q_s غزارة الماء من خزان الحماية.

و بحل 12-1 ... 12-4 تعرف السرع و الضواغط عند الخزان و غزارة خزان الحماية.

- **خزانات الضغط** Air tanks:

الغاية الأساسية لخزانات الضغط هي منع تشكل الضغوط السالبة و انفصال عمود الماء.

و يمكن استخدامه أيضا لتجنب أو لتخفيف آثار الضواغط العالية. و هو خزان جزؤه السفلي ماء و جزؤه العلوي هواء مضغوط أو غشاء مرن قابل للتمدد عند زيادة ضغط الماء. عند توقف مضخة و هبوط الضغط عند مقطع اتصال خزان الحماية مع الخط إلى ما دون ضغط حالة الاستقرار، يدفع الهواء المضغوط الماء من خزان الحماية إلى الخط للتخفيف من تغير السرعة و لا يحث ضغط سالب. و في حال ارتفاع الضغط فوق ضغط الحالة المستقرة يدخل الماء من الخط إلى خزان الحماية و يضغط الهواء فيتغير حجمه و يعمل كوسادة هوائية لامتصاص جزء من طاقة الجريان مما يسبب تخامد سريع لموجة الضغط.

عند تصميم خزان الضغط يفرض حجم أولي للخزان و حجم جزء الهواء، و باجراء تحليل المنظومة على المطرقة المائية تعرف الضواغط في كافة مقاطع المنظومة، فاذا كانت الضواغط خارج المجال المسموح يزاد حجم الخزان إلى أن تصبح الضواغط مقبولة. و يجب الانتباه إلى حجم خزان الضغط و حجم الهواء بحيث لا يسمح بخروج الهواء من خزان الضغط إلى الخط.

في بعض الأحيان لا يكفي خزان الضغط لمنع حدوث انفصال عمود الماء، حيث يمكن حدوث ضغوط سالبة في قمم محلية من الخط، و في هذه الحالات فإن وضع خزانات حماية وحيدة الاتجاه في هذه القمم يساعد على التخلص من الضغوط السالبة.

تُعطى معادلات المطرقة عند وجود خزان ضغط مع مجموعة ضخ:

- المعادلة المميزة للأنبوب أدنى التيار (بعد المقطع):

$$V_P = C_1 + C_2 H_P \qquad 12\text{-}6$$

- معادلة الاستمرار:

$$N_{Pu} Q + Q_c = V_P A \qquad 12\text{-}7$$

- معادلة الطاقة للمضخة:

$$H_{sump} + h_p = H_P \qquad 12\text{-}8$$

- معادلة الطاقة لخزان الحماية :

$$Q_c = C_{out} A_{out} [2g(H_c - H_P)]^{0.5} \qquad 12\text{-}9$$

$$h_p = N^2 N_{st} (C_7 Q/N + C_8) \qquad 12\text{-}10$$

حيث H_c الضاغط في خزان الحماية، Q_c غزارة الماء من خزان الحماية. C_{out} معامل غزارة الخروج، A_{out} مساحة مقطع الخروج من خزان الحماية.

جملة خمس معادلات بست مجاهيل، المعادلة الاضافية هي معادلة الحالة الترموديناميكية للهواء في خزان الحماية و عادة تستخدم المعادلة البوليتروبيك Polytropic process:

$$p/\gamma^{\eta c} = p_0/\gamma_0^{\eta}$$

$$\frac{(H_c + H_{atm} - z_p)\gamma_w}{\gamma^{\eta}} = \frac{(H_{c0} + H_{atm} - z_p)\gamma_w}{\gamma_0^{\eta}}$$

$$H_c = z_p - H_{atm} + (H_{c0} + H_{atm} - z_p)(Vo_{c0}/Vo_c)^{\eta} \qquad 12\text{-}11$$

حيث p_0, γ_0 الضغط المطلق و الوزن النوعي في الحالة المستقرة، p_0, γ_0 الضغط المطلق و الوزن النوعي في زمن لاحق، η الأس البوليتروبيك عادة 1.2، H_{atm} ضاغط الضغط الجوي، z_p منسوب الأنبوب، Vo_c حجم الهواء.

- يعطى حجم الهواء في لحظة لاحقة بالعلاقة الأتية:

$$Vo_c = Vo_{c0} + Q_c(t)\Delta t \qquad 12\text{-}12$$

بحل 12-6 حتى 12-11 تعرف السرع و الضواغط قبل و بعد المقطع و غزارة خزان الحماية.

في حال كان Q>=0 يقبل الحل. أما في حال Q<0 توضع Q=0 و يتابع الحل.

حساب حجم خزان الضغط: الخطوة الأولى في حساب حجم خزان الضغط هي تجريب عدة قيم متتالية للحجم الأولي للهواء, إلى أن يتم الحصول على قيم ضواغط مقبولة. هذه القيمة لحجم الهواء تحدد منسوب الطوارئ الأعلى upper emergency level، و اذا انقطع التيار الكهربائي و حجم الهواء أصغر من هذه القيمة ستحدث ضغوط صغيرة غير مقبولة. و بسبب تذبذب الضواغط خلال التشغيل الاعتيادي يجب اضافة حجم يعين لتجاوز التذبذب. ينصح بعض الباحثين باضافة قيمة 25% من حجم الهواء الأولي. يُجرى تحليل للتأكد من أن حجم خزان الضغط كبير بما يكفي لكي لا يفرغ عند حدوث الضغط السالب. و هذا الحجم يقابل منسوب الطوارئ الأدنى. و يعتبر حجم الهواء الاعظمي الذي يحقق بعد التحليل عدم خروج الهواء من الحزان حجم حزان الحماية الأصغري. و ينصح باضافة 10% لضمان عدم خروج الهواء من الخزان. و عند الحاجة إلى خزان حماية كبير يمكن استبداله بعدة خزانات حماية صغيرة أو وضع الخزان أفقياً. يصمم خزان الضغط بحيث يتحمل الضواغط التي يتعرض لها.

تجهيزات خزان الضغط : لكي يعمل خزان الضغط بفاعلية يجب أن يبقى منسوب الماء بين منسوب الطوارئ الأدنى و الأعلى و لتحقيق ذلك يلحق بخزان الحماية ضواغط هواء تزود الخزان بالهواء عند تناقص حجم الهواء نتيجة لانحلاله في الماء. و الانتباه إلى أن خروج الماء يجب أن يكون بأقل فواقد للستفادة بكفاءة من كامل حجم الخزان. يرفق بخزان الحماية بأجهزة انذار تعطي صافرة عند خروج منسوب الماء عن مجال منسوبي الطوارئ الأدنى و الأعلى. اضافة إلى زجاجة رؤية sight glass من أجل رؤية منسوب الماء.

- **خزانات الحماية المهواة** vented sutge tank:

يشابه عمل هذا الخزان عمل خزان الحماية وحيد الاتجاه عند حدوث الضغط السالب، و عمل خزان الضغط عند حدوث الضغط الموجب. يزود هذا الخزان بسكر هواء Vacuum valve يسمح للهواء بالدخول خلال الضغط السالب و لا يسمح للهواء بالخروج. و يزود الخزان بسكر تحرير هواء air release valve يسمح بخروج الهواء المضغوط ببطئ بحيث يسمح للهواء أن يشكل وسادة ماصة للصدمات.

12-4- **سكور الهواء** air-vacuum valve :

عندما ينخفض إلى ما دون الضغط الجوي يتحرر الهواء المنحل في الماء و اذا وصل الضغط إلى ضغط التبخر يتبخر الماء متحولا إلى غاز، مما يسبب ظاهرة انفصال عمود الماء، و عند إعادة التحام عمود الماء تنتج ضغوط عالية خطرة. لذلك وجود سكر هواء يسمح بدخول الهواء عند انخفاض الضغط إلى ما دون الضغط الجوي، و يسمح بخروج الهواء عند التحام عمود الماء، يخفف من ضغوط التحام عمود الماء. اضافة إلى عمل سكر الهواء في اخراج الهواء عند املاء أنبوب، و ادخاله عند تفريغ الأنبوب، لكي لا يؤدي اقلاع المضخات إلى ضغوط كبيرة غير مسموحة.

معادلات المطرقة المائية لحالة وجود سكرفي خط:

- المعادلة المميزة للأنبوب عالية التيار (قبل المقطع):

$$V_{PA} = C_3 - C_4 H_{PA} \qquad 12\text{-}13$$

- المعادلة المميزة للأنبوب أدنى التيار (بعد المقطع):

$$V_{PB} = C_1 + C_2 H_{PB} \qquad 12\text{-}14$$

- بإهمال الفواقد المحلية عند السكر:

$$H_{PA} = H_{PB} \qquad 12\text{-}15$$

- حجم الهواء في نهاية خطوة زمنية بدلالة حجم الهواء في بداية الخطوة:

$$m_{Pa} = m_a + (dm_a/dt)\Delta t \qquad 12\text{-}16$$

يمثل الحد dm_a/dt المعدل الزمني لجريان الهواء خلال السكر.

- على الهواء في الخط أن يحقق معادلة الاستمرار:

$$Vo_{Pair} = Vo_{air} + 0.5\Delta t[(Q_{pA} + Q_A) - (Q_{pB} + Q_B)] \qquad 12\text{-}17$$

- في حال تمدد و تقلص الهواء في الخط دون تبادل حراري، تُعطى معادلة الحالة:

$$P * Vo_{Pair} = m_{Pa} * R * T \qquad 12\text{-}18$$

حيث Vo_{air} حجم الهواء، R ثابت الغاز، (T,P) الضغط المطلق و الحرارة المطلقة للهواء في الخط.

- يرتبط الضغط المطلق P بالضاغط H_{PB} بالمعادلة التالية:

$$P = \gamma(H_{PB} - z + H_b) \qquad 12\text{-}19$$

من أجل معرفة معدل جريان الهواء خلال السكر تميز الحالات الآتية:

- جريان الهواء خلال السكر بسرعة تحت صوتية نحو الداخل:

تحدث هذه الحالة عندما يكون $0.53P_a < P < P_a$، يعطى معدل جريان الهواء بالمعادلة الآتية:

$$\frac{dm_a}{dt} = C_{in} A_{in} \{7 P_a \rho_a (\frac{P}{P_a})^{1.43} [1 - (\frac{P}{P_a})^{0.286}]\}^{0.5} \qquad 12\text{-}20$$

- جريان الهواء خلال السكر بسرعة صوتية نحو الداخل:

تحدث هذه الحالة عندما يكون $P< 0.53P_a$، يعطى معدل جريان الهواء بالمعادلة الآتية:

$$\frac{dm_a}{dt} = C_{in} A_{in} (0.686/\sqrt{RT_a}) P_a \qquad 12\text{-}20$$

- جريان الهواء خلال السكر بسرعة تحت صوتية نحو الخارج:

تحدث هذه الحالة عندما يكون $P_a/ 0.53> P> P_a$، يعطى معدل جريان الهواء بالمعادلة الآتية:

$$\frac{dm_a}{dt} = -C_{out} A_{out} P \{\frac{7}{RT}[(\frac{P}{P_a})^{1.43} - (\frac{P}{P_a})^{1.714}]\}^{0.5} \qquad 12\text{-}20$$

- جريان الهواء خلال السكر بسرعة صوتية نحو الخارج:

تحدث هذه الحالة عندما يكون $P> P_a/0.53$، يعطى معدل جريان الهواء بالمعادلة الآتية:

$$\frac{dm_a}{dt} = -C_{out} A_{out} (0.686/\sqrt{RT}) P \qquad 12\text{-}20$$

حيث P الضغط دعخل الخط، $\rho_a=P_a/(RT)$ الكتلة النوعية للهواء، (C_{in},A_{in}) ثابت تصريف السكر نحو الداخل و مساحة فتحة السكر، (C_{out},A_{out}) ثابت تصريف السكر نحو الخارج و مساحة فتحة السكر.

بحل 12-13 حتى 12-20 تعرف الضواغط و الغزارات عند السكر و معدل جريان الهواء من السكر.

الفصل الثاني العاشر

الملاحق

- ملحق 1 : أسس تصميم خط ضخ أو إسالة
- ملحق 2 : أنماط توضع الأنابيب و الاختبارات
- ملحق 3 : الأنابيب المستخدمة في مشاريع مياه الشرب
- ملحق 4 : دعامات الارساء
- ملحق 5 : التزويد المتقطع
- ملحق 6 : تقنيات متقدمة في التحليل الهيدروليكي
- ملحق 7 : خوارزميات لنمذجة ظاهرة المطرقة المائية

ملحق 1:

أسس تصميم خط ضخ أو إسالة

المعطيات :هي:

1- الغزارة الدنيا و العظمى.

2- إحداثيات نقطة البداية و نقطة النهاية، فرق المنسوب مع اعتبار تغير منسوب الماء.

خطوات التصميم:

1- صياغة مفاهيم و مبادئ و أسس العامة كأساس للدراسة (Basic Concepts).

2- جمع البيانات و المعلومات المتوفرة عن منطقة المشروع، و القيام بالزيارات الحقلية.

3- إعداد مخطط طبوغرافي يربط بين النقطتين البداية و النهاية.

4- تخطيط هندسي لعدة مسارات لخط الأنابيب (اعتمادا على خبرة سابقة): تعار أهمية خاصة للظروف الصعبة: (وديان – منحدرات –منشآت أو مشاريع- حفريات كبيرة – ردميات كبيرة – توليد ضغوط سالبة - ...) يفضل أن يكون الخط دوما صاعدا.

5- اجراء دراسة مقارنة فنية استثمارية اقتصادية للمسارات المختارة و الاتفاق على الاهمية و التثقيل، ثم اختيار المسار الأمثل.

6- اجراء الدراسة الهيدروليكية الانشائية الكهربائية الميكانيكية العامة.

7- اجراء الدراسات التفصيلية و وضع المخططات، و وضع دفتر الشروط الفنية.

8-

في المشاريع الصغيرة (غزارات صغيرة، طول خط مشروع صغير، ضواغط صغيرة،...) يمكن اختيار مسار اعتمادا على الخبرة، و تحديد طول مسار الخط، و تحديد قطر أنبوب الضخ بطريقة تقريبية:

- تحدد السرعة الاقتصادية (للأقطار الصغيرة) ضمن الحدود 1.5 – 2.5 م/ثا

و من قانون الاستمرار : $Q = V * \pi * D^2 / 4 \Rightarrow D = (4 * Q / (\pi * V))^{0.5}$

أما في المشاريع الكبيرة و المتوسطة يجب تحديد القطر الاقتصادي و نوع الأنبوب بعد اجراء مقارنة فنية اقتصادية لعدة حلول بناءا على العوامل الأساسية (كلفة الأنبوب – كلفة المضخات و الصيانة و الاستثمار – كلفة الحفر و الردم – كلفة المنشات و الكتل البيتونية - أجور و نفقات).

كلفة المشروع: تتضمن كلفة المشروع مجموعة الكلف التالية:

1- كلفة الأعمال المدنية : و تشمل:- الدراسات – الحفريات – الموقع العام للمحطة – أبعاد المحطة – أنبوب الضخ و أعماله – الشبكة الكهربائية – الشبكة الصحية – شبكة مياه شرب – شبكة الهاتف – شبكة الطرقات .

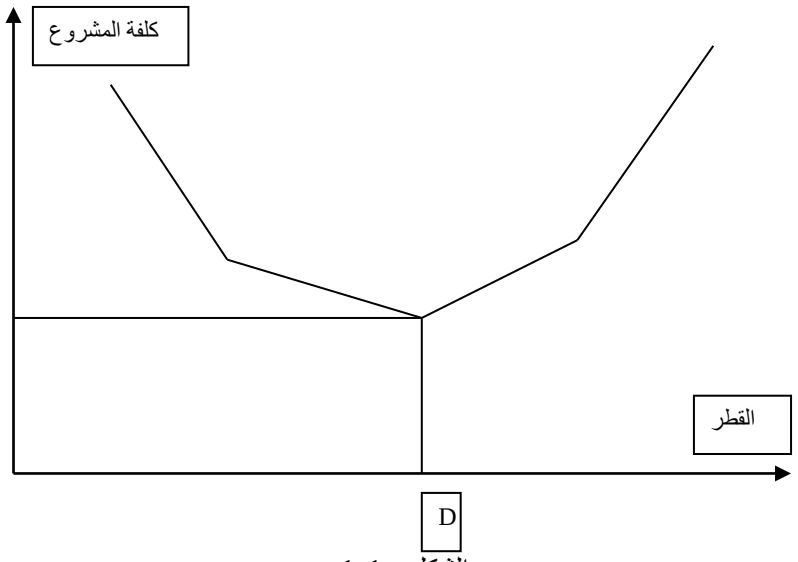
2- كلفة التجهيزات و التركيب و التشغيل و التدريب و الصيانة : - كلفة المضخات و محطاتها – كلفة أجهزة التحكم و اللوحات الكهربائية – كلفة أجهزة القياس – كلفة التشغيل التجريبي.

3- كلفة الاستثمار: - كلفة الطاقة عند الاستثمار – كلفة الزيوت و الشحوم – أجور اليد العاملة – كلفة قطع التبديل – كلفة الصيانة.

حساب القطر الاقتصادي:

الكلف	تابع الكلفة للقطر
كلفة الأنابيب	$P1=k1d^2$
كلفة الحفريات	$P2=k2d^2$
كلفة التركيب	$P3=k3L$
كلفة العزل	$P4=k4dL$
كلفة التشغيل	$P5=k5.N.T$

وضعت الكلف كتوابع لقطر خط الأنابيب للحصول على منحني تابعي إجمالي يعطي الكلفة الإجمالية بدلالة القطر. و يمكن من المنحني رؤية مجال للقطر تكون الكلفة أصغرية . و إجمالا عند اختيار قطر صغير تكون كلفة الخط صغيرة و لكن الفواقد تصبح كبيرة مما يتطلب مضخة بضاغط كبير و هذا ما يرفع ثمن المضخة و تكاليف التشغيل.



الشكل م 1-1
الكلفة بدلالة القطر

- **<u>اجراء الحسابات الهيدروليكية</u>**:

1- تحديد السرعة الدنيا و العظمى وعدد رينولدز و الخشونة المطلقة و النسبية (مع اعتبار تقادم الأنبوب و ازدياد خشونته مع الاستخدام) و تحديد معامل احتكاك دارسي λ .

2- تحديد ثوابت الفواقد المحلية – التجهيزات- السكور- الأكواع-النقاصات...

3- حساب ثابت المنحني المميز للأنبوب a :

$$a = \lambda * \frac{l}{D} * \frac{16}{\pi^2 * 2 * g * D} + \sum k * \frac{16}{D^4 * 2 * g * \pi^2}$$

4- حساب الخط المميز للأنبوب ورسم المعادلة:

$$h = aQ^2 + e$$

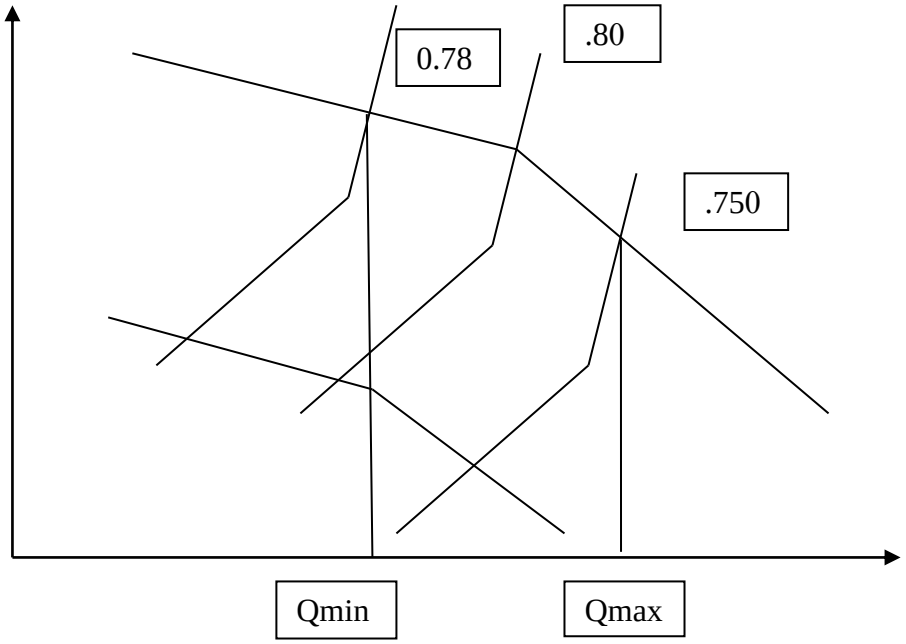
حيث e فرق المنسوب بين بداية و نهاية المشروع .

5- تحديد الضاغط المطلوب لرفع الغزارات التصميمية:

$$Q_{max} \Rightarrow H = h\max, \quad Q_{min} \Rightarrow H = h\min$$

6- من البروشورات المتوفرة عن المضخات الموجودة في السوق اختيار المضخة أو مجموعة مضخات مناسبة: - مضخة واحدة – وصل مجموعة على التسلسل – وصل مجموعة على التوازي – (دورانية، عمودية – أفقية)، و بناءا على المنحنيات المميزة الأربعة للمضخات يجب أن تكون نقطتي العمل Q_{min}، Q_{max} أقرب ما يمكن من المردور الأعظمي.

7- تحديد نقطة عمل محطة الضخ و تحديد استطاعة المضخة و نوعها.



الشكل م 1-2
المنحنيات المميزة للمضخة و الأنابيب

8- من أبعاد المضخات و نوعها، يمكن تصميم محطة الضخ.

9- تحديد أجهزة القياس و الحساسات العدادات اللازمة قي محطة الضخ لقياس:
ps، pd، n، I، V.

10- حساب الضغط الأعظمي pd و التأكد أن الأنبوب يتحمله :

$$\sigma = p_d \frac{r}{\delta}$$

11- حساب توزع الضغط على طول الأنبوب للتأكد أن الضغط لن ينخفض في أي نقطة إلى ما دون ضغط التبخر و حدوث التكهف . إضافة إلى انه في منطقة الضغط المنخفض يمكن أن يحصل تجمد في الأنبوب سيما في أنبوب الامتصاص.

12- تصمم الدعامات البيتونية و توضع عندما يغير الأنبوب اتجاهه و عند القطع الخاصة لتحمل قوة ضغط الماء النابذة الناجمة عن أي تغير في الجريان.

13- حساب التمدد الطولي للأنابيب و اختيار التجهيزات المناسبة – وصلات التمدد -.

14- حساب الإجهادات الطولية المؤثرة على الأنبوب و اختيار التجهيزات المناسبة.

15- تزويد خط الضخ بوسائل الحماية من المطرقة المائية و التأكد من تحمل الأنبوب و التجهيزات للضغط الناتج عن الصدمة.

ملحق 2

أنماط توضع الأنابيب و الاختبارات

- <u>توضع الأنابيب</u>:

تحدد الكودات NF-150/ANSI/AWWA.C150/A12.50، و المواصفة EN 13476 عدة أنماط لتوضع الأنابيب (الفونت المرن DCI, البولي اتيلين PE...)، و أحد هذه الأنماط هو التالي:

- وسادة رمل ناعم- متوسط سماكة دنيا 150 مم حتى الراسم السفلي.

Lower Bedding 100+OD/10 mm, min 150 mm

- طبقة رمل ناعم- متوسط OD/2 من الراسم السفلي للأنبوب حتى الخط الوسطي.

- Upper Bedding OD/2

- ردم أولي رمل خشن- حصى قطر حتى 11 مم, سماكة حتى 300 مم فوق الراسم العلوي

- Primary Backfill (Sand or Gravel up to 11 mm)

- ردم نهائي (تربة حفر نظيفة) , سماكة من 300 إلى 1000 مم فوق الأنبوب.

- Final Backfill (Cleaned excavated soil)

تختلف هذه الأنماط بحسب توضع الأنابيب النسبي في التربة المحيطة في الخندق.

تحقق أنماط التوضع ثلاثة شروط تؤثر على عمق توضع الأنابيب:

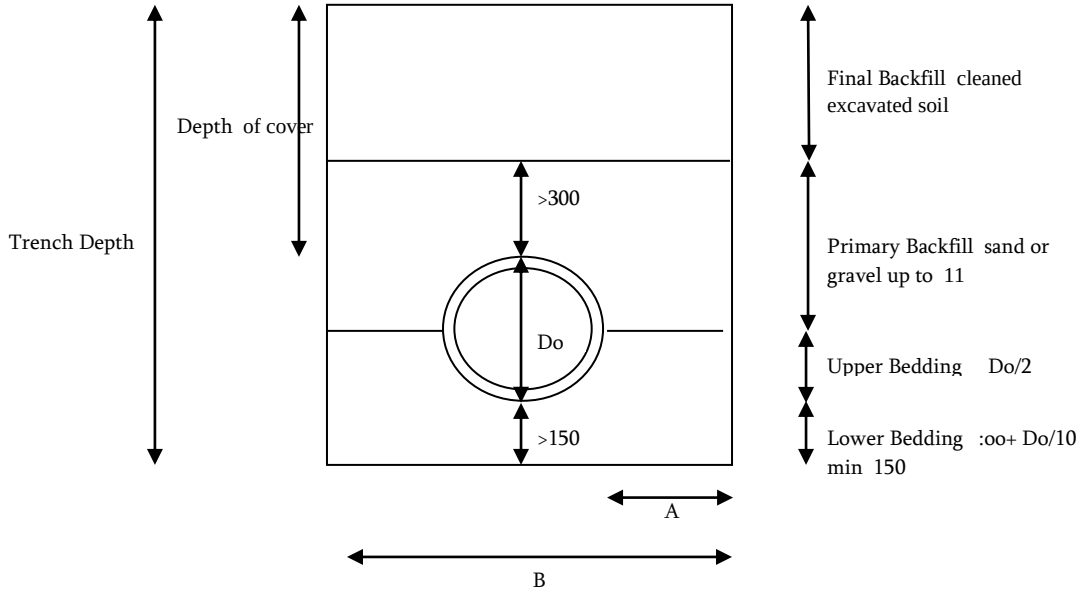
- أن تتحمل الأنابيب الأحمال الحية (roads, railways, motorways,...).
- العمق الأدنى لتجنب التجمد keeping the main frost-free(min. depth of cover)
- متطلبات عمرانية, قانونية, محلية. Regulations

يعتمد عرض الخندق على نوع التربة, عمق توضع الأنابيب, شروط تدعيم التربة.

يعتمد اختيار ودرجة رص التربة المحيطة على العوامل التالية:

- مميزات الأنبوب (صلب, شبه صلب, مرن) the pipe characteristics (rigid, semi rigid, flexible)
- الأحمال the top loading (depth of cover, wheel loads)
- خواص تربة الموقع heterogeneous nature of the ground

إن شروط توضع الأنابيب في التربة تفرض جملة انشائية (الأنبوب- التربة) تتميز بفعل متبادل معقد بين الأنبوب و التربة. و عليه و لغاية الدراسة يتم تبسيط الفعل المتبادل الأنبوب-التربة بتصنيف الدراسة الإنشائية للأنبوب إلى / 3/ فئات.



Trench Configuration

الشكل م 2-1

توضع الأنبوب

- تصنيف الأنابيب إنشائيا:

تصنف الأنابيب إلى / 3/ فئات حسب تفاعل الأنبوب التربة:

- الأنابيب الصلبة Rigid pipes : تتحمل الأنابيب الصلبة تشوه قطري صغير Ovality قبل أن تنهار. هذا التشوه صغير غير كاف لتبدأ التربة الجانبية بالمقاومة بالضغط Passive , يتحمل الأنبوب كامل وزن التربة فوقه.
- الأنابيب المرنة Flexible pipes : تتحمل الأنابيب المرنة تشوه شاقولي كبير قبل أن تنهار. يدعم الردم المحيط بالأنبوب جانبيا وزن التربة فوق الأنبوب.
- الأنابيب شبه الصلبة. Semi-rigid pipes : تتحمل جزء من وزن التربة عن طريق التشوه القطري و تتحمل التربة الجانبية جزء من وزن التربة. تلعب اجهادات العزم Internal bending stress و ضغط التربة الجانبية passive الدور الرئيسي. يتوزع وزن التربة بين مقاومة الأنبوب و مقاومة التربة الجانبية حسب القساوة النسبية.

بسبب تعقيد الفعل المتبادل بين الأنابيب و التربة جرى تقسيم الدراسة الإنشائية إلى فئات.

- تصميم الأنابيب (Steel, DCI, PE, GRP)

- يصمم الأنبوب المضغوط على الضغط الداخلي و هو الأكبر مما يلي:

1- ضغط التشغيل الأعظم max. operating pressure , أو ضغط التصميم design pressure , و هو أكبر ضغط يمكن أن يحصل خلال التشغيل, بما فيه الضغط الناتج عن الأحداث الطارئة, مطرقة مائية.

2- الضغط الهيدروستاتيكي.

3- ضغط اختبار التسرب.

في أغلب الحالات يكون ضغط التشغيل الأعظم هو الضغط التصميمي, هذا الضغط يأخذ بالاعتبار ضغط المطرقة المائية المحسوب على أساس ثبات معامل مرونة مادة الأنبوب.

التصميم الإنشائي للأنبوب: تحدد السماكة الدنيا للأنبوب بحسب ASME B31.3 من العلاقة:

$$t = \frac{pD}{2*(SE + pY)}$$

حيث t(mm)= السماكة الدنيا لجدار الأنبوب. D(mm)= القطر الأنبوب الخارجي.

S(kg/cm^2)= القطر الأنبوب الخارجي. E()= معامل نوعية =1 للأنابيب بدون درزة لحام.

p(kg/cm^2)= ضغط التصميم. Y()= معامل يعتمد على الحرارة=0.4.

يضاف إلى هذه السماكة سماحية التآكل و التصنيع وهي 12.5% بحسب ASTM A106.

اختبار الأنابيب:

اختبار الضغط و التسرب:

بعد تمديد الأنابيب و اجراء ردميات جزئية بين الوصلات يجب تطبيق الاختبار الهيدروستاتيكي التالي عل كل قسم من الخط كما يلي:

- يجب ملئ قسم الخط المراد اختباره بالماء من الجزء المنخفض باتجاه الجزء المرتفع, ببطئ وذلك للسماح للهواء بالخروج من الأنابيب و لتجنب الضغط الزائد, يجب اختبار الخط على ضغط 15 بار بحيث لا يتعارض مع ما ينص عيه نظام ISO 10802 و يتم تطبيق الضغط على الخط بواسطة مضخة يتم وصلها بالأنبوب بطريقة يقبلها المهندس, و يتم تركيب عداد لقياس حجم الماء اللازم و على المتعهد تقديم المضخة و ساعة الضغط و أدوات الوصل بالأنبوب و السكورة و العدادات و كافة الأجهزة و الوصلات و الاكسسورات اللازمة و اليد العاملة و على حسابه.

- يجب طرد كل الهواء بالكامل من الأنابيب و على المتعهد أن يقدم و يركب السكورة اللازمة لطرد الهواء أثناء ملئ الخط بالماء, ثم يطبق ضغط التشغيل لمدة نصف ساعة للتأكد من استقرار الأنابيب في الخندق و امتصاص البطانة للماء.
- يطبق ضغط التجربة المحدد و الذي يأخذ بالاعتبار اضافة إلى ضغط التشغيل الضغوط الديناميكية(مطرقة مائية).
- يجب فحص كافة الأنابيب و القطع الخاصة و السكورة المكشوفة بعناية تامة خلال اجراء الاختبارات في الخندق المفتوح, و أي أنبوب أو قطعة خاصة أو سكر يتم تخريبها أثناء التجربة يجب على المتعهد استبدالها بمواد سليمة معادلة و على نفقة المتعهد يقبلها المهندس المشرف, و عليه ان يعيد التجربة حتى يتم قبولها ممن قبل المهندس, و اذا اختارالمتعهد القيام بردم الخندق بالكامل أو أي جزء منه قبل اجراء الاختبار فان مسؤولية وجود أي تسرب في الخط تقع على عاتقه و عليه القيام بتحديد مكان التسرب و اصلاحه, و على نفقة المتعهد قيمة قطع الوصل و الجوانات التي قدمتها المؤسسة لاصلاح العطل الذي طرأ بسببه بالاضافة إلى ما يتطلبه الأمر من حفريات و استعادة سطوح للاصلاح و مواد أخرى و يد عاملة و آليات.
- يجب الابقاء على ضط التجربة مطبقا لفترة لا تقل عن ساعتين اذا كانت الوصلات مكشوفة و لمدة أربع ساعات اذا كانت الوصلات مردومة.
- يجب ألا يتجاوز طول قسم الخط الخاضع للتجربة عن 500 م و يمكن للادارة زيادة الطول أو انقاصه عن الحد المبين وفقا للضرورة التي يفرضها واقع العمل.
- يعرف التسرب بأنه كمية الماء التي يجب اضافتها إلى جزء الخط الخاضع للتجربة بحيث تحافظ هذه الكمية على ضغط التجربة. اذا تجاوز التسرب القيم المحددة حسب تعليمات ISO 10802 فعلى المتعهد و على نفقته الخاصة أن يحدد موقع العطل و أن يقوم باصلاح الخط بحيث يبقى التسرب ضمن الحدود المسموح بها, و اذا كانت الأنابيب مردومة فعلى المتعهد اعادة الحفرو الاصلاح على نفقته.
- حين وجود أي دعامات بيتونية على طول الخط الخاضع للتجربة فيج عدم اجراء تجربة الضغط إلا بعد مرور 5 أيام على الأقل من صب الدعامات البيتونية.

- يعتمد النظام العالمي ISO 10802 عند رغبة المهندس المشرف أو المتعهد الاطلاع على بعض تفاصيل اختبار الضغط.

التعقيم

يجب اجراء عملية التعقيم و من ثم الغسيل لكافة الخطوط الجديدة المنفذة قبل و ضعها في الخدمة و استثمارها و على المتعهد أن يقدم و يركب كافة الحواجز الانشائية و الصهاريج و الأمابيب و السكورة و القطع الخاصة و السدات و كافة المعدات الأخرى و مواد التعقيم الكيميائية و اليد العاملة و اجراء التحاليل المطلوبة لتعقيم و غسيل الخطوط.

الاجراءات المطلوب تنفيذها:

على المتعهد استخدام إحدى الطرق التالية لإتمام عملية تعقيم الخطوط.

- استعمال محلول هيبوكلوريد الصوديوم (NaOCl) (ماء جافيل) الذي يتواجد بتركيز (2%-8%) مع حساب كمية الجرعة المناسبة لتعقيم الخطوط حسب توجيهات الادارة.
- استعمال محلول محضر من مادة (هيبوكلوريد الكالسيوم) و هي بودرة تركيزها (30%-60%) أو أقراص مصنعة بنفس التركيز و ذلك للحصول على محلول معقم للخطوط بالتركيز المطلوب لتعقيم الخطوط, يعرف هذا المحلول باسم HTH.

أماكن وضع مواد التعقيم: يتم حقن أحد المحلولين السابقين عند بداية الخط المراد تعقيمه أو عند مواقع السكور أو وصلات الخدمة.

كمية مواد التعقيم:

- يجب إدخال الماء إلى الخطوط الرئيسية ببطئ و وضع كمية محلول التعقيم بشكل يتناسب مع كميو الماء الداخلة إلى الأنبوب.
- يجب تحقيق معيار نسبة /50/ جزء في المليون من المادة المعقمة لكمية الماء في الأنابيب المراد تعقيمها.
- يجب أخذ عينات لتحليل مياه الأنابيب المراد تعقيمها بعد مرور /3/ ساعات أو أكثر على إضافة محلول التعقيم و يجب أخذ العينات من أطراف الخط لتحقيق شرط نجاح تعقيم الخط بالكشف عن وجود شاردة الكلور الحر المتبقي بتركيز لا يقل عن /35/ جزء في المليون و

في حال انخفاض تركيز شاردة الكلور الحر عن /25/ جزء في المليون, يجب تجفيف الخط و إغادة التعقيم مرة ثانية على أن يتم تحليل العينة من مخبر معتمد من قبل المؤسسة أصولا.

- تقع مسؤولية التخلص من الماء المستخدم في عمليات التعقيم على عاتق المتعهد.

غسل الخطوط:

بعد اجراء تحليل تعقيم الخط و نجاحه و قبوله من قبل الادارة, على المتعهد قبل وضع الخط في الاستثمار أن يقوم بوصل الخطوط التي تم تعقيمها بالمصدر المائي الذي تحدده الادارة, ومن ثم تؤخذ عينات من حنفيات موضوعة على الخط لهذه الغاية و خالية من التلوث الخارجي لاجراء التحاليل المخبرية و التأكد من مطابقة مواصفات هذه المياه لمواصفات المصدر المائي و يستمر ذلك لمدة يومين كاملين على الأقل على أن يتم قطف عينة للكشف عن نجاح عملية غسل الخطوط, مع اصدار تقرير غسيل الخط من مخبر معتمد من قبل الادارة يبين عدم وجود تركيز أكبر من 5 ppm على أن تبقى هذه الخطوط مرتبطة بشكل دائم مع المصدر المائي الذي حددته الادارة و الذي يسمح بترك أجزاء من الشبكة دون ربط.

ملحق 3

الأنابيب المستخدمة في مشاريع مياه الشرب

مقدمة:

يكمن العديد من الفوائد في استخدام الأنابيب لنقل المياه في مشاريع نقل و توزيع المياه. و بشكل أساسي إن أنظمة الأنابيب المضغوطة هي أنظمة مؤتمتة لبث و إجراء تعليمات دقيقة. و حيث أنه ليس من الضروري أن تساير الأنابيب خطوط الكونتور، فمن الممكن ان توضع باستقامات تخفض الأعمال وأن تصعد و تنزل الهضاب . باستخدام المضخات ومحطات الرفع تنقل الأنابيب المياه إلى ارتفاع أعلى.

حيث انه من الصعب إجراء تعديلات بعد تركيب الأنابيب، فإنه على المصمم أن يولي اهتماما كبيرا لمسألة اختيار نوع الأنابيب، الأقطار و المواد ليضمن ان هذا الاختيار مقبول فنيا و اقتصاديا وليس محدودا مستقبلا. فيما يلي معلومات عامة عن أنواع الأنابيب، المواد المستخدمة و بعض الإعتبارات التصميمية. لا يتضمن هذا العرض الخصائص الرئيسية (القطر الإسمي، السماكة، الوزن، ضغط التشغيل ,الضغوط الحدية).

مواد الأنابيب و اعتبارات تصميمية :

مع بدء استثمار الأنابيب لنقل مياه الشرب , تطور العديد من المواد في الصناعة. لكل نوع من مواد الأنابيب خواصه. على المهندس ان يدرس هذه الخواص ليتأكد من أن نوع الأنابيب الذي اختاره يناسب خصوصي المشروع. إن النوع الخاطئ من الأنابيب يمكن أن يسبب زيادة في كلفة الإنشاء , نقص في عمر المنظومة , صيانة سنوية مرتفعة , مصروف طاقة أعلى ,أو أن يؤدي إلى منظومة لا تعمل بشكل جيد.

تتضمن خصائص الأنابيب مايلي:

- مادة الأنبوب وقدرة تحملها.
- القطر الإسمي، وهو القطر المستخدم في الحسابات الهيدروليكية.
- طول الأنبوب، الذي يحدد عدد الوصلات لكل km من الخط.
- سماكة النبوب، الذي بحدد الضاغط الأعظمي للتشغيل.

- أنواع الوصلات.

يستخدم في مشاريع مياه الشرب خمسة أنواع من الأنابيب:

1- أنابيب من الفونت المرن

2- أنابيب فولاذية

3- أنابيب من البولي إيتلين

4- أنابيب من GRP

5- أنابيب بيتونية

حديد الصب :CAST IRON

تنتج أنابيب حديد الصب بإخضاع حديد الصب السائل لقوة نابذة في قوالب اسطوانية (SHELLS). تعرض الأنابيب للنار للحصول على بنية متجانسة . تغلف الأنابيب , من الخارج, بطبقة توتياء رقيقة ثم دهان بيتوميني.عندما تستخدم الأنابيب في تررب تحوي مواد ضارة , تغلف بالبولي ايتيلين. ثم تغلف من الداخل بملاط اسمنتي ,بسماكة (3-6 مم) , بالقوة النابذة و ذلك لخفيض الخشونة وزيادة مقاومة الأنابيب للمياه الضارة. تتوفر أنابيب حديد الصب بأقطار (من 60 وحتى 700 مم) ,ويمكن أن تصنع أنابيب بأقطار أكبر عند الطلب. تتراوح السماكة(من 6 الى 10.8 مم) اعتمادا على الضاغط الإسمي و القطر. طول الأنبوب 6 م . توصل الأنابيب ببعضها بوصلة جرس و ذيل مع جوان حلقي مطاطي للكتامة . وبشكل أقل تستخدم وصلات الفلنجة حيث إضافة الى كونها أغلى لا تسمح بانحراف بالاتجاه الشاقولي أو ضمن المستوي، و بالمقابل تعتبر وصلات الفلنجة أفضل للأنظمة التي تحوي عدد كبير من القطع الخاصة.

الفولاذ :STEEL

تنتج أنابيب الفولاذ بعملية (لف – صقل) خاصة تسمى طريقة " MANNESMANN ".يصنع الأنبوب من اللف على الساخن لقضيب فواذي بدون لحام. و تصنع الأنابيب الفولاذية أيضا من صفائح فولاذ كبيرة تلحم على طول المولد أو بشكل حلزوني. و توجد طرق أخرى، التصلب الحلزوني, تستخدم لإنتاج أنابيب فولاذية بأقطار كبيرة جدا(2500-3000 مم). تتوفر الأنابيب الفولاذية بأقطار (40-3000 مم). تتراوح السماكة من 2.6 مم لأقطار 40 مم (ضاغط اسمي أعظمي 14.5 Mpa) و حتى 8.8 مم لأقطار 900 مم (ضاغط أعظمي 3.7 Mpa). يجب

زيادة سماكة الأنابيب التي تعمل في ظروف الضغط العالي. أطوال الأنابيب من 8 و حتى 13.5 م. توصل الأنابيب بوصلة جرس و ذيل وبوصلة فلنجة. و بسبب تطور اللحام الكهربائي, أصبحي الوصلات الملحومة الأكثر انتشارا للأنابيب الفولاذية. تستخدم وصلة جرس و ذيل للأنابيب المطمورة, بينما وصلات الفلنجة واللحام للانابيب المكشوفة و في الأنظمة ذات القطع الخاصة الكثيرة. أنابيب حديد الصب أكثر سماكة من أنابيب الفولاذ مع تساوي الأقطار و الضواغط,مما يجعل أنابيب حديد الصب مناسبة للترب الحاوية على مياه ضارة و حيث يتوقع حدوث تآكل كهراليتي. بينما أنابيب الفولاذ أكثر صلابة و أقل هشاشة, مما يخفض قابلية الإنكسار. تساعد قوة الشد النوعي العالية على إنتاج أنابيب بسماكة أقل , لذلك هي خفيفة وأسهل نقلا وأرخص مقارنة بحديد الصب. تناسب أنابيب الفولاذ الترب غير المستقرة , لأنها تتحمل حركة التربة . وهي أطول مما يقلل عدد الوصلات لكل 1 كم.الاختيار بين الفولاذ و حديد الصب ليس سهلا.تناسب أنابيب الفولاذ الأنظمة المكشوفة , و يفضل حديد الصب للأنظمة المطمورة, بفضل مقاومته للتآكل الكهرليتي, و عندما تتطلب المنظومة عدد كبير من التقاطعات لتغيير المجرى و في حالة وجود عدد كبير من القطع الخاصة و الأجهزة. و فيما يتعلق بمواد الحماية الداخلية, فإن طبقات كثيفة من البيتومين تضمن حماية داخلية لأنابيب الفولاذ من المياه الضارة. وقد تم الحصول على نتائج جيدة باستخدام الدهان. و تكون الحماية الخارجية بطبقات من البيتومين , الصوف الزجاجي , البولي ايتيلين. عند استخدام وصلات اللحام فإن الحرارة تخرب الحماية الداخلية و الخارجية قرب الوصلات, و هذه سلبية لأنابيب الفولاذ لأنه إن كانت الحماية الخارجية ممكنة الإستبدال فإن استبدال الحماية الداخلية مستحيلا تقريبا.

بعض مزايا أنابيب الفولاذ:

- تحمل الضغوط العالية و الديناميكية و مقاومة جيدة للصدمات
- مقاومة الصدأ والتآكل جيدة , إذا استعملت الحماية الخارجية المناسبة
- القطع الخاصة متوفرة من نفس المادة
- المرونة و الديمومة عالية
- الصلاحية لمياه الشرب جيدة.
- تركيب متواصل محكم الإغلاق طوليا مما يخفف التسرب.
- ادارة سهلة بسبب قلة الصيانة و الاستبدال.
- تجربة عالمية واسعة و إمكانية الحصول عليها بسهولة.

السلبية الرئيسية لأنابيب الفولاذ ضرورة حمايته من التآكل الكهرليتي و الحماية المهبطية.

أنابيب البلاستيك : PLASTIC PIPES

ظهر في السنوات العشرين السابقة طيف واسع من المواد البلاستيكية، المشكلة من الجزيئات الضخمة للمركبات الكربونية، مثل البوليستيرول، بولي ايتيلين، بولي بروبيلين، بولي فينيل كلورايد. تصنع هذه المواد من الصمغ البلاستيكي الحراري الذي يغلف طور ليفي مستمر أوغير مستمر.و الأكثر استخداما من هذه المواد لإنتاج الأنابيب هي (PVC), (PE), (GFRP). تعتمد تقنية إنتاج هذه المواد على تفاعل كيميائي، يسرع بعامل, ينتج بنية جزيئية ماكروية‌من الذرات الكربونية(بلمرة). على سبيل المثال يتم الحصول على PE ببلمرة الايتيلين. تكون البوليمرات النقية بودرة أو حبيبات.تمزج هذه الالبوليمرات مع مركبات إضافية لتصبح بلاستيكية. يسخن المزيج الناتج ويشكل لينتج أنابيب , ثم يبرد الأنبوب بالماء.

تختلف خواص الأنابيب البلاستيكية كثيرا عن الأنابيب البيتونية و الفولاذية فيما يتعلق بالكثافة، المرونة، المقاومة وعامل التمدد الحراري. أفضل مزايا الأنابيب البلاستيكية هي مقاومتها للتآكل (الذي تسببه الأحماض، القلويات، السوائل العضوية) ,خمولتها الكيميائية، معامل الخشونة المنخفض، خفتها، سهولة نقلها و تركيبها.يمكن تركيبها في الترب المنتفخة القابلة للهبوط.

: PVC

بفضل خواصها المتميزة , فقد لاقت أنابيب PVC قبولا كبيرا في السنوات الأخيرة. حتى وقت قريب توفرت هذه الأنابيب بأقطار (150 – 375 مم) وكانت تناسب تطبيقات ذات ضواغط منخفضة(15- 30 م). بفضل تطور تقنية الإنتاج، تنتج انابيب PVC لتطبيقات بضواغط عالية (56- 70 م) و بأقطار (40 – 675 مم) تتوفر هذه الأنابيب بأطوال (6 – 12 م). يتم وصل الأنابيب بوصلة جرس وذيل مع جوان مطاطي للكتامة.في بعض الحالات يستخدم اللحام لزيادة كتامة وصلة الجرس ذيل.

حيث أن أنابيب PVC تملك لدونة عالية, يجب الانتباه أثناء الردم فوق الأنابيب و ذلك لتجنب الإنحرافات و التشوهات الزائدة لهذه الأنابيب. أنابيب PVC حساسة للعوامل الجوية, ينصح عند تركيبهامكشوفة بحمايتها بغطاء خارجي. في هذه الحالة تفضل أنابيب PVC الملونة لحمايتها الخارجية بالكاربون الأسود.

: PE

تستخدم أنابيب PE على نطاق واسع بسبب مزاياها(الخفة، قابلية التعامل، السعر المنخفض، اللدونة، خمولها الكيميائي، مقاومتها للعوامل الجوية). تقدم إضافة الكربون الأسود الحماية من الأشعة الشمسية. أنابيب PE أغلى من PVC ولكنها أكثر لدونة و لذلك استخدمت على نطاق واسع. تتوفر الأقطار الصغيرة بشكل لفات، يسهل التعامل و التركيب.

تنتج أنابيب PE بكثافة منخفضة (LDPE) و بكثافة عالية (HDPE). للأنابيب منخفضة الكثافة سماكة أكبر و لكنها أكثر مرونة و قابلية للعمل. الأنابيب عالية الكثافة أخف وزنا و بالتالي أقل كلفة.تتوفر أنابيب

(PE) بأقطار حتى 1200 مم وأكثر عند الطلب.تتغير سماكة الجدار طبقا لصف الضواغط (PN2.5,PN4,PN6,PN10,PN16) . تنتج هذه الأنابيب بأطوال 6 أو 12 م . يتم وصل الأنابيب باللحام أو ميكانيكيا. ويعتبر اللحام الكهربائي بديلا عن اللحام بالتسخين, حيث تستخدم قطعة وصل من البولي ايتيلين عالية الكثافة لوصل الأنابيب.تملك قطعة الوصل وشيعة كهربائية تقدم الحرارة اللازمة لصهر القطع الثلاث.

تصنع أنابيب (HDPE) احيث لا تسبب لمياه الشرب الطعم أو الرائحة أو اللون، و المادة الأساسية هي الأوليفينات العالية 10% و الأيتيلين 90% الذي يتحول إلى متعدد الايتيلين بالبمرة. تضاف مضادات أكسدة حسب المواصفات العالمية, و الأصبغة المطابقة لتلك التي تدخل في تصنيع المواد اللدائنية الملامسة للأغذية.عامل مانينغ n=0.01.

بعض مزايا PE:

- النعومة الهيدروليكية، ما يخفض فاقد الضاغط.
- مقاومة للصدأ و المواد الكيميائية.
- سهولة الصيانة و الاستثمار و الاصلاح.
- الديمومة الجيدة.
- الوزن الخفيف ما يسهلل النقل و التركيب.
- كتامة الوصلات.

GWRP البوليسترالمسلح بالصوف الزجاجي :

تصنع هذه المادة بإضافة الألياف الزجاجية إلى مزيج بلاستيكي. تنتج هذه الطريقة أنابيب بمقاومة ميكانيكية أكبر من أنابيب البلاستيك الأخرى. تغطى أنابيب GWRP من الخارج بطبقة من الرمل

السيليسي لحمايتها من الأشعة فوق البنفسجية.تنتج هذه الأنابيب بأطوال 6 و 12 م و أقطار حتى 2000 مم. توصل الأنابيب بنفس الولات المستخدمة للأنابيب البلاستيكية.

الألياف الزجاجية:GLASS FIBER

تستخدم بشكل واسع في الشبكات الكبيرة التي تحتاج أقطار كبيرة. لاتستخدم هذه الأنابيب في الشبكات الصغيرة بسبب تكلفتها العالية نسبيا للأقطار الصغيرة.أنابيب GF أخف من الأنابيب المصنعة من المواد الأخرى و لكن ندرة قطعها الخاصة تحد من استخدامها. لذلك تفضل أنابيب PE و PVC من أجل الأقطار المتوسطة و الصغيرة.

بعض مزايا GRP:

- ناعمة هيدروليكيا n=0.009 ما يخفف تكاليف الضخ.
- مقاومة عالية للمواد الكيميائية و العوامل الجوية التي تسبب التآكل و الحت.
- الوزن منخفض ما يسهل عمليات النقل و التركيب.
- التكاليف منخفضة نسبيا لأقطار الكبيرة.
- سهولة الاستثمار و الصيانة.
- كتامة الوصلات و مرونتها، الهبوط.الصغير لا يسبب التسريب.

بغض مساوئ GRP:

- مشاكل التسريب بسبب صعوبة ضبط الجودة خلال االتصنيع و التركيب.
- كل وصلة تحتاج إلى جوانين و قطعة وصل.
- متانة قليلة على الأحمال الخارجية و الضغوط الداخلية العالية.
- يتطلب تركيبها فرش مناسب تحتها و ردم مناسب فوقها.
-

أنابيب الفونت المرن :

تصنع هذه الأقطار من الفونت المرن مع إضافة مادة المغنيزيوم لإعطاء القساطل الخاصية المرنة وتستعمل في جميع أنحاء العالم بشكل كبير لمشاريع مياه الشرب وغيرها من الأقطار 60وحتى 2000مم ويمكن تصنيعها بشكل خاص لأقطار أكبر من ذلك وتبطن من الداخل بمونة إسمنتية للحماية من الصدأ ومن الخارج بالزنك والبيتومين للحماية من تأثير الردم ويوجد عدة طرق للوصل أما القطع الخاصة فهي متوفرة بأقطار نظامية.عامل مانينغN=0.015.

يستخدم الفونت المرن بشكل واسع في الخطوط الناقلة وشبكات توزيع المياه حيث يتوفر تاريخ طويل عن استخدامه وكفاءته .إن محتوى الكربون وتوزعه بشكل كروي منتظم يعطيها خصائصها الميكانيكية المحددة مثل قوة الشد العالية ,مقاومة الصدمات والليونة العالية .إن هذا النوع من القساطل يعمل بشكل جيد في حالة التربة غير المستقرة إو المؤكسد .

إن القساطل المصنفة K9 تتحمل ضغط تشغيلي آمن يتراوح بين 10-40 بار.

الأقطار من 60 -200 مم.يمكن وصل الأنابيب مع بعضها البعض بالطرق العادية (SOCKET SPIGOT,)أو عن طريق FLANGED JOINT

الطول القياسي هو6م مما يجعل التعامل بها سهل.

إن طريقة تركيب هذا النوع تسمح بدرجات إنحراف تصل إلى 2 درجة للأقطار الكبيرة إلى 4 درجات للأقطار الصغيرة بهذا القدر من درجات الإنحراف المسموحة يمكن أن تستوعب الهبوط في التربة المحلية ,إلا أن طريقة وصل القساطل القياسية لاتقاوم الحركة الناتجة عن الدفع الستاتيكي أو الديناميكي ولذلك لابد من توفر دعمات خرسانية (بيتونية) على الأكواع والتفرعات.

يمكن استخدام البولي ايتلين لتغليف القساطل لتوفير حماية إضافية في التربة السيئة

المزايا

- تحمل الضغوط العالية و الديناميكية و مقاومة جيدة للصدمات
- مقاومة الصدأ والتآكل جيدة , إذا استعملت الحماية الخارجية المناسبة
- القطع الخاصة متوفرة من نفس المادة
- المرونة و الديمومة عالية
- الصلاحية لمياه الشرب جيدة.
- تركيب متواصل محكم الإغلاق طوليا مما يخفف التسرب.
- ادارة سهلة بسبب سهولة التركيب و قلة الصيانة و الاستبدال.
- تجربة عالمية واسعة و إمكانية الحصول عليها بسهولة.
- مقاومة للتآكل الكهرليتي و التيارات الشاردة لوجود الجوانات، أما في الترب التي تسبب تآكل شديد يجب تأمين حماية مهبطية.

البيتون :CONCRETE

تقسم أنابيب البيتون الى أنابيب مسبقة الصنع و أنابيب مصبوبة في المكان(MONOLITHIC). يمكن تسليح الأنابيب مسبقة الصنع. تستخدم الأنابيب البيتونية غير المسلحة لنقل المياه في الضغوط المنخفضة. تناسب أنابيب البيتون المسلحة الضغوط الهيدروليكية العالية. يتراوح الضغط الداخلي الذي يصمم عليه الأنابيب (7.5-37.5 م). تعتبر الأنابيب البيتونية جيدة في حالة الأحمال الخارجية من التربة فوق الأنابيب. تتغير سماكة الجدار و نوع التسليح طبقا للضاغط الهيدروليكي و الحمولات الخارجية. يمكن للتسليح أن يكون على طبقة واحدة أو طبقتين، بشكل دائري أوإهليلجي. وبفضل طرق التصنيع الحديثة، يمكن هز البيتون، تكثيفه، و ضغطه للحصول على مادة عالية الكثافة، كتيمة، تقاوم التسرب.

أنابيب البيتون المسلح بالانتثار، هي إبداع حديث. يملك هذا النوغ من الأنابيب تسليح عرضي و طولي من عدد كبير من أسلاك الفولاذ تعطي مقاومة عالية على الشد. يمكن بمقاومة مميزة عالية للأنابيب تخفيض سماكة الجدران.تتوفر أنابيب البيتون المسلح بالانتثار بأقطار (400 – 1400 مم) بضاغط اسمي (1.5 – 2 Mpa), بينما تنتج أنابيب البيتون المسلح ذات التسليح العادي بأقطار(600 – 2700 مم). تتراوح أطوال أنابيب البيتون المسلح (2.4 – 3.6 م). توصل هذه الأنابيبمعا بوصلة جرس و ذيل مع استخدام جوان مطاطي للكتامة. تستخدم الأنابيب المصبوبة في المكان للأنظمة ذات الضواغط المنخفضة وللأقطار الكبيرة. يصنع هذا النوع من الأنابيب بصب البيتون في كفراح معدني يجهز للحصمل على سماكة جدار معينة, ويفك الكفراج بعد الوصول الى مستوى كافي من المتانة. نتيجة العملية السابقة هي أنبوب مستمر بدون وصلات عدا وصلات التمدد.هذا النوع من الأنابيب غير مناسب للترب المنتفخة حيث تظهر العديد من الشقوق نتيجة حركة التربة.

النوع الثالث من أنابيب البيتون هو الأنابيب البيتونية مستمرة التسليح., والتي تسمى أيضا الأنابيب ذات التسليح الاسطواني او أنابيب "BONNA ".تصنع من اسطوانة فولاذية يلف عليها أسلاك فولاذية, تغطى الاسطوانة على الوجهين بالمونة الإسمنتية. نتيجة هذه المعالجة هي أنبوب بيتوني بسليح مستمر(الإسوانة الفولاذية). توصل الأنابيب بوصلة جرس وذيل مع جوان مطاطي للكتامة. إضافة إلى ان تكتيم الأنابيب باللحام ممكن.تتوفر هذه الأتابيب بطول 12 م وأقطار(300 – 1350 مم) و ضواغط(70 –350 م). تساعد هذه الأنابيب على نقل مياه ذات نوعية منخفضة حيث تقدم الحماية الداخلية و الخارجية وسط قلوي يساعد في مقاومة تآكل الأسطوانة.

أي كانت طريقة الصنع، يجب أن تولى عناية خاصة لاختيار نوع الإسمنت، عياره، نسبة الماء إلى الإسمنت، و نوع الخلطة المطلوب الحصول عليها. الغاية النهائية هي الحصول على مادة تتمتع بالكتامة. الأنابيب البيتونية ثقيلة قياسا بأنابيب الفولاذ و حديد الصب، و هذا يؤثر في تكاليف التركيب لأنه يقل عدد الأنابيب المركبة يوميا بسبب تجهيزات الإنشاء المطلوبة.

عامل مانينغ n=0.015.

بعض مزايا الأنابيب البيتونية:

- مقاومة للعوامل الجوية و التآكل.
- مقاومة الأحمال الخارجية.
- سهولة التصنيع و امكانية توفره خاصة للأقطار الكبيرة.
- السعر المنخفض للأقطار الكبيرة.

بعض مساوئ الأنابيب البيتونية:

- الوزن الكبير يجعل عملية التحميل النقل التنزيل التركيب صعبا.
- الطول القصير للأنابيب يزيد عدد الوصلات و امكانية التسرب.
- بسبب صعوبة التركيب و ضعف كتامة الوصلات مما يتيح التسرب.
- صعوبة اجراء التغطية الخارجية و التبطين الداخلي.
- صعوبة عمليات الصيانة و الاستثمار و ضعف المقاومة للعناصر و العوامل الكيميائية.
- لا يستخدم للضغوط العالية.

ملحق 4

دعامات الارساء (كتل التثبيت)

ANCHORING ABUTMENTS

تصمم كتل التثبيت لنقل القوة التي تؤثر على الأنابيب، من ضغط الماء، وزن الماء و الأنبوب، وزن التربة، إلى التربة.

كتل التثبيت نوعين: دعامات التحمل (BEARING) و دعامات الثقالة (GRAVITY).

- دعامات التحمل تستعمل عندما تكون التربة قادرة على تحمل الدفع الجانبي.
- دعامات الثقالة تستعمل عندما لا تكون التربة قادرة على تحمل الدفع الجانبي، في هذه الحالة يقاوم الدفع الناتج عن ضغط الماء على الأنبوب بالاحتكاك بين دعامات الارساء و التربة التي تحملها.

1- **حساب قوة الدفع**:

إن النقاط المميزة التي تحتاج إلى دعامات ارساء هي:

الأكواع(تغير اتجاه الأنابيب)، سدات(نقاط طرفية لأنبوب)، تيهات(تفرعات)، تضيق (نقاصات)، سكورة.

تعطى العلاقات لحساب قوة الدفع كمايلي:

حالة نهاية أنبوب و حالة تفريغ -1- $P=p*\pi/4*D^2$

حالة كوع -2- $R=2*P*\sin(\alpha/2)$

حالة تناقص قطر -3- $P=p*\pi/4*(D_2^2-D_1^2)$

حيث P(kg) : قوة الدفع ، R (kg) : محصلة قوة الدفع، D (cm) : القطر الخارجي للأنبوب

D_1 (cm) : القطر الخارجي للأنبوب الأصغر، D_2 (cm) : القطر الخارجي للأنبوب الأكبر

p (Pa) : ضغط التجربة في الأنبوب، () α : زاوية الكوع

2- **حساب دعامات التحمل**:

يجب أن يكون رد فعل التربة مساويا و معاكسا لقوة الدفع الناتجة عن الضغط الداخلي للأنبوب لتحقيق التوازن.

يعطى رد فعل التربة S من نظرية رانكين بالمعادلة:

$$S=1/2\ \omega(H^2-H_1^2)LK+2C(H-H_1)L(K)^{1/2} \quad -4-$$

حيث S (kg) : رد فعل التربة الجانبي، (ω (kg/m^3): الوزن النوعي للتربة، H (m) : عمق الحفر لتركيب الأنبوب
H_1 (m) : عمق الردم فوق دعامة التحمل، L (m) : عرض وجه الدعامة، C (kg/cm^2) : تماسك التربة
$K= tg^2(45+\Phi/2)$: عامل رانكين، Φ () : زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة

3- حساب دعامات الثقالة:

في هذه الحالة رد فعل التربة الأعظمي المتوفر تابع للاحتكاك بين التربة و الدعامة البيتونية.

يحسب رد فعل التربة المتوفر من العلاقة:

$$R_1=P_p*a \qquad -5-$$

حيث R_1 (kg): رد فعل التربة الاحتكاكي، P_p (kg): وزن دعامة الارساء، $a=0.9tg(\Phi)$: عامل الاحتكاك.

4- تصميم دعامات الارساء:

بعد حساب القوة P أو R_1 تحسب أبعاد الدعامة كما يلي:

$$P< (S+R_1) /F \qquad -6-$$

حيث P (kg): قوة الدفع، S (kg): رد فعل التربة، R_1 (kg): رد فعل التربة الاحتكاكي، F=1.5: عامل امان.

في هذه الحالة تقاوم التربة بمجموع رد فعل التربة و بالاحتكاك.

5- دعامات الاحتكاك:

بعد حساب القوة P أو R_1 تحسب أبعاد الدعامة بتحقيق الشرط:

$$P< (R_1) /F \qquad -7-$$

من الضروري أيضا تحقيق التوازن على التربة بالمعادلة:

$$\sigma=P_p/(h*L)*(1+6e/h) < \sigma_s \qquad -8-$$

حيث σ (kg/cm^2): الإجهاد المطبق على التربة ، h (cm): طول الدعامة ، L (cm): عرض الدعامة
$e=\Sigma M/P_p$: لامركزية محصلة القوى المطبقة على الدعامة،ΣM (kg*cm): مجموع العزوم بالنسبة إلى محور الدعامة
σ_s (kg/cm^2): تحمل التربة

6- حساب انشاء دعامات الارساء:

تنظم جداول لحساب قوة الدفع P من أجل ضغط 1 بار كتابع لقطر الأنبوب DN و طبيعة النقطة التي تحتاج دعامة. تحسب قوة الدفع بضرب القيمة الجدولية بقيمة الضغط المطبق(بار)، وبعامل أمان.

تختار أبعاد الدعامة و يتم التحقق على المتراجحة -2- فإذا تبين ان هذه المتراجحة غير محققة يجب زيادة كتلة الدعامة (توجد جداول جاهزة لحساب أبعاد الدعامة) أو زيادة قيمة قيمة H.

بعد اختيار أبعاد الدعامة يجب أن تركز الدعامة مركزيا بالنسبة للأنبوب بحيث تبقى متوازنة و لا تميل و هناك حالتان:

حالة -1-

$(H-2+D/2) < h/2$ -9-

و في هذه الحالة يجب زيادة H بالمقدار $X=h/2-(H-2+D/2)$

حالة -2-

$(H-2+D/2) > h/2$ -10-

و في هذه الحالة يجب إضافة الخرسانة فوق دعامة الارساء بالقيمة $X=h/2-(H-2+D/2)$

ملحق 5

التزويد المتقطع

- مقدمة:

التزويد المتقطع هو تقديم مياه الشرب من شبكة التزويد بماء الشرب للمستهلكين لفترة أقل من 24 ساعة. حالة الخدمة هذه منتشرة في دول العالم الثالث و قليلا ما تصادف في الدول المتطورة. في حالة التزويد المتقطع يضمن المستهلكون تزويدهم بمياه الشرب بتخزين الماء في خزانات أرضية أو على السقوف، التي تملأ في وقت التزويد. و يفرض التزويد المتقطع في حال النقص في كمية الماء و في حال عدم قدرة الشبكة على تزويد السحوبات المطلوبة و عند تعرض الشبكة إلى أعطال و توقف عن الخدمة.

- المصادر المائية:

يمكن التعبير عن الضغوط التي تتعرض لها المصادر المائية بمؤشر إجهاد الماء، الذي يقيس نسبة كمية الماء المسحوبة من المصدر إلى كمية الماء المتجددة في المصادر. و حيث أن جزأ كبيرا من المناطق كثيفة السكان تعني من قيم عالية للمؤشر، و لذلك من الضروري تطوير طريقة إدارة مناسبة لإدارة المصادر المائية بكفاءة و بفاعلية. و للتغيرات المناخية أثر على التزويد المتقطع من خلال تأثيرها على أنماط الطقس مثل نقص معدل الهطول أو الجفاف الطويل، و يمكن أن تكون هذه التغيرات شديدة لدرجة تجبر الإدارة على نقل الماء من أماكن بعيدة بالصهاريج، و لذلك على المهندسين أخذ عامل المناخ بالاعتبار عند التخطيط المستقبلي. و تبدو آثار تغير المناخ على التزويد بالماء على المستوى العالمي. و بسبب هذه الضغوط على المصادر تلجأ إدارة التزويد بالماء إلى التزويد المتقطع. و لهذا تلجأ إدارة التزويد في فترات الجفاف إلى فرض قيود على استهلاك الماء المنزلي و في الزراعة، و بنفس الوقت تعمل على إنشاء محطات معالجة لمعالجة ماء الصرف المنزلي للاستخدام الزراعي، ويمكن أن يتم إنشاء محطات التحلية لإنتاج ماء للاستخدام المنزلي. و في أغلب الأحيان تلجأ الإدارة إلى إدارة شبكات التزويد بفاعلية لخفض الضياعات.

- المساهمة في خفض الضياعات:

يعد تخفيض الضياعات من شبكة التوزيع أمر بالغ الأهمية، و يجب أن ينظر إلى التحكم بالفعال بالضياعات كأولوية قصوى لتحسين التزويد بمياه الشرب. على متخذي القرار على كافة المستويات في الإدارة أن يفهموا أن أي إستراتيجية للتحكم بفاقد الماء لكي تكون فعالة هي نشاط مستمر طويل الأمد و يجب أن تكون جزأ من رؤية الإدارة. إن نجاح هذه الإستراتيجية يعتمد بشكل كبير على تعهد و إخلاص على كل المستويات في الإدارة، و على تبني الاستراتيجيات و التقنيات المناسبة. و تعتبر الإستراتيجية ناجحة عندما تبقي شبكة التوزيع في حالة عمل مناسبة محددة، و تنقص الضياعات إلى مستوى اقتصادي مقبول، و تقدم المستوى المطلوب من الخدمة لكل المستهلكين.

- تأثير التزويد المتقطع:

بغض النظر عن المشاكل و العوامل التي تفرض التزويد المتقطع، لا يشكل التزويد المتقطع إستراتيجية كفؤة و فعالة لإدارة التزويد بالماء. يمكن أن يعتبر التزويد المتقطع كاستجابة قصير الأمد في حالات نقص الماء، لكنه له آثار جانبية سلبية على تكاملية شبكة التوزيع و يمكن اختيار استراتيجيات أخرى اعتمادا على حالات دراسية. في الحالة العامة لا يوجد مؤشرات على مدى الفترة الزمنية لاعتماد هذه الإستراتيجية. و للشروط الهيدرولوجية تأثير سلبي في حالات على التزويد بالماء و عندها المحافظة على الصادر المحدودة ليست حلا طويل الأمد، و لكن من الضروري أن يضاف إلى الموازنة المائية مصادر مياه جديدة غير تقليدية. لقد تم التغلب على نقص الماء في العديد من الدول بتحلية الماء شبه المالح أو المالح. و بالطبع إن اكتشاف كل مصادر المياه المتوفرة الممكنة هو الحل الوحيد في الكثير من الحالات, و المحافظة على ما هو متوفر هو الحل الأقل تكلفة و الأسرع لضمان وجود الماء عند الحاجة إليه.

أظهر تحليل معطيات بعض الحالات الدراسية ازدياد كبيرا في عدد الأنابيب المكسورة خلال فترات التزويد المتقطع. و أظهرت دراسة مقارنة بين عدد الكسور في الأنابيب الرئيسية قبل و بعد تطبيق إدارة التزويد المتقطع, أن الكسور ازدادت 300%, وفي الوصلات المنزلية 200%. و إضافة إلى الكسور الظاهرة الواردة في التقارير توجد الكثير من الكسور الناتجة عن إفراغ و إملاء الشبكة و التي لم تظهر إلى السطح بسبب قلة الضغط و لم يكن ممكنا تحديد موضعها بأجهزة كشف التسرب. و اعتمادا على حالات دراسية بينت الحسابات أن ازدياد التسرب بسبب التزويد

المتقطع كان بحدود 9% من حجم الماء الداخل للشبكة. و أظهرت معطيات حالات دراسية ازدياد الجريان الليلي الأصغري بعد اعتماد التزويد المتقطع بسبب ازدياد عدد الكسور خلال فترة التزويد المتقطع. من الواجب كشف أماكن هذه الكسور و إصلاحها لإنقاص التسرب إلى ما كان عليه قبل تطبيق التزويد المتقطع.

من الدراسات المذكورة يتبين أن للتزويد المتقطع تأثير سلبي على عمل و أداء شبكة التوزيع, و ضياع المياه التي سبق المحافظة عليها, و شكاوي المستهلكين من تغير غير مرضي في نوعية الماء. إضافة إلى الحوادث الإنشائية في أنابيب الشبكة نتيجة التزويد المتقطع.

- كلف التزويد المتقطع:

تزداد الكلف خلال التزويد المتقطع بسبب زيادة كلف التشغيل من فتح و إغلاق السكور, و زيادة كلف الصيانة لإصلاح الكسور, و تحديد مواقع الكسور, و كمية المياه الضائعة بسبب زيادة الكسور و الأعطال.

ملحق 6

تقنيات متقدمة في التحليل الهيدروليكي

1- تحليل الحرجية Criticality Analysis:

أداة فريدة ومرنة لتقييم منظومة توزيع المياه (شبكة المياه) وتحديد العناصر الأكثر أهمية. إذ تسمح للمهندس بإغلاق سكور لقطع المياه عن أقسام محددة من الشبكة و تحديد أداء الشبكة، مثل قطع المياه عن أقسام أخرى، أو تأثر أحد مؤشرات تقييم المنظومة الهيدروليكية. و يمكن محاكاة قطع المياه عن عدة أقسام من الشبكة لحالة تحليل حرج.

يحوي التحليل عدة مؤشرات لتقييم حالات قطع المياه؛ مثل نقص الغزارة، نقص حجم المياه، انخفاض الضاغط، لكل حالة قطع اعتمادا على نمط تحليل الحرجية و التشغيل. و يعتمد نمط تحليل الحرجية على اما التحليل الهيدروليكي الكامل او الترابط connectivity في المنظومة. و نمط التحليل بناءا على الترابط هو تحديد مؤشر بناءا على الاتصال بالخزان، فإذا كانت عقدة متصلة بخزان، فالمؤشر ايجابي. و نمط التحليل بناءا على التحليل الهيدروليكي (حسب السيناريو) ستاتيكي أو ديناميكي أو نوعي، أو تحليل هيدروليكي مع سحب متغير مع الضاغط.

بعد تحديد الأقسام المراد قطع المياه عنها أو عزلها عن الخدمة، و تحديد نمط التحليل، يقرر المهندس في أي سيناريو سيجري التحليل، و يضع قواعد عمل السكور.

خطوات تحليل الحرجية:

1- تحديد الأنابيب التي يراد اغلاقها أو عزلها.
2- تحديد الأقسام التي انقطع الماء عنها بشكل مباشر لكل حالة إغلاق سكور.
3- تحديد الأقسام التي انقطع الماء عنها نتيجة قطع المياه عن أقسام محددة.
4- إجراء تحليل الحرجية بحسب النمط المطلوب بدءا من نمط تحليل الترابط.
5- إجراء تحليل الحرجية مع التحليل الهيدروليكي، السحب متغير مع الضواغط في العقد.
6- تقييم حالات التحليل المختلفة لمعرفة الأقسام الحرجة من المنظومة و مراجعة التصميم لايجاد الحلول.

2- **تحليل التنظيف** Flushing Analysis:

تستخدم هذه الأداة لتقييم فعالية عملية التنظيف و ذلك بالوصول إلى سرع عالية بما يكفي لتنظيف الأنابيب. يوجد نمطان للتنظيف:1- تقليدي Conventional. 2– أحادي البعد Uni-directional.

خطوات إجراء تحليل التنظيف:

1- اختيار المآخذ التي يتم خلالها جريان ماء التنظيف.
2- وضع بارامترات التحليل مثل:
   a. وضع سرعة هدف 1 m/s.
   b. اختيار تنظيف جميع الأنابيب.
   c. وضع معامل غزارة للفتحات 160 gpm/psi^n.
   d. اختيار الضاغط الأدنى المسموح مثلا 30 psi.
3- اختيار تقنية التنظيف تقليدية أو أحادية البعد.
4- اختيار سيناريو محدد و اجراء تحليل التنظيف.
5- التحقق من سرع التنظيف و من قيم الضواغط.

3- **معايرة داروين** Darwin Calibrator:

المعايرة هي جزء مهم من تطور النمذجة الهيدروليكية و التحليل النوعي. و هي تتعامل مع البارامترين الأكثر استخداما خلال معايرة النموذج: السحب في العقد و خشونة الأنابيب.

و هي تعديل للنموذج المقترح لمنظومة توزيع المياه لتتقارب النتائج الهيدروليكية بشكل أفضل مع نتائج القياسات الحقلية على منظومة التوزيع.

توجد طريقتان للمعايرة، المعايرة اليدوية و المعايرة الأمثلية بالخوارزميات الجينية.

صياغة المعايرة Calibration Formulation:

يصاغ المعاير الأمثلي optimized calibrator و يطور لتسهيل عملية معايرة نموذج منظومة توزيع المياه. و يحصل على البارامترات بتصغير الفرق بين نتائج النمذجة و القيم الحقلية

للضواغط في العقد و الغزارات في الأنابيب. و تعرف المعايرة الأمثلية في منظومات توزيع المياه بأنها مسألة أمثلية لاخطية مع ثلاثة أهداف معايرة مختلفة.

أهداف المعايرة Calibration Objectives:

تقيم جودة الملاءمة goodness-of-fit في نموذج المعايرة بالفرق بين نتائج النموذج و القياسات الحقلية لخط التدرج الهيدروليكي و الغزارة في الأنابيب. و تحسب علامة جودة الملاءمة باستخدام تابع جودة الضاغط الهيدروليكي fitness-point-per-hydraulic head للعقد، و تابع جودة الغزارة fitness-point-per-flow للأنابيب يعرفان من قبل المهندس. و هذا يتيح للمهندس أن يزن تقييم غزارة الأنابيب و ضواغط العقد. يمكن تعريف توابع الملاءمة كالآتي:

الهدف نمط 1: تصغير مجموع مربعات الفرق Minimize the Sum of Difference Squares

الهدف نمط 2: تصغير مجموع الفرق المطلقة Minimize the Sum of Absolute Difference

الهدف نمط 3: تصغير الفرق المطلق الأعظمي Minimize the Max. Absolute Difference

معايير المعايرة Calibration criteria : تستخدم لتقييم الفرق بين نتائج التحليل الهيدروليكي عند كل تعديل و بين القياسات الحقلية. و تتضمن:

1- نوع التوافق Fitness Type: حيث تؤشر القيم المنخفضة للتوافق إلى معايرة أفضل. تتضمن أنواع التوافق:

1-1- تصغير فرق المربعات Minimize Difference Squares : تستخدم المعايرة هذا النوع لتصغير مجموع مربعات الفرق بين البيانات الحقلية و نتائج النمذجة. و نتيجة المعايرة هو التعديل الذي يعطي أصغر قيمة لمجموع مربعات الفرق.

1-2- تصغير القيم المطلقة Min Diff Absolute Values : تستخدم المعايرة هذا النوع لتصغير مجموع القيم المطلقة للفرق بين البيانات الحقلية و نتائج النمذجة. و نتيجة المعايرة هو التعديل الذي يعطي أصغر قيمة لمجموع القيم المطلقة.

1-3- تصغير الفرق الأعظمي Minimize Max. Difference : تستخدم المعايرة هذا النوع لتصغير الفرق الأعظمي بين البيانات الحقلية و نتائج النمذجة. و نتيجة المعايرة هو التعديل الذي يعطي أصغر قيمة للفرق الأعظمي.

2- نقطة توافق الضاغط الغزارة: اعطاء وزن لأهمية الضاغط و الغزارة في المعايرة.
3- نمط وزن الغزارة- اختيار نمط الوزن: خطي، تربيعي، جذر تربيعي، لوغاريتمي، أي طريقة اعطاء الوزن لقيم الغزارة عند المعايرة.

قيود المعايرة Calibration Constraints:

تجري المعايرة الأمثلية بشرط تحقيق نمطين من القيود، قيود المنظومة الهيدروليكي و قيود بارامترات التقييد. قيود المنظومة هي مجموعة معادلات الاستمرار في العقد و معادلات الطاقة في الحلقات. و قيود بارامترات التقييد تضع حدود دنيا و عظمى على خشونة الأنابيب و مضاريب سحوبات العقد.

خطوات اجراء المعايرة:

1- دراسة المعايرة و تتضمن:
   1-1- وضع جدول القياسات الحقلية.
   1-2- وضع مجموعات العناصر المراد معايرتها و تتضمن:
      i. مجموعة الخشونة.
      ii. مجموعة السحوبات.
      iii. عناصر الحالة.
   1-3- وضع معايير المعايرة.
2- اجراء المعايرة اليدوية: و تتضمن التعديل اليدوي للبيانات في مجموعة الخشونة و مجموعة السحوبات و مجموعة عناصر الحالة ضمن مجالات محددة و بقفزات محددة، ثم اجراء التحليل الهيدروليكي و مقارنة النتائج مع القياسات الحقلية، لكل تعديل.
3- أو اجراء المعايرة الأمثلية: باعتماد الخوارزميات الحينية، و تتضمن التعديل الأتوماتيكي للبيانات في مجموعة الخشونة و مجموعة السحوبات و مجموعة عناصر الحالة ضمن مجالات محددة و بقفزات محددة، ثم اجراء التحليل الهيدروليكي و مقارنة النتائج مع القياسات الحقلية بحسب معايير المعايرة، لكل تعديل.

4- حلول المعايرة (نتائج المعايرة): بعد اجراء المعايرة يظهر حل أو أكثر، و لكل حل تظهر القيم المعدلة لعناصر مجموعات المعايرة، و مقارنة للقيمة المعدلة لكل عنصر مع القيمة الأصلية. و تظهر نتائج المحاكات (ضواغط، غزارات) مقابل القيم الحقلية و الفرق بينهما.

4- **تصميم داروين** Darwin Designer:

يساعد تصميم داروين على تصميم منظومة توزيع مياه (pipe layout) و اعادة تأهيل rehabilation منظومة موجودة. يعتمد تصميم داروين على الخوارزميات الجينية لايجاد تصميم أمثلي و حساب الكلفة.

يبدأ تصميم داروين بالدراسة التصميمة. تحوي الدراسة التصميمية البيانات اللازمة لتصميم داروين، و تتضمن الدراسة:

1- وصف الأحداث التي تخدم كأساس للتصميم.
2- مجموعة الأنابيب المراد حساب أقطارها أو اعادة تأهيلها.
3- قيود يجب تحقيقها، تحدد كحدث تصميمي.
4- مجال الأقطار التصميمي أو خيارات اعادة التأهيل.
5- معطيات عن الكلف لتستخدم في حساب الأمثلية.
6- خيارات الخوارزمية الجينية.
7- اجراء الحساب لاختبار التصميم.
8- مناقشة نتائج دراسة التصميم.

جدول الأحداث التصميمي: تفيد أحداث التصميم في تحديد متطلبات التصميم، حيث يجب أن يحقق التصميم أهدافا محددة، و بشكل عام، يجب أن تزود منظومة التوزيع سحوبات محددة، مع اعتبار معايير اداء محددة أو قيود، مثلا قيود الضاغط و الغزارة، و شروط محيطية كمناسيب المياه في الخزانات، وضعية السكور، عمل المضخات، أو شروط طوارئ.

السيناريو: يجب أن يحتوي السيناريو الذي سيتم التصميم فيه على كافة البيانات اللازمة للتصميم و يكون اما سيناريم حالة مستقرة أو سيناريو محاكاة ممتدة زمنيا. ويتضمن البيانات الآتية:

1- البيانات الطبوغرافية.
2- المعطيات الفيزيائية، مثل أقطار الأنابيب، الأطوال، أقطار الخزانات، المناسيب.

3- معطيات الاعدادات الأولية، مثل مناسيب المياه في الخزانات، حالات التحكم بالسكور.

4- معطيات السحوب.

الشروط المحيطية: تحدد الشروط المحيطية في كل حدث تصميمي، ويمكن أن تكون كتعديل على الاعدادات الأولية. و الشروط المحيطية كمناسيب المياه في الخزانات، وضعية السكور، عمل المضخات، تفيد في مرونة تصميم دراوين، خاصة في حالة سيناريو يحوي الكثير من الأنابيب المراد حساب أقطارها، تساعد الشروط المحيطية في التصميم.

تعديل السحوبات: تقاد عملية حساب أقطار الأنابيب في التصميم بالسحوبات.

قيود الضواغط: يمكن وضع قيود على الضواغط مثل الحد الأدنى، الحد الأعلى، أو مجال الضواغط المسموحة.

قيود السحوب: يمكن وضع قيود على الغزارات مثل الحد الأدنى، الحد الأعلى، أو مجال الغزارات المسموحة.

الخواص و التكلفة: تساعد الخواص و التكلفة على تحديد مدى التأثير الهيدروليكي و حساب تكلفة الحلول الناتجة. و يفيد في المفاضلة بين الحلول.

يمكن لمصمم داروين Darwin Designer أن يحسب أقطار الأنابيب الجديدة من الأقطار المتوفرة، و أن يحدد فيما اذا كان انشاء أنبوب ضروري أم لا، باضافة خيار القطر صفر إلى مجموعة خيارات الأنابيب، و الذي يحسب أقطار الأنابيب المتوازية.

نوع التصميم Design Type : يفيد نوع التصميم في تصميم و وزن الفوائد بحيث تعرف الخوارزمية الجينية بشكل أفضل أولويات التصميم.

منهجية تصميم داروين

يستخدم مصمم داروين الخوارزميات الجينية لمساعد مهندسي الهيدروليك على تخطيط و تصميم منظومات توزيع المياه بكفاءة.

بالامكان تأسيس النموذج الأمثلي على أساس تركيب و تحميع امكانية حساب أقطار الأنابيب الجديدة و اعادة تأهيل الأنابيب القديمة، بحيث يحقق شروط تحميل سحوبات متعددة، و شروط محيطية متنوعة. و يستطيع المصمم وضع حل أمثلي لمنظومة توزيع كاملة أو لجزء منها بأقل تكلفة و أكبر فائدة. و الحل المجدي تقنيا و اقتصاديا يحدد بالتكلفة الأقل أو الفائدة الأكبر أو بحل وسط موزون بينهما.

يمكن النمذجة على ثلاثة مستويات:

- المستوى الأول 1 = أمثلية التكلفة الدنيا: التصميم بالكلفة الدنيا هو هو هدف التصميم الأمثلي. فالحل الأمثل هو الحل الذي يحدد بالتكلفة الدنيا و يحقق معايير هيدروليكية موضوعة مثل:
  1- الضواغط في العقد صغرى.
  2- الضواغط العظمى المسموحة في العقد.
  3- السرع العظمى المسموحة في الأنابيب.
  4- السرع الصغرى المسموحة في الأنابيب.
- المستوى الثاني 2 - أمثلية الفائدة العظمى: يطور النموذج بالفائدة العظمى بهدف الوصول إلى حل بفائدة عظمى للضاغط في منظومة التوزيع، و يحقق معايير هيدروليكية و ميزانية متوفرة.
- المستوى الثالث 3 - أمثلية موازنة الفائدة - التكلفة: يطور النموذج في هذا المستوى بحيث يحدد موازنة بين الفائدة و التكلفة آخذا بالاعتبار الميزانية المتوفرة. بالامكان وضع توابع فائدة و تحديد الميزانية الممكن تأمينها.

في المستوى الأول و الثاني يوجد هدف أمثلي وحيد، في المستوي الثالث عدة أهداف للأمثلية. يتضمن الاطار العام توابع الفائدة و التكلفة و يحوي ما يأتي:

1- المتغيرات التصميمية: و هي أقطار الأنابيب و أفعال تصميمية. تؤخذ الأفعال التصميمية في تصميم اعادة التأهيل كمتغيرات مثل التنظيف، الاستبدال، اعادة تبطين الأنابيب.
2- توابع التكلفة: التكلفة الكلية لتصميم شبكة و اعادة أهيلها تشمل تكلفة الأنابيب الجديدة و تكلفة تأهيل الأنابيب.

توابع الفائدة: هدف تصميم منظومة توزيع المياه هو زيادة الفائدة للحد الأكبر و خفض تكلفة المنظومة. الفائدة الحقيقية لتصميم منظومة التوزيع هي التزويد بكمية و نوعية مياه مناسبة. على أن تكون كمية المياه محسوبة للفترة التصميمية للمشروع. و تقدر كمية المياه اللازمة باعتبار حصة الفرد و عدد السكان و مصادر المياه الممكنة و الميزانية المرصودة. و تقاس الفائدة بتوابع تحدد الحدود الدنيا و العظمى المطلوبة للسحب و الضاغط.

يحاول تصميم دراوين حل تحقيق هدفين متناقضين للوصول إلى حلول مقبولة. فهدف خفض التكلفة يتم بلوغه بخفض هدف الفائدة. و الحل الأمثلي هو تحقيق الفائدة ضمن مجال التكلفة المسموح.

توابع الفائدة للضاغط عموما اثنين: فائدة الضاغط غير البعدي و الفائدة الموحدة.
و توابع فائدة اعادة التأهيل هي توابع لتحسين استطاعة الأنابيب و تحسين خشونة الأنابيب.
قيود التصميم: هي قيود أقطار الأنابيب- قيود الضواغط في العقد- قيود السرع الأعظمية ميل خط التدرج الأعظمي المسموح- قيود الميزانية.

5- **الخوارزمية الجينية** GA :

الخوارزمية الجينية هي طريقة بحث تعتمد على مبادئ التطور الطبيعي natural evolution و التوالد البيولوجي biological reproduction و لاجراء المعايرة الأمثلية لمنظومة توزيع المياه، تقوم الخوارزمية الجينية بتوليد مجموعة حلول تجريبية لبارامترات النموذج. ثم يقوم البرنامج الهيدروليكي بمحاكات كل حل تجريبي. نتائج المحاكات الهيدروليكية هي الضواغط في العقد و الغزارات في الأنابيب. تمرر نتائج المحاكات إلى نموذج المعايرة. يقيم نموذج المعايرة مدى قرب محاكات النموذج الهيدروليكي و المعطيات التجريبية، حيث يحسب نموذج المعايرة قيمة جودة الملاءمة و هي الفرق بين نتائج المحاكات الهيدروليكية و القياسات لكل من الغزارات و الضواغط، لكل حل. و قيمة جودة الملاءمة تعطى الملاءمة للحل في الخوارزمية الجينية.

يكتمل جيل واحد في الخوارزمية الجينية. و يؤخذ بالاعتبار قياس الملاءمة عند تشكيل الجيل الثاني من من الخوارزمية الجينية. و لايجاد حلول المعايرة الأمثلية، تختار الحلول الأكثر ملاءمة بمحاكات مبدأ الاصطفاء الطبيعى لداروين ببقاء الأفضل. تستخدم الحلول المختارة لانتاج الجيل الثاني من حلول المعايرة باجراء عمليات جينية. و بعد عدة أجيال تتطور الحلول، و تنبثق في النهاية حلول أمثلية أو قريبة من الأمثلية. و في مسائل منظومات توزيع المياه، تعتبر fast messy GA الأكثر كفاءة.

خوارزمية البحث الجينية مناسب لحل أمثلي لمسائل ذات طبيعة حل غير محدب non-convex و بعدة نقاط أمثلية محلية multiple local-optimal. و معايرة النماذج الهيدروليكي هي من صنف هذه المسائل. علما أنه للخوارزميات الجينية خصائص يجب أخذها بالاعتبار، مثل:

1- الحل المناسب هو أمثلي مقارنة بحلول معروفة أخرى، و الخوارزمية الجينية لا تملك اختبار لأمثلية حقيقية. و لا تملك هذه الخوارزمية قاعدة دقيقة لانهاء البحث. و في معاير داروين يفرض على الخوارزمية الجينية أن تقف بعدة آليات:

a. وضع عدد كحد أعلى للحلول التجريبية.

b. وضع عدد كحد أعلى للأجيال غير المحسنة.

2- الخوارزمية الجينية طريقة غير تقريرية تعتمد لدرجة ما على الحلول الأولية المتوفرة. و باعادة الحساب يمكن الحصول على حلول أخرى، و هذا مفضل.

3- تحسب الخوارزمية الجينية مدى ملاءمة أي حل تجريبي طبقا لأهداف محددة لمسألة الأمثلية. و للتأثير في اختيار الحلول تستخدم هذه الخوارزمية طرائق التوزين (weightings) . و تبحث الخوارزمية الجينية عن تراكب لعدة خيارات و تقديمها كحلول تحقق الأهداف المرادة. و اذا لم تزود الخوارزمية الجينية بمعطيات ذات نوعية جيدة و خيارات مرنة بما يكفي، لا تجد الخوارزمية حلا مقبولا. و اذا زودت الخوارزمية بالكثير من الاحتمالات لتجريبها، تقل كفاءة البحث.

4- يجب اعتبار عدم دقة البيانات الحقلية و تقييمها قبل استخدامها.

الملحق 7

خوارزميات لنمذجة
ظاهرة المطرقة المائية

- خوارزمية معامل الخشونة في علاقة دارسي:

```
Roughness coefficient
*******************
float fr(int i،float qq){sf=7.;
        if(unit==1)visc=1.301e-6;if(unit==2)visc=1.201e-5;
        re=1.27374*fabs(qq)/(d[i]*visc);de=prof[i]/d[i];
        if(re<2100){if(re<100) return .64; else return 64./re ;}
         else{    do{sf1=sf; sf=1.14-2.*log10(de+9.35*sf1/re);}
                  while (fabs(sf-sf1)>1.e-6);  return 1./sf/sf;}
}
```

- خوارزمية الاستقراء بطريقة لاغرانج:

```
 Lagrange's interpolation
**********************
float Lagrange (float *qp،float *hp ،float q ،int n،int k){
ndeg2=ndeg/2; ndegh=ndeg-ndeg2; m=n-1;
 for (i=0;i<n;i++){
         ql[i]=qp[i]*(rpm[k] * pmparl[k]); hl[i]=hp[i]*pow(rpm[k]،2); }
 for (i=0;i<n-1 ;i++)
         if ((q > ql[i]) && (q <= ql[i + 1])) {
                 im = i;if (q == ql[i + 1]) im = i + 1;goto l;      }
l:if ((q <= ql[0]) || (ndeg2 >=fabs(im - 1))){
          if (q <= ql[0]) im = 0; i1 = 0; i2 = ndeg;leq=1;   }
  else if ((q >= ql[m]) || (ndegh >= m - im)){
         if (q >= ql[m]) im = m; i1 = m - ndeg; i2 = m;leq=1;  }
  else {i1 = im - ndeg2;i2 = im + ndegh;leq=1;}
  if (leq){
         for(ii=0،i=i1;i<=i2;ii++،i++){ coe[ii]=hl[i];
            for(j=i1;j<=i2;j++){
                 if(j!=i)coe[ii]=coe[ii]/(ql[i]-ql[j]);}}leq=0;  }
```

```
 for(ii=0،h=0.،i=i1;i<=i2;ii++،i++){  hh=coe[ii];
     for(j=i1;j<=i2;j++){  if(j!=i)hh*=(q-ql[j]);} h+=hh;  }
 if(h>=0)return h;if(h<0)return h=0;
}
```

- خوارزمية حل جملة معادلات بطريقة المصفوفات:

```
//  Solve Eqs
**********
#define TINY 1.0e-20;
void dcompos(float **a،int n،int *indx،float *d) {
        int i1،imax،j1،l;float aamax،dum،sum،temp;float *vv;
        vv=(float*)calloc(0،sizeof(float)); *d=1.0;
        for(i1=0;i1<n;i1++) {aamax=0.0;
                for(j1=0;j1<n;j1++)
                        if ((temp=fabs(a[i1][j1])) > aamax) aamax=temp;
                        if (aamax == 0.0) printf("Singular matrix at row %3d\n"،i1);
                        vv[i1]=1.0/aamax;
        }
        for(j1=0;j1<n;j1++) {
                for(i1=0;i1<j1;i1++) {sum=a[i1][j1];
                        for(l=0;l<i1;l++) sum -= a[i1][l]*a[l][j1];a[i1][j1]=sum;}
                aamax=0.0;
                for(i1=j1;i1<n;i1++) {sum=a[i1][j1];
                        for(l=0;l<j1;l++)sum -= a[i1][l]*a[l][j1];a[i1][j1]=sum;
                        if((dum=vv[i1]*fabs(sum))>=aamax)
                        {aamax=dum;imax=i1;}
                }
                if (j1 != imax) {
                        for(l=0;l<n;l++) {
                                dum=a[imax][l];a[imax][l]=a[j1][l];a[j1][l]=dum;    }
                        *d = -(*d);vv[imax]=vv[j1];
                }
                indx[j1]=imax;
                if (a[j1][j1] == 0.0) a[j1][j1]=TINY;
                if (j1 != n) {dum=1.0/(a[j1][j1]);
```

```
                for(i1=j1+1;i1<n;i1++) a[i1][j1] *= dum;}
        }
}
#undef TINY
void finsol(float **a‹int n‹int *indx‹float *b) {ii=-1;
        for(i=0;i<n;i++) {
                ip=indx[i];sum=b[ip];b[ip]=b[i];
                if (ii != -1){     for(j=ii;j<i;j++) sum -= a[i][j]*b[j];}
                else if (sum!=0.) ii=i; b[i]=sum;
        }
        for(i=n-1;i>=0;i--) {sum=b[i];
                if(i<(n-1)){for(j=i+1;j<n;j++) sum -= a[i][j]*b[j];}
                b[i]=sum/a[i][i];         }
}
void solveq(int n‹float **a‹float *b‹int itype‹float *dd‹int *indx){
        dcompos(a‹n‹indx‹dd); for(l=0;l<n;l++) *dd*=a[l][l];
        finsol(a‹n‹indx‹b);      return;
}
```

- **خوارزميات طريقة المميزات المحددة:**

```
Transient Analysis
*************************
void transient(float **h،float **v){
        t=time;
// * compute h and v at interior nodes  *
  for (i=0;i<np;i++){
        k=npar[i];
       for(j=1;j<k;j++){ra=ratio[i]*a[i];
              vl=v[i][j]-ra*(v[i][j]-v[i][j-1]); vr=v[i][j]-ra*(v[i][j]-v[i][j+1]);
              hl=h[i][j]-ra*(h[i][j]-h[i][j-1]); hr=h[i][j]-ra*(h[i][j]-h[i][j+1]);
              vl2=vl*pow(fabs(vl)،cv);vr2=vr*pow(fabs(vr)،cv);
              vnew[i][j]=0.5*(vl+vr+c[i]*(hl-hr));
     vnew[i][j]+=0.5*(c[i]*delt*sine[i]*(vl-vr) -ak[i]*(vl2+vr2));
              hnew[i][j]=0.5*(hl+hr+(vl-vr)/c[i]+delt*sine[i]*(vl+vr));
              hnew[i][j]+=0.5*(-(ak[i]/c[i])*(vl2-vr2));
       }
  }
// ** compute h and v at junctions **
  for(i=0;i<np;i++){cod[i]=0.; cev[i]=0.;}
  for(j=0;j<nn;j++){an=0.; de=0.;
       if(tqg[j]>=0.)for(j1=0;j1<20;j1++){
              qgn1[j1]=qgn[j][j1];tv1[j1]=tv[j][j1];}
       if((tqg[j]>=0.)&&(t>tqg[j])){// t.grad.change nod i
              if(t>=tv1[19]) qj[j]=qgn1[19];
              else    for(j1=0;j1<20;j1++)
                     if((t>=tv1[j1]) && (t<tv1[j1+1])) {
                            qj[j]=(t-tv1[j1])/(tv1[j1+1]-tv1[j1]);
                            qj[j]= qgn1[j1]+qj[j]* (qgn1[j1+1]-qgn1[j1]);
                            break;}
       }
       if(tqs[j]>=0.){// t of rapid change in node i
              if(t<tqs[j]) qj[j]=qsn1[j];  if(t>tqs[j]) qj[j]=qsn2[j];
```

```
        }
      for(i=0;i<np;i++){
            if(pipju[i]==nodid[j]){
              ra=ratio[i]*a[i];
              vr=v[i][0]-ra*(v[i][0]-v[i][1]);  hr=h[i][0]-ra*(h[i][0]-h[i][1]);
              cod[i]=-ar[i]*(vr-c[i]*hr-c[i]*delt*vr*sine[i]);
              cod[i]+=-ar[i]*(-ak[i]*vr*pow(fabs(vr)‹cv));  cev[i]=c[i]*ar[i];
              an=an+cod[i]; de=de+cev[i];if(de<=.1e-10) de=.1e-10;     }
            if(pipjd[i]==nodid[j]){
              k=npar[i];ra=ratio[i]*a[i];
              vl=v[i][k]-ra*(v[i][k]-v[i][k-1]);  hl=h[i][k]-ra*(h[i][k]-h[i][k-1]);
              cod[i]=ar[i]*(vl+c[i]*hl+c[i]*vl*delt*sine[i]);
              cod[i]=ar[i]*(-ak[i]*vl*pow(fabs(vl)‹cv));  cev[i]=c[i]*ar[i];
              an=an+cod[i];  de=de+cev[i];          if(de<=.1e-10) de=.1e-10; }
      }
      hpp=(an-qj[j])/de;hnod[j]=hpp-nodgl[j];
      for(i=0;i<np;i++){
            if(pipju[i]==nodid[j]){
              hnew[i][0]=hpp;   vnew[i][0]=(-cod[i]/ar[i])+c[i]*hpp;     }
            if(pipjd[i]==nodid[j]){
              k=npar[i];hnew[i][k]=hpp; vnew[i][k]=(cod[i]/ar[i])-c[i]*hpp;}}
}
for(j=0;j<ntank;j++){
        for(i=0;i<np;i++){
            if(pipju[i]==tankid[j]){
                  c4=c[i];ra=ratio[i]*a[i];
                  vr=v[i][0]-ra*(v[i][0]-v[i][1]); hr=h[i][0]-ra*(h[i][0]-h[i][1]);
                  c3=vr-c4*hr-c4*delt*vr*sine[i]-ak[i]*vr*pow(fabs(vr)‹cv);
                  hnew[i][0]=tankwl[j]; vnew[i][0]=c3+c4*hnew[i][0];  }
            if(pipjd[i]==tankid[j]){
                  c2=c[i];ra=ratio[i]*a[i];k=npar[i];
                  vl=v[i][k]-ra*(v[i][k]-v[i][k-1]); hl=h[i][k]-ra*(h[i][k]-h[i][k-1]);
                  c1=vl+c2*hl+c2*vl*delt*sine[i]- ak[i]*vl*pow(fabs(vl)‹cv);
                  hnew[i][k]=tankwl[j]; vnew[i][k]=c1-c2*hnew[i][k];  }
        }
```

```
  }
  for(j=0;j<nres;j++){
        for(i=0;i<np;i++){
              if(pipju[i]==resid[j]){
                    ra=ratio[i]*a[i];c4=c[i];
                    vr=v[i][0]-ra*(v[i][0]-v[i][1]); hr=h[i][0]-ra*(h[i][0]-h[i][1]);
                    c3=vr-c4*hr-c4*delt*vr*sine[i]-ak[i]*vr*pow(fabs(vr)‹cv);
                    hnew[i][0]=reswl[j]; vnew[i][0]=c3+c4*hnew[i][0];  }
              if(pipjd[i]==resid[j]){
                   k=npar[i];c2=c[i];ra=ratio[i]*a[i];
                   vl=v[i][k]-ra*(v[i][k]-v[i][k-1]); hl=h[i][k]-ra*(h[i][k]-h[i][k-1]);
                    c1=vl+c2*hl+c2*vl*delt*sine[i]-ak[i]*vl*pow(fabs(vl)‹cv);
                    hnew[i][k]=reswl[j]; vnew[i][k]=c1-c2*hnew[i][k];  }
        }
  }
n=nepmp1;
  for(j=0;j<npmp;j++){
        pc=pmpncp[j];m=0;
        for(j1=0;j1<pc;j1++){
              qp[j1]=pmpq[j][j1];hp[j1]=pmpp[j][j1]; pp[j1]=pmpt[j][j1];}
        for(i=0;i<np;i++){
              if(pipjd[i]==pmpid[j]){
                    k=npar[i];ip1=i;c2=c[i]; pid=pipid[i];ra=ratio[i]*a[i];
                    vl=v[i][k]-ra*(v[i][k]-v[i][k-1]); hl=h[i][k]-ra*(h[i][k]-h[i][k-1]);
                    c1=vl+c2*hl+c2*vl*delt*sine[i]-ak[i]*fabs(vl)*pow(vl‹cv); }
              if(pipju[i]==pmpid[j]){
                    ip2=i;c4=c[i]; ra=ratio[i]*a[i];pid=pipid[i];
                    vr=v[i][0]-ra*(v[i][0]-v[i][1]); hr=h[i][0]-ra*(h[i][0]-h[i][1]);
                    c3=vr-c4*hr-c4*vr*delt*sine[i]-ak[i]*fabs(vr)*pow(vr‹cv);
              }
        }
         qq=vnew[ip2][0]*ar[ip2];
         if((t<bts[j])&&((bts[j]<btf[j])||(btf[j]<0)))     goto pmp20;
         if((t<btf[j])&&((btf[j]<bts[j])||(bts[j]<0)))     goto pmp20;
         if((qq<0)||(rpm[j]<=0)){qq=0;rpm[j]=0;pmph[j]= 0;goto pmp20;}
```

```
            if((bts[j]<0)&&(btf[j]<0)){
                    if(pmpst[j]==3){goto pmp20;}// 3=active
                    if(pmpst[j]==4){rpm[j]= 0;goto pmp20;}}// 4=inactive
            if(bts[j]<0){
                     if(t<btf[j]){if(pmpst[j]==3){goto pmp20;}}
                     if(t>btf[j]){goto pmp15;}}
            if(btf[j]<0){
                     if(t<bts[j]){if(pmpst[j]==4){rpm[j]= 0;goto pmp20;}}
                     if(t>bts[j]){goto pmp18;}}
            if(btf[j]<bts[j]){
                     if(t<btf[j]){if(pmpst[j]==3) {goto pmp20;} }
                     if((t>btf[j])&&(t<bts[j])){goto pmp15;}
                     if(t>bts[j]){goto pmp18;}}
            if(bts[j]<btf[j]){
                     if(t<bts[j]){if(pmpst[j]==4) {rpm[j]= 0;goto pmp20;}}
                     if((t>bts[j])&&(t<btf[j])){goto pmp18;}
                     if(t>btf[j]){goto pmp15;}}
pmp15: if(pmpwr[j]>0){
                    if(qq<qp[0]){tn2[j]=pp[0];}
                    else if(qq>qp[pc-1]){tn2[j]=pp[pc-1];}
                    else      for(j1=0;j1<pc-1;j1++){
                                    if(qq>=qp[j1] && qq<=qp[j1+1]){
                                            tn2[j]=(qq-qp[j1])/(qp[j1+1]-qp[j1]);
                                            tn2[j]= pp[j1]+tn2[j]* (pp[j1+1]-pp[j1]);
                                            break; }}
                    rpm[j] = rpm[j] -  tn2[j] * delt;
            }
            else{rpm[j] = rpm[j] +(0-rpmn[j])/tfp[j]*delt;   }
            if (rpm[j]<=0){ rpm[j]=0;pmpst[j]=4;}
            goto pmp20;
//          pumps restarting
pmp18:;
      if (t < (bts[j] + tsp[j]))  rpm[j] = rpm[j] + delt* rpmn[j] / tsp[j];
            else if (t >= (bts[j] + tsp[j]))   rpm[j] = rpmn[j];
pmp20:;k=npar[ip1]; rpmr=rpm[j]/rpmn[j];
            if(rpm[j]>=0){
```

```
                pmph[j]=pmphp(j‹qq);
pmp25:
        vnew[ip2][0]=(c2*c3+c1*c4+c2*c4*pmph[j]);
                vnew[ip2][0]/=(c2+c4*ar[ip2]/ar[ip1]);
                if(vnew[ip2][0]>0){
                        q1=vnew[ip2][0]*ar[ip2];
                        if(fabs(qq-q1)/qq>.01){
                                qq=q1;pmph[j]=pmphp(j‹qq);goto pmp25;}
                        vnew[ip1][k]=vnew[ip2][0]*ar[ip2]/ar[ip1];
                        hnew[ip1][k]=(c1-vnew[ip1][k])/c2;
                    hnew[ip2][0]=(vnew[ip2][0]-c3)/c4;} }
                if(vnew[ip2][0]<0){
                        vnew[ip2][0]=0;vnew[ip1][k]=0;
                        hnew[ip1][k]=(c1-vnew[ip1][k])/c2;
                   hnew[ip2][0]=(vnew[ip2][0]-c3)/c4;}  }
  n=nevlv1;
  for(j=0;j<nvlv;j++){
          npvlv=0;       c5=0;c6=0;
          for (j1=0;j1<11;j1++){   pct1[j]=pct[j][j1]; kli1[j]=kli[j][j1];}
          for(i=0;i<np;i++){
                  if(pipjd[i]==vlvid[j])npvlv++;  if(pipju[i]==vlvid[j])npvlv++;}
          for(i=0;i<np;i++){
                  if(pipjd[i]==vlvid[j]){
                          k=npar[i];iv1=i; c2=c[i];ra=ratio[i]*a[i];
                          vl=v[i][k]-ra*(v[i][k]-v[i][k-1]); hl=h[i][k]-ra*(h[i][k]-h[i][k-1]);
                          c1=vl+c2*hl+c2*vl*delt*sine[i] -ak[i]*vl*pow(fabs(vl)‹cv);
                          c6+=2*g*c1/c2;
                  }
                  if(pipju[i]==vlvid[j]){
                          iv2=i;c4=c[i];ra=ratio[i]*a[i];
                          vr=v[i][0]-ra*(v[i][0]-v[i][1]); hr=h[i][0]-ra*(h[i][0]-h[i][1]);
                          c3=vr-c4*hr-c4*delt*vr*sine[i]-ak[i]*vr*pow(fabs(vr)‹cv);
                          c5+=2*g/c4;c6+=2*g*c3/c4;
                  }
          }c5+=2*g*ar[iv2]/(ar[iv1]*c2);
```

```
if(vlvg[j]==1){// 1=if graduate vlv c\o
        t0=tc0[j];t1=tc1[j];t2=tc2[j];   p0=po0[j];p1=po1[j];p2=po2[j];
       if(t<=t0) openv = p0;
       else if (t> t0 && t < t1) openv = p0+ (t - t0) / (t1 - t0) * (p1 - p0);
       else if (t >= t1 && t < t2) openv = p1 + (t - t1) / (t2 - t1) * (p2 - p1);
       else if (t >= tc2[j])      openv = po2[j];
}
if(vlvs[j]==1){// 1  rapid vlv c/o
        if(t<tsv[j]) {openv=pos0[j];}  if(t>=tsv[j]) {openv=pos1[j];}  }
if (vlvai[n]==1){openv=pai[n];}
for(j1=0;j1<11;j1++){
        if((openv >= pct1[j1]) && (openv <= pct1[j1+1])) goto v95;}
v95:;
        ki[j] = (openv - pct1[j1])/(pct1[j1 + 1] - pct1[j1]);
        ki[j]= kli1[j1]+ ki[j]* (kli1[j1+1] - kli1[j1]);   kl=ki[j];
 if (npvlv==1){
         c5=2*g/c2;c6=2*g*(hatm-c1/c2);k=npar[iv1];
         vnew[iv1][k]=c5/(2*kl);
         vnew[iv1][k]*=(-1+pow((1-4*c6*kl/(c5*c5))‘.5));
         if(vnew[iv1][k]>=0)   hnew[iv1][k]=(c1-vnew[iv1][k])/c2;
         if(vnew[iv1][k]<0){
                 vnew[iv1][k]=c5/(2*kl);
vnew[iv1][k]*=(1-pow((1+4*c6*kl/(c5*c5))‘.5));
                 hnew[iv1][k]=(vnew[iv1][k]-c1)/c2;}
 }
 if (npvlv==2){//printf("openv=%f\n"‘openv);
         if((openv<=10)&&(openv>=0)){
                 vnew[iv2][0]=c5/(2*pow(kl‘2));
                 vnew[iv2][0]*=(-1+pow((1+4*c6*kl/(c5*c5))‘.5));}
         if(openv>10){
                 vnew[iv2][0]=c5/(2*kl);
 vnew[iv2][0]*=(-1+pow((1+4*c6*kl/(c5*c5))‘.5));   }
         if (vnew[iv2][0]>=0){
                 vnew[iv1][k]=vnew[iv2][0]*ar[iv2]/ar[iv1];
                 hnew[iv1][k]=(c1-vnew[iv1][k])/c2;
```

```
            hnew[iv2][0]=(vnew[iv2][0]-c3)/c4;}
                    if (vnew[iv2][0]<0){
                            c5=2*g*(ar[iv1]/(c4*ar[iv2])+1/c2);
                            vnew[iv1][k]=c5/(2*kl);
            vnew[iv1][k]*=(-1+pow((1-4*c6*kl/(c5*c5))‘.5));
                            vnew[iv2][0]=vnew[iv1][k]*ar[iv1]/ar[iv2];
                            hnew[iv1][k]=(c1-vnew[iv1][k])/c2;
            hnew[iv2][0]=(vnew[iv2][0]-c3)/c4;}            }
  }
// ** locate maximum and minimum heads and h-values **
  for(i=0;i<np;i++){
            k=npar[i]+1; hpmax[i]=hnew[i][0]-pjugl[i];
            hpmin[i]=hnew[i][0]-pjugl[i];vpip[i]=vnew[i][0];
            for (j=0;j<k;j++){
                    deltx=l[i]/(npar[i]*(fabs(vnew[i][j])+a[i]));
                    if(deltx<deltn) deltn=deltx;
                    head[i][j]=hnew[i][j]-(pjugl[i]+j*l[i]/npar[i]*sine[i]);
                    if(head[i][j]<-10)  head[i][j]=-10;
                    hnew[i][j]=head[i][j]+(pjugl[i]+j*l[i]/npar[i]*sine[i]);
                    if (head[i][j]<hlow[i][j]){  hlow[i][j]=head[i][j];tlow[i][j]=t;}
                    if (head[i][j]>hhigh[i][j]){ hhigh[i][j]=head[i][j];thigh[i][j]=t;}
                    if (head[i][j]>phmax) {
                          ipmax=i;xmax=x[i][j];phmax=head[i][j];ttmax=t;}
                    if (head[i][j]<phmin){
                          ipmin=i;xmin=x[i][j];phmin=head[i][j];ttmin=t;}
                    if(head[i][j]>hpmax[i]) hpmax[i]=head[i][j];
                    if(head[i][j]<hpmin[i]) hpmin[i]=head[i][j];  }
  }
  for(i=0;i<np;i++){ k=npar[i]+1;
            for(j=0;j<k;j++){        v[i][j]=vnew[i][j];h[i][j]=hnew[i][j]; }  }
//*** check stability criteria **
           if (deltn<=(0.9999*delt)) delt=0.999*deltn;
// ** write max and min heads and h-values **
  for(i=0;i<np;i++){
            k=npar[i]+1;
```

```
        for(j=0;j<k;j++){
                headmx=hhigh[i][j]; headmx+=-(pjdgl[i]+x[i][j]*l[i]*sine[i]);
                headmn= hlow[i][j]; headmn+=-(pjdgl[i]+x[i][j]*l[i]*sine[i]);      } }
}
```

- خوارزمية التابع الرئيسي :

```
main  function
*****************
void main() {
// ***** begining of analysis  *****
 steady(h0،v0،h،v);
        fprintf(fileout،"\nSec\t v0\t hgl0\t head0\n");
 for(i=0;i<np;i++){
        k=npar[i]+1;
        for(j=0;j<k;j++) {
                vn0=v[i][j];hgl0=hnew[i][j];hn0=head[i][j];
                fprintf(fileout،"[%d][%d]\t %6.3f\t  "،i،j،vn0);
                fprintf(fileout،"%6.3f\t  %6.3f\n"،hgl0،hn0);
 }}
 for(ke=0;ke<25;ke++){  // nt=no. of times
          time=(ke+1.)*delt;
          printf("ke=%1d،time=%f\n"،ke،time);
          fprintf(fileout،"tn=\t %1d\t time\t %f\n"،ke،time);
        transient(h،v);
                  printf("Sec\t vn\t hgln\t hn\n");
                  fprintf(fileout،"Sec\t v\t hgl\t head\n");
  for(i=0;i<np;i++){
           k=npar[i]+1;
           for(j=0;j<k;j++) {
                  vn=vnew[i][j];hgln=hnew[i][j];hn=head[i][j];
                  printf("[%d][%d]\t %5.2f\t "،i،j،vn);
                  printf("%5.2f\t %5.2f\n"،hgln،hn);
                  fprintf(fileout،"[%d][%d]\t %5.2f\t "،i،j،vn);
                  fprintf(fileout،"%5.2f\t %5.2f\n"،hgln،hn);   }
```

```
 }
 time1=time;}
                printf("Sec\t hhigh\t hlow\n");
                fprintf(fileout‘"Sec\t hhigh\t hlow\n");
                for(i=0;i<np;i++){
                        k=npar[i]+1;
                        for(j=0;j<k;j++) {
                                hh=hhigh[i][j]+(pjugl[i]+j*l[i]/npar[i]*sine[i]);
                                hl=hlow[i][j]+(pjugl[i]+j*l[i]/npar[i]*sine[i]);
                                printf("[%d][%d]\t %5.2f\t %5.2f\n"‘i‘j‘hh‘hl);
                fprintf(fileout‘"[%d][%d]\t %5.2f\t \t %5.2f\n"‘i‘j‘hh‘hl);    }}
fclosure(filein); fclosure(fileout);}
```

- **خوارزميات طريقة المميزات الضمنية:**

- خوارزمية تحديد معادلات المنظومة للحل :

```
//  Equations formulation
**********************
void deffun(float *f) {
        t=time;
        for(i=0،n=0;i<np;i++){k=npar[i];
        for(j=0;j<=k;j++،n++){qnew[i][j]=x[n];hnew[i][j]=x[n+nq];}}
        //        pipes equations   //
        ne=0;j1=0;
        for (i=0;i<np;i++){k=npar[i];pip=pipid[i];
        for (j=0;j<k;j++){
                q1[i]=(q[i][j]+q[i][j+1])/2;v1=q[i][j]/ar[i];v2=q[i][j+1]/ar[i];
                beta[j]=(h[i][j+1]+h[i][j])+(1-teta)/teta*alfa[i]*(q[i][j]-q[i][j+1]);
                delta[j]=v1*fabs(v1)+v2*fabs(v2);
                delta[j]*=-dx[i]*fr(i،q1[i])/(4*g*teta*d[i]);
                delta[j]+=(1-teta)/teta*(h[i][j]-h[i][j+1])+gama[i]*q1[i];
                n1=ne+2*j;
                f[n1]=-hnew[i][j]+hnew[i][j+1]-delta[j];
                f[n1]+=gama[i]*(qnew[i][j]+qnew[i][j+1]);
                n1=ne+2*j+1;
                f[n1]=hnew[i][j]+hnew[i][j+1]-beta[j];
                f[n1]+=alfa[i]*(-qnew[i][j]+qnew[i][j+1]);
          }ne=ne+2*k;
        }
        nne1=ne;
        //        nodes equations   //
        npd1=0;
        for(i=0;i<nn;i++){
                for(j=0;j<20;j++){tv1[j]=tv[i][j];qgn1[j]=qgn[i][j];}
                if((tqg[i]>=0.)&&(t>tqg[i])){//t grad.change node i
                        if(t>=tv1[19]) qj[i]=qgn1[19];
                        else     for(j=0;j<19;j++)
                                        if((t>=tv1[j]) && (t<tv1[j+1])) {
```

```
                                qj[i]=(t-tv1[j])/(tv1[j+1]-tv1[j]);
                                qj[i]= qgn1[j] +qj[i]* (qgn1[j+1]-qgn1[j]);break;}
        }
        if (tqs[i]>=0.){// t rapid change node i
                if (t<tqs[i])  qj[i]=qsn1[i];if (t>=tqs[i]) qj[i]=qsn2[i];}
        n1=nne1+i+npd1;
        f[n1]=-qj[i];
        for (j=0;j<np;j++){
                if(pipjd[j]==nodid[i]){k=npar[j]; f[n1]+=qnew[j][k];}
                if(pipju[j]==nodid[i]){f[n1]-=qnew[j][0];} }
        nen=nne1+i+npd1;j2=0;
        for (j=0;j<np;j++){
                if(j2>0) break;
                if(pipjd[j]==nodid[i]){
                  j2++;k=npar[j];j3=j;
                  for (j1=0;j1<np;j1++){
                        if(pipju[j1]==nodid[i]){
                            npd1++;n1=nne1+i+npd1;
                            f[n1]=hnew[j3][k]-hnew[j1][0]; }
                        if((pipjd[j1]==nodid[i])&&(j3!=j1)){
                            npd1++;n1=nne1+i+npd1;k1=npar[j1];
                            f[n1]=hnew[j3][k]-hnew[j1][k1]; }
        }}}
}
nne2=nne1+nn+npd1;
//                  tank equations              //
nnt1=nne2;
nt=0;
for (i=0;i<ntank;i++){n1=nnt1+nt;
  for (j=0;j<np;j++){
          if (pipjd[j]==tankid[i]){
                  k=npar[j];f[n1]=hnew[j][k]-tankwl[i];  }  }
  for (j=0;j<np;j++){
          if (pipju[j]==tankid[i]){ f[n1]=hnew[j][0]-tankwl[i]; } }
}
nnt2=nnt1+nt;
```

```
        //                  reservoir equations              //
        nnr1=nnt2;
        nr=0;
        for (i=0;i<nres;i++){n1=nnt1+nr;
          for (j=0;j<np;j++){
                if (pipjd[j]==resid[i]){
                        k=npar[j];     f[n1]=hnew[j][k]-reswl[i]; nr++; }  }
          for (j=0;j<np;j++){
                if (pipju[j]==resid[i]){
                        f[n1]=hnew[j][0]-reswl[i];  nr++; } }
        }
        // f[1] to f[nn]=1-nn eq's //x[1] to x[np]=q's in pipes
        nnr2=nnr1+nr;
        //****** pmp  equations        ******
        nepmp1=nnr2;
        npm=0;
        for (n=0;n<npmp;n++){          pc=pmpcp[n];
        for (j=0;j<pc;j++){ qp[j]=pmpq[n][j];hp[j]=pmpp[n][j];
        if(pmpwr[n]>0)pp[j]=pmpt[n][j];}
        m=0;    k=nepmp1+n+npm;
        f[k]=0;
        for (j=0;j<np;j++){
                if(pipjd[j]==pmpid[n]){ku=npar[j];iu=j;m++;}
                if(pipju[j]==pmpid[n]){id=j;m++;}
                if (m==2) goto pmp10;
          }
pmp10:;
          n1=nepmp1+n+npm;
          f[n1]=qnew[iu][ku]-qnew[id][0];npm++;
          qq=fabs(qnew[id][0]);
          if((ke==0)||(ke1>0)){goto pmp20;}
          if((t<bts[n])&&((bts[n]<btf[n])||(btf[n]<0))) goto pmp20;
          if((t<btf[n])&&((btf[n]<bts[n])||(bts[n]<0))) goto pmp20;
          if((qq<0)||(rpm[n]<=0)){qq=0;rpm[n]=0; goto pmp20;}
          if((bts[n]<0)&&(btf[n]<0)){
                  if(pmpst[n]==3) {goto pmp20;}// 3=active
```

```
                if(pmpst[n]==4) {rpm[n]= 0;goto pmp20;}}//4=inactive
        if(bts[n]<0){
                if(t<btf[n]){if(pmpst[n]==3) {goto pmp20;}}
                if(t>btf[n]){goto pmp15;}}
        if(btf[n]<0){
                if(t<bts[n]){if(pmpst[n]==4) {rpm[n]= 0;goto pmp20;}}
                if(t>bts[n]){goto pmp18;}}
        if(btf[n]<bts[n]){
                if(t<btf[n]){if(pmpst[n]==3) {goto pmp20;} }
                if((t>btf[n])&&(t<bts[n])){goto pmp15;}
                if(t>bts[n]){goto pmp18;}}
        if(bts[n]<btf[n]){
                if(t<bts[n]){if(pmpst[n]==4) {rpm[n]= 0;goto pmp20;}}
                if((t>bts[n])&&(t<btf[n])){goto pmp18;}
                if(t>btf[n]){goto pmp15;}}
pmp15: if(pmpwr[n] > 0){
                 if(qq < qp[0]){   tn2[n] = pp[0];}
                 else if(qq > qp[pc-1]){   tn2[n] = pp[pc-1];}
                 else     for(j=0;j<pc-1;j++){
                                if(qq >=qp[j] && qq <= qp[j+1]){
                                    tn2[n]=(qq-qp[j])/(qp[j+1]-qp[j]);
                                    tn2[n]= pp[j]+ tn2[n]* (pp[j+1]-pp[j]); break;}}
                          rpm[n] = rpm[n] -  tn2[n] * delt;
         }
         else{ rpm[n] = rpm[n] +(0-rpmn[n])/tfp[n]*delt;  }
         if (rpm[n]<=0){ rpm[n]=0;pmpst[n]=4;}
         goto pmp20;
         //                  pumps restarting
         //                ------------------------
pmp18:;
        if (t < (bts[n] + tsp[n])) rpm[n] = rpm[n] + delt* rpmn[n] / tsp[n];
        else if (t >= (bts[n] + tsp[n]))  rpm[n] = rpmn[n];
pmp20:;if(qnew[id][0]<0) goto pmp25;
        if(rpm[n]>=0)  {n1=nepmp1+n+npm;
        if(rpm[n]==0) {hp1=0;hp2=0;pmpst[n]=4;}
        if(rpm[n]>0){
```

```
                hp1=(ap[n]*qq*qq+bp[n]*qq+cp[n]);
                hp1*=rpm[n]*rpm[n]/(rpmn[n]*rpmn[n]);  }
          f[n1]=hnew[id][0]-hnew[iu][ku]-hp1;  }
pmp25: if(qnew[id][0]<0) {n1=nepmp1+n+npm;
          hp1=0;hp2=0;pmpst[n]=4;
          f[n1]=-klp[n][0]*qnew[id][0]*qnew[id][0];
          f[n1]/=(ar[id]*ar[id]*2*g);  f[n1]+=hnew[id][0]; }}
          nepmp2=nepmp1+npmp+npm;
        //      ******          vlv   equations        *******
        nevlv1=nepmp2;
        nvl=0;
        for (n=0;n<nvlv;n++){
              k=nevlv1+n+nvl;
              npvlv=0;// no-pipe connect to vlv
              for (j=0;j<np;j++){
                    if(pipjd[j]==vlvid[n]){ku=npar[j];iv1=j;npvlv+=1;}
                    if(pipju[j]==vlvid[n]){iv2=j;npvlv+=1; }
                    if(npvlv==2) break;}
              if(vlvg[n]==1){                        // 1=vlv graduate
                    if(t<=tgv0[n])openv=pgv0[n];
                    else if(t > tgv0[n] && t <= tgv1[n]){
                          openv=(t-tgv0[n])/(tgv1[n]-tgv0[n]);
                          openv= pgv0[n]+openv* (pgv1[n]-pgv0[n]);}
                    else if(t > tgv1[n] && t <= tgv2[n]){
                          openv=(t-tgv1[n])/(tgv2[n]-tgv1[n]);
                          openv= pgv1[n]+openv* (pgv2[n]-pgv1[n]); }
                    else if (t > tgv2[n]) openv = pgv2[n];
              }
              if (vlvs[n]==1){   //1 if yes there rapid c/o vlv
                    if(t<tsv[n]) openv=psv0[n];if(t>=tsv[n]) openv=psv1[n];}
              if (vlvai[n]==1){openv=pai[n]; }
              for (j1=0;j1<10-1;j1++){
                    if ((openv>=pct1[j1])&&(openv<=pct1[j1 + 1]))
                          goto v85;}
v85:ki[n]=(openv-pct1[j1])/(pct1[j1+1]-pct1[j1]);
        ki[n]=kli1[j1]+ki[n]*(kli1[j1+1]-kli1[j1]);
```

```
if(ki[n]==0) ki[n]=1e-6;kl=ki[n];
cqk[n]=pi/pow(8*kl‘.5);
cqk[n]=1/(cqk[n]*cqk[n]*pow(d[iv1]‘4)*g);
n1=nevlv1+n+nvl;
if (npvlv==1){
        if(openv==0){n1=nevlv1+n+nvl;f[n1]=qnew[iv1][ku];}
        if(openv>0){
                f[n1]=(2*fabs(q[iv1][ku])*qnew[iv1][ku]);
                f[n1]+=(-fabs(q[iv1][ku])*q[iv1][ku]);
                f[n1]=-cqk[n]*f[n1]+ hnew[iv1][ku]-vlvgl[n];}
}
if(npvlv==2){ n1=nevlv1+n+nvl;
if(openv==0){
        f[n1]=qnew[iv1][ku];
        nvl++;n1=nevlv1+n+nvl;
        f[n1]=qnew[iv2][0];
}
if(openv>0){
        f[n1]=qnew[iv1][ku]-qnew[iv2][0];
        nvl++; n1=nevlv1+n+nvl;
        f[n1]=2*fabs(q[iv1][ku])*qnew[iv1][ku]
        f[n1]+=-fabs(q[iv1][ku])*q[iv1][ku];
        f[n1]=-cqk[n]*f[n1]+hnew[iv1][ku]-hnew[iv2][0];
}       }       }
nevlv2=nevlv1+ nvlv+nvl;     net=nevlv2;}
```

- خوارزمية الحساب اللاتقسيمية:

Meshfree Computational method

```
//          ***************************
#define TINY 1.0e-20;
void dcompos(float **a‘int n‘int *indx‘float *d) {
        int i1‘imax‘j1‘l;float aamax‘dum‘sum‘temp;float *vv;
        vv=(float*)calloc(n‘sizeof(float)); *d=1.0;
        for(i1=0;i1<n;i1++) {
                aamax=0.0;
                for(j1=0;j1<n;j1++)
                        if ((temp=fabs(a[i1][j1])) > aamax) aamax=temp;
                if (aamax == 0.0) printf("S.mat at row %3d\t"‘i1);vv[i1]=1.0/aamax;}
        for(j1=0;j1<n;j1++) {
                for(i1=0;i1<j1;i1++) {
                        sum=a[i1][j1]; for(l=0;l<i1;l++) sum -= a[i1][l]*a[l][j1];a[i1][j1]=sum;}
                aamax=0.0;
                for(i1=j1;i1<n;i1++) {
                        sum=a[i1][j1];
                        for(l=0;l<j1;l++)sum -= a[i1][l]*a[l][j1];a[i1][j1]=sum;
                        if((dum=vv[i1]*fabs(sum))>=aamax){aamax=dum;imax=i1;}}
                if (j1 != imax) {
                  for(l=0;l<n;l++) {
                          dum=a[imax][l];a[imax][l]=a[j1][l];a[j1][l]=dum;}
                        *d = -(*d);vv[imax]=vv[j1]; }
        indx[j1]=imax;
        if (a[j1][j1] == 0.0) a[j1][j1]=TINY;
        if (j1 != n) {dum=1.0/(a[j1][j1]);
                for(i1=j1+1;i1<n;i1++) a[i1][j1] *= dum;}
        } free(vv);
}
#undef TINY
void finsol(float **a‘int n‘int *indx‘float *b) {
        int i‘ii‘ip‘j;     float sum;
        ii=-1;
        for(i=0;i<n;i++) {
                ip=indx[i];sum=b[ip];b[ip]=b[i];
                if (ii != -1){for(j=ii;j<i;j++) sum -= a[i][j]*b[j];}
                else if (sum!=0.) ii=i; b[i]=sum;}
        for(i=n-1;i>=0;i--) {
                sum=b[i];if(i<(n-1)){
                        for(j=i+1;j<n;j++) sum -= a[i][j]*b[j];}b[i]=sum/a[i][i];}
}
void solveq(int n‘float **a‘float *b‘int itype‘float *dd‘int *indx){
        int l ;
        dcompos(a‘n‘indx‘dd);for(l=0;l<n;l++) *dd*=a[l][l];          finsol(a‘n‘indx‘b);return;
}
```

```
//          friction function      //
//            ********
double fr(int i‘float qf){
        float sf1‘sf=7.‘re‘de;double visc;
        if(unit==1)visc=1.301e-6;if(unit==2)visc=1.201e-5;
        re=1.27374*fabs(qf)/(d[i]*visc);de=prof[i]/d[i];
        if(re<2100){if(re<100) return .64; else return 64./re;}
        else{   do{ sf1=sf; sf=1.14-2.*log10(de+9.35*sf1/re);}
                while (fabs(sf-sf1)>1.e-6);
                return 1./sf/sf;}
 }
//         node demand  //
float dnt(int nd‘float t){
        int i‘j;float q1;float tv1[25]‘qgn1[25];
        i=nd;
        for(j=0;j<20;j++){qgn1[j]=nqg[i][j];tv1[j]=tvg[i][j];}
                if((tqg[i]>=0.)&&(t>tqg[i])){// t.grad.change node i
                if(t>=tv1[19])  qj[i]=qgn1[19];
                if(t<tv1[19])
                        for(j=0;j<20;j++)
                                if((t>=tv1[j]) && (t<tv1[j+1])) {
                                qj[i]=(t-tv1[j])/(tv1[j+1]-tv1[j]);qj[i]*=(qgn1[j+1]-qgn1[j]);
                                qj[i]+=qgn1[j];break;}              }
        if(tqs[i]>=0.){ // t.sudden change node i
                if(t<tqs[i])  qj[i]=nqs1[i];if(t>=tqs[i]) qj[i]=nqs2[i];}return q1=qj[i];}
float pres(int nr‘float t){
        float p;
         return p=(reswl[nr]);
}
float ptan(int nt‘float t){
        float p;
         return p=(tankwl[nt]);
}
float kli1(int nv‘float t){
        int l‘n‘j;float kl1 ‘kli1[25]‘pot1[25];
        n=nv;
        for(j=0;j<20;j++){kli1[j]=kli[n][j];pot1[j]=pot[n][j];}
        if(vlvg[n]==1){                     // 1=vlv theres graduate
                if(t<= tgv0[n])  openv = pgv0[n];
                else if (t > tgv0[n] && t < tgv1[n]){
                openv=(t-tgv0[n])/(tgv1[n]-tgv0[n]); openv*=(pgv1[n]-pgv0[n]);openv+=pgv0[n];}
                else if (t >= tgv1[n] && t < tgv2[n]){
                        openv=(t-tgv1[n])/(tgv2[n]-tgv1[n]);
                        openv*=(pgv2[n]-pgv1[n]);openv+=pgv1[n];}
                else if (t >= tgv2[n]) openv = pgv2[n];}
        if(vlvs[n]==1){ //1=vlv  sudden  c/o
                        if(t<tsv[n]) openv=psv0[n];if(t>=tsv[n]) openv=psv1[n];}
        if(vlvai[n]==1){openv=pai[n]; }
        for(l=0;l<11-1;l++){if((openv >= pot[n][l]) && (openv <= pot[n][l + 1]))goto v85;}
v85:ki[n]=(openv - pot[n][l]) / (pot[n][l + 1] - pot[n][l]);
```

```
        ki[n] = kli[n][l] + ki[n] * (kli[n][l+1] - kli[n][l]);
        if(ki[n]==0) ki[n]=1e-6;kl1=ki[n];
        return kl1=ki[n];
}

float rpmc(int npm‘float t‘int ip2){
        int j‘j1‘pc;
         float rpm1‘qq;float qp[100]‘hp[100]‘pp[100];
         j=npm;          pc=pmpcp[j];
        for (j1=0;j1<pc;j1++){
                 qp[j1]=pmpq[j][j1];hp[j1]=pmpp[j][j1];
                 pp[j1]=pmpt[j][j1];}
                if((t<bts[j])&&((bts[j]<btf[j])||(btf[j]<0))) goto pmp20;
                if((t<btf[j])&&((btf[j]<bts[j])||(bts[j]<0))) goto pmp20;
         qq=v[ip2]*ar[ip2];
         if((qq<0)||(rpm[j]<= 0)){qq=0;rpm[j]=0; goto pmp20;}
        if((bts[j]<0)&&(btf[j]<0)){
                 if(pmpst[j]==3) {goto pmp20;}//3=active
                 if(pmpst[j]==4) {rpm[j]= 0;goto pmp20;}}//4=inactive
         if(bts[j]<0){if(t<btf[j]){
                 if(pmpst[j]==3){goto pmp20;}}if(t>btf[j]){goto pmp15;}}
         if(btf[j]<0){if(t<bts[j]){
                 if(pmpst[j]==4) {rpm[j]= 0;goto pmp20;}}if(t>bts[j]){goto pmp18;}}
         if(btf[j]<bts[j]){
                 if(t<btf[j]){if(pmpst[j]==3) {goto pmp20;}}
                 if((t>btf[j])&&(t<bts[j])){goto pmp15;}
                 if(t>bts[j]){goto pmp18;}}
         if(bts[j]<btf[j]){
                 if(t<bts[j]){if(pmpst[j]==4){rpm[j]= 0;goto pmp20;}}
                if((t>bts[j])&&(t<btf[j])){goto pmp18;}
                if(t>btf[j]){goto pmp15;}}
 pmp15:if(pmpwr[j] > 0){
                if (qq < qp[0]){tn2[j] = pp[0];}
                else if (qq > qp[pc-1]){tn2[j] = pp[pc-1];}
                else
                    for(j1=0;j1<pc-1;j1++){
                        if(qq >=qp[j1] && qq <= qp[j1+1]){
                                tn2[j]=pp[j1];
                                tn2[j]+=(qq-qp[j1])*(pp[j1+1]-pp[j1])/(qp[j1+1]-qp[j1]);
                                break;}}
                rpm[j] = rpm[j] -tn2[j] * delt;
           }
                else{rpm[j] = rpm[j] +(0-rpmn[j])/tfp[j]*delt;}
                if (rpm[j]<=0){ rpm[j]=0;pmpst[j]=4;}
                goto pmp20;
//          pumps restarting         //
pmp18:;
        if(t<(bts[j] + tsp[j])) rpm[j] = rpm[j] + delt* rpmn[j] / tsp[j];
        else if(t>=(bts[j] + tsp[j]))rpm[j] = rpmn[j];
pmp20:;
                rpm1=rpm[j];
                return rpm1;
```

```
}

float dlhi(i){
        int j‘ju‘jd;float dh;
                ju=pipju[i];jd=pipjd[i];
                        for(j=0;j<nn;j++){
                                if(ju==nodid[j]) {jup[i]=(nodgl[j]+hm[j]);}
                                if(jd==nodid[j]) {jdp[i]=(nodgl[j]+hm[j]);}}
                        for(j=0;j<npmp;j++){
                                if(ju==pmpid[j]) {jup[i]=(hpmp2[j]+pmpgl[j]);}
                                if(jd==pmpid[j]) {jdp[i]=(hpmp1[j]+pmpgl[j]);}}
                        for(j=0;j<nvlv;j++){
                                if(ju==vlvid[j]) {jup[i]=(hvlv2[j]+vlvgl[j]);}
                                if(jd==vlvid[j]) {jdp[i]=(hvlv1[j]+vlvgl[j]);}}
                        for(j=0;j<ntank;j++){
                                if(ju==tankid[j]) {jup[i]=(tankwl[j]);}
                                if(jd==tankid[j]) {jdp[i]=(tankwl[j]);}}
                        for(j=0;j<nres;j++){
                                if(ju==resid[j]) {jup[i]=(reswl[j]);}
                                if(jd==resid[j]) {jdp[i]=(reswl[j]);}}
                        return dh=jup[i]-jdp[i];
}
// boundary fun //
void boundary(){
                nj=0;if(t>0)it++;
        if(t==0){
                for(j=0;j<nn;j++)       {nhglu[j]=0;nhgld[j]=0;}
                for(j=0;j<ntank;j++){nptu[j]=0;nptd[j]=0;}
                for(j=0;j<nres;j++) {npru[j]=0;nprd[j]=0;}
                for(j=0;j<nvlv;j++) {npvu[j]=0;npvd[j]=0;}
                for(i=0;i<np;i++){ju=pipju[i];jd=pipjd[i];
                    for(j=0;j<nn;j++){
                        if(ju==nodid[j]) {
                            pjugl[i]=nodgl[j];  nhgld[j]++;elvu[i]=pjugl[i];
                            p[i]=(nodgl[j]+h0[j]);h[i]=p[i]-pjugl[i];}
                                if(jd==nodid[j]) {pjdgl[i]=nodgl[j];nhglu[j]++;}}
                        for(j=0;j<npmp;j++){
                            if(ju==pmpid[j]) {
                                pjugl[i]=pmpgl[j];elvu[i]=pjugl[i];
                                p[i]=(hpmp2[j]+pmpgl[j]);h[i]=p[i]-pjugl[i];}
                                if(jd==pmpid[j]) {pjdgl[i]=pmpgl[j];}}
                        for(j=0;j<nvlv;j++){
                            if(ju==vlvid[j]) {
                               pjugl[i]=vlvgl[j];npvd[j]++;elvu[i]=pjugl[i];
                                p[i]=(hvlv2[j]+vlvgl[j]);h[i]=p[i]-pjugl[i];}
                                if(jd==vlvid[j]) {pjdgl[i]=vlvgl[j];npvu[j]++;}}
                        for(j=0;j<ntank;j++){
                                if(ju==tankid[j]) {
                                        pjugl[i]=tankgl[j];nptd[j]++;elvu[i]=pjugl[i];
                                        p[i]=(tankwl[j]);h[i]=p[i]-pjugl[i];}
                                if(jd==tankid[j]) {
                                        pjdgl[i]=tankgl[j];nptu[j]++;elvu[i]=pjdgl[i];}}
                        for(j=0;j<nres;j++){
```

```
                    if(ju==resid[j]) {
                                pjugl[i]=resgl[j];nprd[j]++;elvu[i]=pjugl[i];
                                p[i]=(reswl[j]);h[i]=p[i]-pjugl[i];}
                   if(jd==resid[j]) {pjdgl[i]=resgl[j];nprd[j]++;elvu[i]=pjdgl[i];}}
          }
        for(i=0;i<np;i++){ju=pipju[i];jd=pipjd[i];
                for(j=0;j<ntank;j++){
                        if(ju==tankid[j]) elvu[i]=pjugl[i];if(jd==tankid[j]) elvu[i]=pjdgl[i];  }
                 for(j=0;j<nres;j++){
                        if(ju==resid[j]) elvu[i]=pjugl[i];if(jd==resid[j]) elvu[i]=pjdgl[i];}
          }
        for(i=0;i<npmp;i++) {btf[i]=2*delt;tfp[i]=4*delt;}
        for(i=0;i<nvlv;i++) {tsv[i]=2*delt;}
        for(i=0;i<np;i++){
                si0=1;si1=1/(ro*a[i]);si2=1;si3=1/(-ro*a[i]);
                eta00[i]=si0*v[i]+si1*p[i];eta0[i]=eta00[i];
                eta01[i]=si2*v[i]+si3*p[i];eta1[i]=eta01[i];dlh[i]=dlhi(i);}
}
if(t>0){
        for(i=0;i<np;i++){ju=pipju[i];jd=pipjd[i];
                s0=.5;s1=.5;s2=.5*ro*a[i];s3=-.5*ro*a[i];
                si0=1;si1=1/(ro*a[i]);si2=1;si3=-1/(ro*a[i]);
                for(j=0;j<ntank;j++){
                        if((ju==tankid[j])){ nj++;
                                eta20=eta1[i]; pt=ptan(j‘t);ds0=.5*ro*a[i];ds1=-.5*ro*a[i];
                                alfa0=-ds1/ds0;beta0=1/ds0;  eta0[i]=alfa0*eta20+beta0*pt;
                }}
                for(j=0;j<nres;j++){
                        if((ju==resid[j])){nj++;
                                eta20=eta1[i]; pr=pres(j‘t);ds0=.5*ro*a[i];ds1=-.5*ro*a[i];
                                alfa0=-ds1/ds0;beta0=1/ds0;  eta0[i]=alfa0*eta20+beta0*pr;
                }}
                for(j=0;j<ntank;j++){
                        if((jd==tankid[j])){ nj++;
                                eta10=eta0[i];dlh[i]=dlhi(i);pt=ptan(j‘t)+dlh[i];
                                ds2=.5*ro*a[i];ds3=-.5*ro*a[i];
                                alfa1=-ds2/ds3;beta1=1/ds3;  eta1[i]=alfa1*eta10+beta1*pt;
                }}
                for(j=0;j<nres;j++){
                        if((jd==resid[j])){nj++;
                                eta10=eta0[i];dlh[i]=dlhi(i);pr=pres(j‘t)+dlh[i];
                                ds2=.5*ro*a[i];ds3=-.5*ro*a[i];
                                alfa1=-ds2/ds3;beta1=1/ds3;  eta1[i]=alfa1*eta10+beta1*pr;
                }}
                for(j=0;j<nn;j++){
                        if((jd==nodid[j])&&(nhglu[j]==1)&&(nhgld[j]==0)){nj++;
                                eta10=eta0[i]; vn=dnt(j‘t)/ar[i];if(vn<0)vn=0;
                                ds2=.5;ds3=.5;
                                alfa1=-ds2/ds3;beta1=1/ds3;  eta1[i]=alfa1*eta10+beta1*vn;
                }}
                for(j=0;j<nvlv;j++){
```

```
                if((jd==vlvid[j])&&(npvu[j]==1)&&(npvd[j]==0)){nj++;
                        eta10=eta0[i];
                        kl1=kli1(j‘t);b1=kl1/(2*g);b2=-1;b3=0;
                        a1=si0;a2=si1;a3=eta0[i]; a11=si2;a21=si3;
                        vf=a1*b2*a1*b2-4*a2*b1*(b2*a3-b3*a2);
                        vf=pow(vf‘.5);          vf=(a1*b2+vf)/(2*a2*b1);
                        if (vf<0)vf=0;
                        ds2=.5;ds3=.5;
                        alfa1=-ds2/ds3;beta1=1/ds3;  eta1[i]=alfa1*eta10+beta1*vf;
}}}
for(j=0;j<nn;j++){
        if((nhglu[j]+nhgld[j])>1){nj++;
                hglu=nhglu[j];hgld=nhgld[j];hgl=hglu+hgld;
                rs0=0;rs1=0;rj0=qj[j];rj1=0;l1=0;
                // pipe renum with l1 begin pipe in then out
        for(i1=0;i1<2*hgl;i1++){
                for(j1=0;j1<hgl;j1++)jb[j1][i1]=0;
                for(j1=0;j1<2*hgl;j1++)sb[i1][j1]=0;}
          for(i=0;i<np;i++){ jd=pipjd[i];if(jd==nodid[j]) {i0=i;break;}}
          etau[l1]=eta0[i0]; jb[0][0]=ar[i0];for(j1=1;j1<hgl;j1++)jb[j1][1]=1;
          sb[0][0]=.5;sb[0][1]=.5;
          sb[1][0]=.5*ro*a[i0];sb[1][1]=-.5*ro*a[i0];
          for(i=0;i<np;i++){jd=pipjd[i];
              if((jd==nodid[j])&&(i0!=i)) {l1++;l2=2*l1;
                 etau[l1]=eta0[i];
                 jb[0][l2]=ar[i];jb[l1][l2+1]=-1; sb[l2][l2]=.5;sb[l2][l2+1]=.5;
                 sb[l2+1][l2]=.5*ro*a[i];sb[l2+1][l2+1]=-.5*ro*a[i];  etau[l1]=eta0[i];
          } }
          for(i=0;i<np;i++){   ju=pipju[i];
               if(ju==nodid[j]) {l1++; l2=2*l1;
                   etad[l1]=eta1[i]; jb[0][l2]=-ar[i]; jb[l1][l2+1]=-1;
                    sb[l2][l2]=.5;sb[l2][l2+1]=.5;
                    sb[l2+1][l2]=.5*ro*a[i]; sb[l2+1][l2+1]=-.5*ro*a[i];
                     etad[l1]=eta1[i];
          } }
          for(i1=0;i1<hgl;i1++)for(j1=0;j1<2*hgl;j1++){
                    js[i1][j1]=0;
                    for(i2=0;i2<2*hgl;i2++){ js[i1][j1]+=jb[i1][i2]*sb[i2][j1];
          }}
           //ncc[]:system const;right side
           //nc[][]:system coeff(max 4*4)
          for(i1=0;i1<hgl;i1++){ncc[i1]=0;
          for(j1=0;j1<2*hgl;j1++)jc[i1][j1]=js[i1][j1];}
          ncc[0]=rj0;
          for(j1=0;j1<hgl;j1++){
              if(j1>0){dlh[i0]=dlhi(i0);ncc[j1]+=dlh[i0];}  j2=0;
              for(i=0‘i1=0;i<np;i++){jd=pipjd[i];
                  if(jd==nodid[j]) {if(i==i0)goto b1; j2++;
                     if((j2==j1)&&(j1>0)){
                          dlh[i]=dlhi(i);ncc[j1]+=-dlh[i];}
                      b1:
    ncc[j1]-= jc[j1][2*i1]*eta0[i];nc[j1][i1]= jc[j1][2*i1+1]; i1++;
```

```
                    } }
                    for(i=0‘i2=hglu;i<np;i++){ ju=pipju[i];
                        if(ju==nodid[j]) {
                            ncc[j1]-= jc[j1][2*i2+1]*eta1[i]; nc[j1][i2]= jc[j1][2*i2];
                                    i2++;
                    }  } }
                l1=0;
                solveq(hgl‘nc‘ncc‘itype‘dd‘indx);
                    for(i=0;i<np;i++){jd=pipjd[i];
                        if(jd==nodid[j]){ eta0[i]=etau[l1];  eta1[i]=ncc[l1];
                        l1++;
                    } }
                    for(i=0;i<np;i++){ ju=pipju[i];
                        if(ju==nodid[j]){ eta1[i]=etad[l1];eta0[i]=ncc[l1];
                        l1++;
        } }}
}
for(j=0;j<npmp;j++){nj++;jpd=pmpid[j];
            rj0=0‘rj1=0; rs0=0;rs1=0;
            b1=ap[j];b2=bp[j];b3=cp[j];b10=klp[j][0]/(2*g);b20=-1;b30=0;
        for(i=0;i<np;i++){jd=pipjd[i];
            if(jd==jpd) {ppu=i;
                eta10=eta0[i]; s0=.5;s1=.5; s2=.5*ro*a[i];s3=-.5*ro*a[i];
                si0=1;si1=1/(ro*a[i]); si2=1;si3=-1/(ro*a[i]);
                a1=si0;a2=si1;a3=eta0[i];a20=si3; dlh[i]=dlhi(i);
                p10=a2*(hpm[j]-dlh[i]); p20=-a20*(hpm[j]-dlh[i]);
                je0=ar[i];je1=0;je2=0;je3=1;
                js10=je0*s0+je1*s2;js11=je0*s1+je1*s3;
                js12=je2*s0+je3*s2;js13=je2*s1+je3*s3;
                break;
        } }
        for(i1=0;i1<np;i1++){ju=pipju[i1];
            if(ju==jpd) {ppd=i1;
                eta20=eta1[i1];
                s0=.5;s1=.5; s2=.5*ro*a[i1];s3=-.5*ro*a[i1];
                si0=1;si1=1/(ro*a[i1]); si2=1;si3=-1/(ro*a[i1]);
                a4=si2;a5=si3;a6=eta1[i1];
                je0=ar[i1];je1=0;je2=0;je3=1;
                js20=je0*s0+je1*s2;js21=je0*s1+je1*s3;
                js22=je2*s0+je3*s2;js23=je2*s1+je3*s3;
                    break;
                }
        }
        {  det=js13*js20-js11*js22;
            gama0=(js13*js10-js11*js12)/det; gama1=(js11*js23-js13*js21)/det;
            gama2=(js22*js10-js20*js12)/det; gama3=(js20*js23-js22*js21)/det;
            del0=-js13/det;del1=js11/det; del2=-js22/det;del3=js20/det;
        p1=-b1;p2=-b2-a4/a5+a1*ar[ppd]/(ar[ppu]*a2);
        p3=-b3+a6/a5-a3/a2;
        }
        vd=v0[ppd];   pmph0=(b1*vd*vd+b2*vd+b3);
        rpm0=rpm[j];rpm1=rpm[j]/rpmn[j];  rpm2=pow(rpm[j]/rpmn[j]‘2);
```

```
        vd=(-p2+pow((p2*p2-4*p1*p3)‘.5))/(2*p1)*rpm1;
        pmph[j]=(b1*vd*vd+b2*vd+b3)*rpm2;pmph1=pmph[j];
        rpm[j]=rpmc(j‘t‘ppd); rpm1=rpm[j]/rpmn[j]; rpm2=pow(rpm[j]/rpmn[j]‘2);
        vd=(-p2+pow((p2*p2-4*p1*p3)‘.5))/(2*p1)*rpm1;
        pmph[j]=(b1*vd*vd+b2*vd+b3)*rpm2;pmph2=pmph[j];
        dlh[ppu]=dlhi(ppu);hpm[j]=pmph[j];
        p10=a2*(hpm[j]-dlh[ppu]);p20=-a20*(hpm[j]-dlh[ppu]);
            if((t<bts[j])&&((bts[j]<btf[j])||(btf[j]<0)))        rj1=0;
            else if((t<btf[j])&&((btf[j]<bts[j])||(bts[j]<0)))  rj1=0;
            else   rj1=-3.6*(pmph2-pmph1);
            if(rpm1>0){vd1=vd;printf("vd0=%f\n"‘vd1);}
            if((rpm[j]>0)){
                vd=(-p2+pow((p2*p2-4*p1*p3)‘.5))/(2*p1)*rpm1;
                if(vd>0){
                   vs=vd*ar[ppd]/ar[ppu];
                   eta0[ppd]=gama0*eta10+gama1*eta20;
                   eta0[ppd]+=del0*rj0+del1*rj1+p10;
                   eta1[ppu]=gama2*eta10+gama3*eta20;
                   eta1[ppu]+=del2*rj0+del3*rj1+p20;
            } }
            if((rpm[j]==0)){
                    vd=vd1; vs=vd*ar[ppd]/ar[ppu];
                    eta0[ppd]=gama0*eta10+gama1*eta20;
                    eta0[ppd]+=del0*rj0+del1*rj1+p10;
                    eta1[ppu]=gama2*eta10+gama3*eta20;
                    eta1[ppu]+=del2*rj0+del3*rj1+p20;
            }
            if((v[ppd]<=0)){
                    vd=0;  vs=vd*ar[ppd]/ar[ppu]; dh=b10; rj1=dh*vd*vd;
                    p10=a2*(dlh[ppu]);p20=-a20*(dlh[ppu]);
                    eta0[ppd]=gama0*eta10+gama1*eta20;
                    eta0[ppd]+=10*(del0*rj0+del1*rj1+p10);
                    eta1[ppu]=gama2*eta10+gama3*eta20;
                    eta1[ppu]+=10*(del2*rj0+del3*rj1+p20);
 } }
for(j=0;j<nvlv;j++){ nj++;
        if((npvu[j]+npvd[j])>1){ jvd=vlvid[j];
            rj0=0;rj1=0;  rs0=0;rs1=0; kl1=kli1(j‘t); b1=kl1/(2*g);b2=-1;b3=0;
            for(i=0;i<np;i++){jd=pipjd[i];
                if(jd==jvd) {vpu=i;
                        eta10=eta0[i];
                        s0=.5;s1=.5; s2=.5*ro*a[i];s3=-.5*ro*a[i];
                        si0=1;si1=1/(ro*a[i]); si2=1;si3=-1/(ro*a[i]);
                        a1=si0;a2=si1;a3=eta0[i];a11=si2;a21=si3;
                        p10=-si1*dlh[i];p20=si3*dlh[i];
                        je0=ar[i];je1=0;je2=0;je3=1;
                        js10=je0*s0+je1*s2;js11=je0*s1+je1*s3;
                        js12=je2*s0+je3*s2;js13=je2*s1+je3*s3;
                        break;
             } }
            for(i1=0;i1<np;i1++){ju=pipju[i1];
```

```
                        if(ju==jvd) {vpd=i1;
                                eta20=eta1[i1];
                                 s0=.5;s1=.5; s2=.5*ro*a[i1];s3=-.5*ro*a[i1];
                                 si0=1;si1=1/(ro*a[i1]); si2=1;si3=-1/(ro*a[i1]);
                                 a4=si2;a5=si3;a6=eta1[i1];
                                 je0=ar[i1];je1=0;je2=0;je3=1;
                                 js20=je0*s0+je1*s2;js21=je0*s1+je1*s3;
                                 js22=je2*s0+je3*s2;js23=je2*s1+je3*s3;
                                 break;
                         }}
                       det=js13*js20-js11*js22;
                       gama0=(js13*js10-js11*js12)/det; gama1=(js11*js23-js13*js21)/det;
                       gama2=(js22*js10-js20*js12)/det;gama3=(js20*js23-js22*js21)/det;
                       del0=-js13/det;del1=js11/det; del2=-js22/det;del3=js20/det;
                       v1=b1;v2=-a1*b2*ar[vpd]/(a2*ar[vpu])+b2*a4/a5;
                       v3=-b3+b2*(a3/a2-a6/a5-dlh[vpu]);
                       vd=(-v2+pow((v2*v2-4*v1*v3)‘.5))/(2*v1);
                       if(vd<0)vd=0; vs=vd*ar[vpd]/ar[vpu];  v[vpd]=vd;v[vpu]=vs;
                       rj1=0.12*b1*vd*vd;if(openv==100)rj1=0;
                       eta0[vpd]=gama1*eta20+gama0*eta10;
                       eta0[vpd]+=1*(del0*rj0+.1*del1*(rj1)+p10);
                       eta1[vpu]=gama2*eta10+gama3*eta20;
                       eta1[vpu]+=1*(del2*rj0+.1*del3*(rj1)+p20);
                } }
        }// t >0
 }// end boundary function

//* RUKUST FUNCTION  */
void rukus(float t‘float dt ‘float *y){
 int i;int nm; float *yt‘*dy1‘*dyt‘*dym; float dth‘th;
nm=nq+nh;
yt=(float *)calloc(nm‘sizeof(float));
dy1=(float *)calloc(nm‘sizeof(float));
dyt=(float *)calloc(nm‘sizeof(float));
dym=(float *)calloc(nm‘sizeof(float));
dth=.5*dt; th=t+dth;
 slope(t‘y‘dy1); tea++;            // 1st sub-step
 for(i=0;i<nqh;i++) {yt[i]=y[i]+dth*dy1[i];}
 slope(th‘yt‘dyt);                          // 2nd sub-step
 for(i=0;i<nqh;i++) {yt[i]=y[i]+dth*dyt[i];}
 slope (th‘yt‘dym);                // 3rd sub-step
 for(i=0;i<nqh;i++) {yt[i]=y[i]+dt*dym[i];dym[i]+=dyt[i];}
 slope (t+dt‘yt‘dyt);              // 4th sub-step
 for(i=0;i<nqh;i++) {y[i]+=dt*((dy1[i]+dyt[i])/6.+dym[i]/3.);}
 }
//        End of function ruku4s
void ruku(float *dx‘float xb‘float xe‘float er‘float *y‘float *yt){
   int i‘cof=0;
```

```
  float errm‘ytty‘dt‘dt5‘x1‘x2‘*yori;
  float tol=1.e-5‘h1=.01‘hmin=1.e-5;
        yori=(float*)calloc(nq+nh‘sizeof(float));
        x1=xb; dt=*dx;x2=xe;if((x2-x1)<0) dt=-dt;n2++;
L1: for(i=0;i<nqh;i++) {yt[i]=y[i]; yori[i]=y[i];}
        t=x1;if(t==0) t=.000000001;  if((t+dt-xe)*(t+dt-xb)>0) dt=x2-t;
L2: dt5=.5*dt;
        rukus(t‘dt5‘y);cof++;   // Solve with 1/2 inc
        rukus(t+dt5‘dt5‘y);tea=0;
        rukus(t‘dt‘yt);                    // Solve with full inc.
        errm=0.;x1=t+dt;
 for(i=0;i<nqh;i++){ yt[i]=y[i]-yt[i];
         if(fabs(y[i])<1.e-7) ytty=yt[i]/(y[i]+1.e-7);    else ytty=yt[i]/y[i];
         errm=max(errm‘fabs(ytty));}
 if(errm==0.){dt*=3.;goto L3;}
 else  {   errm/=er; dt/=pow(errm‘.2);
         if(fabs(dt)<1.0e-25){ printf("dt=0 and no solution\n"); return;}
         if(errm>1){for(i=0;i<nqh;i++){yt[i]=yori[i];y[i]=yori[i];} goto L2;}}
  for(i=0;i<nqh;i++) {y[i]+=yt[i]/15.;}
L3: if(x1==x2) return;
  goto L1;
}
// End of function rukust
//**********************
//         **********
//         FUNCTION  SolvEqs
//         **********
#define TINY 1.0e-20;
void dcompos(float **a‘int n‘int *indx‘float *d) {
        int i1‘imax‘j1‘l;
        float aamax‘dum‘sum‘temp;float *vv;
        vv=(float*)calloc(n‘sizeof(float)); *d=1.0;
        for(i1=0;i1<n;i1++) {
                aamax=0.0;
                for(j1=0;j1<n;j1++) if((temp=fabs(a[i1][j1]))>aamax) aamax=temp;
                if (aamax == 0.0) printf("S.mat at row %3d\t"‘i1);vv[i1]=1.0/aamax;}
        for(j1=0;j1<n;j1++) {
            for(i1=0;i1<j1;i1++) {
                sum=a[i1][j1]; for(l=0;l<i1;l++) sum -= a[i1][l]*a[l][j1];a[i1][j1]=sum;}
          aamax=0.0;
            for(i1=j1;i1<n;i1++) {
                sum=a[i1][j1];
                for(l=0;l<j1;l++)sum -= a[i1][l]*a[l][j1];
                a[i1][j1]=sum; if((dum=vv[i1]*fabs(sum))>=aamax){aamax=dum;imax=i1;}}
          if (j1 != imax) {
             for(l=0;l<n;l++){
                dum=a[imax][l];a[imax][l]=a[j1][l]; a[j1][l]=dum;} *d = -(*d);vv[imax]=vv[j1];  }
        indx[j1]=imax;
        if (a[j1][j1] == 0.0) a[j1][j1]=TINY;  if (j1 != n) {dum=1.0/(a[j1][j1]);
```

```
        for(i1=j1+1;i1<n;i1++) a[i1][j1] *= dum;}
        } free(vv);
}
#undef TINY
void finsol(float **a‘int n‘int *indx‘float *b){
        int i‘ii‘ip‘j;     float sum;
        ii=-1;
        for(i=0;i<n;i++) {
                ip=indx[i];sum=b[ip];b[ip]=b[i];
                if (ii != -1){for(j=ii;j<i;j++) sum -= a[i][j]*b[j];} else if (sum!=0.) ii=i; b[i]=sum;}
        for(i=n-1;i>=0;i--) {
                sum=b[i];if(i<(n-1)){for(j=i+1;j<n;j++) sum -= a[i][j]*b[j];}b[i]=sum/a[i][i];}
}
void solveq(int n‘float **a‘float *b‘int itype‘float *dd‘int *indx){
  int l ;
  dcompos(a‘n‘indx‘dd);   for(l=0;l<n;l++) *dd*=a[l][l];  finsol(a‘n‘indx‘b);
  return;
}
```

- المراجع: Books

1- Chadhry M. H ،*Applied Hydraulic Transient* ،Van Nostrand Reinhold ،New York ،(1979).

2- Fox J.A. ،*Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Networks* ،Macmillan ،London.

3- Larock B. E. ،Jeppson R. W. ،Watters G Z. ،*Hydraulic of Pipeline Systems* ،CRC Press LLc ، Washinton.D.C.

4- Nekrasv B. ،*Hydraulic*s ،Peace Publishers ،Moscow.

5- Piskunov N. ،*Differential and Integral Calculus* ،vol. II. ،Mir Publishers Moscow ،(1974).

6- Sharp B. B. & Sharp D.B. ،*Water Hammer: Practical Solutions* ،B.B. Sharp and D.B. Sharp ، Sydney ،Australia ،1996.

7- Volkov E. A. ،*Numerical Method* ،Mir Publishers Moscow ،(1986).

8- Wylie E. B. and Streeter V.L. ،*Fluid Transients* ،MOGraw Hill Inc ،USA ،(1989).

9- Wylie E. B. and Streeter V.L. ،*Fluid Transients* ،MOGraw Hill Inc ،USA ،(1993).

10- Bouttes J. ،*Mecanique Des Fluides* ،Ellipses،Paris،(1988).

11- Batterton S. ،*Water Hammer :Implicit Characteristic* Master Thesis ،Virginia،2006.

12- Tijsseling A. S. and Bergant A. *Meshless Computation of Water Hammer* Endhoven University of Technology.

13- حقي، د. خير الدين،" اتقاء الصدمة في المشاريع المائية"، مطبوعات دار المعرفة، (1992).

14- السعدي، د. قتيبة، زينو، د.امجد،" محطات الضخ" ، مطبوعات جامعة دمشق، (2000).

15- معلا، د. وائل،" الجريان غير المستقر في الأنابيب"، مطبوعات جامعة دمشق، (1992).

16- معلا، د. وائل، " استخدام االنمذجة الرياضية في دراسة ظاهرة المطرقة المائية و تحليلها" ، مجلة جامعة دمشق- المجلد (8)، العددان:-31-32-، (1992).

17- معلا، د. وائل، زينو، د.امجد، " مبادئ الهيدروليك الهندسي" ، مطبوعات جامعة دمشق، (2006).