

هيدروليكا نظم الري بالرش

Hydraulics of Sprinkle Irrigation Systems

(٤, ١) مقدمة

هناك عامل هام يجب أخذه في الاعتبار عند تصميم أي نظام ري وهو التصميم الهيدروليكي. حيث أن إهمال هذا العامل سوف يؤدي إلى نظام ري غير جيد من حيث التصميم وبالتالي من حيث كفاءة الري. يعتمد نظام الري بالرش أساساً على ضخ الماء في شبكة من الأنابيب تبدأ من مصدر المياه وحتى خروجه من الرشاشات، والتصميم السليم يتطلب اتباع الخطوات الصحيحة التي تستند إلى معرفة ودراسة أساسيات تدفق المياه تحت ضغط في الأنابيب.

أن خصائص السريان في شبكات أنابيب الري بالرش معقدة نوعاً ما بسبب تغير التصرف على طول الأنابيب ووجود الكثير من اللواحق فضلاً عن التغيرات في المناسيب والارتفاعات. أن طرق التصميم التي يعتمدها مهندسو الري في هذا المجال تعتبر طرق تقريبية ومبسطة. إلا أنه يمكن القول بأن دقة هذه الطرق المبسطة في معالجة المسائل المعقدة لسريان المياه في شبكة أنابيب الري هي ضمن الخطأ المسموح به في التصميم ودقة المعلومات المتعلقة بالبيانات وعوامل التصميم المختلفة. وعند دراسة هيدروليكا نظم الري بالرش لا بد من دراسة وإيجاد الآتي:

١. فواقد الاحتكاك في الخطوط الفرعية والرئيسية.
٢. توزيع الضغط والتصرف في شبكة الأنابيب.

وهذا سوف يؤدي إلى استخدام أقطار الأنابيب الاقتصادية والمضخة المناسبة مما يقلل من التكاليف الأولية والتشغيلية، وبالتالي الحصول على نظام ري ذو كفاءة عالية.

(٤,٢) هيدروليكا نظم الري بالرش:

عند دراسة نظم الري بالرش لا بد من معرفة ميكانيكا سريان السوائل في الأنابيب حتى يمكن الوصول إلى التصميم الجيد وبالتالي إختيار نظام الري المناسب للحقل المراد ريه. كذلك يجب دراسة العوامل المؤثرة على هيدروليكا نظم الري بالرش أثناء التصميم حتى يمكن إيجاد الضاغظ الديناميكي الكلي المطلوب وبالتالي تعيين قدرة المضخة المطلوبة.

العوامل المؤثرة على هيدروليكا نظم الري بالرش:

هناك عوامل يجب اعتبارها عند دراسة هيدروليكا نظم الري بالرش هي :

١. كمية المياه المتاحة من المصدر بواسطة النظام.
٢. ضغط الماء الاستاتيكي الموجود.
٣. ضغط التشغيل المطلوب عند تدفق المياه.
٤. خصائص السريان للأنابيب والصمامات.
٥. فواقد الاحتكاك وسرعة السريان.
٦. الطرق المائي.
٧. تآدية الرشاش.

(٤,٣) أهمية التحليل الهيدروليكي : Importance of Hydraulic Analysis

يمكن ايجاز أهمية التحليل الهيدروليكي في النقاط التالية:

١. تقليل المخاطرة الاقتصادية :

عند تطبيق هيدروليكا نظام الري بالرش في التصميم نستطيع الابتعاد عن التخمين والحسابات التقديرية، وبالتالي تجنب الأخطاء المكلفة.

ب. الحصول على تصميم جيد :

عدم المعرفة بذلك يؤدي إلى مبالغة في التصميم (Overdesign) مثل إختيار قطر أو مضخة أكبر من الفعلي المطلوب. معتقداً أن ذلك يحفظ النظام من المشاكل، وهذا يؤدي إلى زيادة التكلفة بالنسبة للمزارع. أو نقص أساسي (عجز) في التصميم (Underdesign) مثل إختيار قطر أصغر من الفعلي المطلوب حتى يقلل التكاليف فيؤدي إلى زيادة الفوائد. ويمكن تجنب ذلك عند معرفة التحليل الهيدروليكي.

(٤،٤) العلاقة بين الضغط والضاغط : Pressure and Head Relationship

عندما يكون الماء في وعاء ما وفي حالة سكون يكون الضغط (P) عند أي نقطة مساوياً للوزن النوعي للمياه (γ_w) \times ارتفاع عمود المياه (h) فوق تلك النقطة. ويسمى ارتفاع المياه فوق تلك النقطة بضاغط الضغط Pressure head وأحياناً يسمى بالضاغط head. والضغط والضاغط هي طرق مختلفة للتعبير عن معنى واحد. حيث أن ($P = \gamma_w \cdot h$) وتستخدم وحدات كيلوبسكال (kPa) للتعبير عن الضغط بينما وحدة المتر (m) للتعبير عن الضاغط. ومن المعلوم أن الوزن النوعي للمياه عند 20°C يساوي 1000 كجم/م³، الكيلوبسكال يساوي 0.102 متر ضاغط مائي بينما 1 متر ضاغط مائي يعادل 9.81 كيلوبسكال من الضغط. ويجب ملاحظة أن الضاغط في نظم الري يتكون من عدة مكونات، وعند أي نقطة يمكن استخدام التعبيرات التالية:

- الضاغط الساكن (Static head (H_s)) عند أي نقطة: يساوي فرق الارتفاع بين تلك النقطة ومركز نقطة طرد المياه Discharge Point في ذلك النظام.
- ضاغط الضغط (Pressure head (h)): يساوي الضغط (P) عند تلك النقطة مقسوماً على الوزن النوعي للماء (γ_w).

- ضاغط السرعة (Velocity head) (h_v): هو الضاغط المطلوب لسريان الماء من حالة السكون إلى السرعة عند تلك النقطة. وهو يعادل حسابياً $\frac{V^2}{2g}$.
- ضاغط الاحتكاك (Friction head) (h_f): هو الطاقة المطلوبة لسريان الماء بين نقطتين على نفس الارتفاع ويعبر عنه بالتر من الماء.
- الارتفاع فوق المنسوب: هو ارتفاع تلك النقطة فوق منسوب ما يتم اختياره. ويكون الارتفاع (+) فوق المنسوب أو سالباً (-) أسفل المنسوب.

(٤,٥) تدفق المياه في الأنابيب: Water Flow In Pipes

تستخدم الأنابيب لنقل المياه إلى الرشاشات في نظم الري بالرش، ويحدث فواقد في الطاقة في خطوط الأنابيب بسبب احتكاك الماء مع السطح الداخلي لجدار الأنبوب وكذلك بسبب وجود الصمامات والمحابس الموجودة على امتداد الأنبوب واللازمة للتحكم في السريان وقياسه وكذلك تعتمد قيمة قطر الأنبوب وسماك جداره ومتانته على مقدار التصرف المنقول وعلى مقدار ضغط التشغيل لنظام الري.

أن خصائص السريان في شبكات أنابيب نظم الري بالرش معقدة للغاية بسبب تغير التصرف على طول الأنابيب وكذلك وجود الكثير من اللواحق (الصمامات والمحابس الخ) فضلاً عن التغيرات في المناسيب والارتفاعات على امتداد أنابيب الشبكة.

هناك نوعان من المسائل الهيدروليكية التي يتعامل بها مهندس تصميم شبكات أنابيب الري العاملة تحت ضغط هما:

أ. السريان في الأنابيب متعددة الفتحات التي يتناقص التصرف فيها باستمرار على طول امتداد الأنبوب كما يحدث في الخطوط الفرعية.

ب. السريان في الأنابيب ثابتة التصرف كما يحدث غالباً في الخط الرئيسي.

العوامل المؤثرة على التدفق في الأنابيب :

عند تدفق المياه داخل أنبوب يحدث انخفاض تدريجي للضغط وذلك بسبب الاحتكاك. ومن الناحية الهيدروليكية يمكن أن يكون السطح الداخلي للمحدر شديد الخشونة بالرغم من نعومة ملمسه الظاهري. وتعمل خشونة الجدار على إبطاء سرعة تدفق المياه بنفس الطريقة التي يسبب بها الاحتكاك قهدة لحركة جسم فوق سطح خشن. وبالتالي مع استخدام الأنابيب تزداد خشونة جدرانها عادة، فمثلا تسبب الحبيبات الصلبة في مياه الري خدوشا في السطح الداخلي لأنابيب الألومنيوم المتسقلة ومع طول فترة الاستعمال تحدث خدوش بالسطح. وفي حالة الأنابيب الصلب يبدأ حدوث الصدأ بها تدريجياً وتنتشر الحفر الصغيرة على الجدار ويمكن أيضا أن تلتصق بعض المكونات الكيميائية في المياه أو التجمعات البكتيرية على سطح الجدار الداخلي مما يزيد تدريجيا من خشونة الأنابيب ويقلل من قيمة القطر الداخلي وبالتالي يؤدي إلى حدوث فاقد في الضغط أكبر مما كان متوقعا للأنبوب وهو مازال جديداً. مثل هذه العوامل يأخذها المهندس المصمم عادة في حسبانها عند تصميم نظام ري جديد.

ولا تتوقف قيمة الفاقد في الضغط على الخشونة فقط، وإنما تعتمد أيضا على قيمة التصرف وقطر الأنبوب وطوله. فعند زيادة التصرف تزداد معه سرعة التدفق مما يسبب ارتفاعا كبيرا لقيمة الاحتكاك ينتج عنها فاقد أكبر في الضغط. وللتغلب على ذلك يمكن زيادة قطر الأنبوب المستعمل وهذا يعني زيادة التصرف وسرعات أقل للتدفق. ويؤثر طول الأنبوب بشكل مباشر على الفاقد في الضغط، فكلما طالت المسافة التي تقطعها المياه زاد تعرضها للاحتكاك وارتفعت قيمة الفاقد في الضغط. وتأخذ العلاقات التي تربط العوامل السابقة مع بعضها البعض صورا معقدة وتقع على عاتق المهندس المصمم مسؤولية تفهم هذه العلاقات واستخدامها في اختيار القطر المناسب.

وقبل الشروع في بيان فواقد الطاقة المختلفة، وتأثير اختلاف المناسيب والميول، سوف نتطرق بإيجاز إلى ذكر أهم وأشهر معادلتين في ميكانيكا السريان في الأنابيب وهما : معادلة الاستمرارية، ومعادلة الطاقة، اللتان تعدان المفتاح لحل الكثير من مسائل التدفق في الأنابيب.

معادلة الاستمرارية Continuity Equation :

في الظروف العادية يعتبر الماء غير قابل للانضغاط، وعلى ذلك يكون حجم الماء المار في مقطع معين للأنبوب خلال زمن معين يساوي الحجم المار في مقطع آخر لنفس الأنبوب ولنفس الزمن، أي أن التصرف يكون متساوياً في جميع المقاطع. أما إذا كان هناك تفرع أو تقابل لعدة أنابيب عند موضع معين فإن مجموع التصرفات الداخلة إلى نقطة الاتصال بينها يساوي مجموع التصرفات الخارجة منها. ويجب ملاحظة أن التصرف في أنبوب خط الرشاشات يتناقص باستمرار في اتجاه الطرف الحر. يعبر عن معادلة الاستمرارية في حالة السريان باتجاه واحد بالصورة التالية:

$$Q = AV \quad (٤,١)$$

حيث أن:

$$Q = \text{معدل التدفق الحجمي (م}^3/\text{ث).}$$

$$A = \text{مساحة المقطع الداخلي للأنبوب (م}^2\text{).}$$

$$V = \text{متوسط سرعة الجريان (م/ث).}$$

معادلة الطاقة Energy Equation :

هناك ثلاث مكونات رئيسية لطاقة الماء الذي يمر خلال مقطع معين هي طاقة الضغط، وطاقة الوضع، وطاقة الحركة. ويحدث فقد في الطاقة أثناء سريان المياه داخل الأنابيب بسبب احتكاك الماء مع السطح الداخلي لجدار الأنابيب والوصلات الموجودة على الأنابيب، وكذلك بسبب اصطدام جزيئات الماء مع بعضها البعض أثناء السريان المضطرب. ويمكن التعبير عن التغير في الطاقة بين نقطتي 1 و 2 بتطبيق معادلة الطاقة كالاتي:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_w} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{loss} \quad (٤,٢)$$

حيث أن:

$$Z_1 = \text{ضاغظ الوضع . منسوب الأنبوب عند النقطة ١ (متر).}$$

$$= \frac{P_1}{\gamma} = \text{ضاغظ الضغط عند النقطة ١ (متر).}$$

$$P = \text{الضغط (كيلو بسكال أو كيلو نيوتن/م^٢).$$

$$\gamma = \text{الوزن النوعي للماء (كيلو نيوتن/م^٣).$$

$$= \frac{V_1^2}{2g} = \text{ضاغظ السرعة عند النقطة ١ (متر).}$$

$$V = \text{السرعة المتوسطة للتدفق (متر/ث).}$$

$$g = \text{عجلة الجاذبية الأرضية (متر/ث^٢).$$

$$h_{loss} = \text{فاقد الطاقة بين النقطة ١ والنقطة ٢ (متر).}$$

وتمثل هذه الصيغة تطبيق قانون حفظ الطاقة على نقطتين في محور أنبوب ذو سرعان مستقر، إذ أن الضاغظ الكلي (Total Head) عند أي نقطة في الأنبوب يتألف من المكونات التالية:

١. ضاغظ الوضع Potential Head

٢. ضاغظ الضغط Pressure Head

٣. ضاغظ السرعة Velocity Head

والفرق في الضاغظ الكلي (الطاقة الكلية) بين أي نقطتين على الخط يساوي فاقد الطاقة Energy Loss بينهما، وفي معادلة الطاقة يمثل فاقد الطاقة h_{loss} نوعين من الفوائد، النوع الأول هو الفاقد بسبب الاحتكاك H_f الناتج عن مقاومة جزيئات الماء للاحتكاك بالجدران الداخلية للأنبوب، إضافة لاحتكاك الجزيئات ببعضها، ومنه يعرف ميل الاحتكاك أو ميل حط انحدار الطاقة للأنبوب المنتظم $S_f = \frac{H_f}{L}$ ، والنوع الثاني هو الفوائد الموضعية Local Losses التي تحدث من جراء اضطراب التدفق في الملحقات

(الوصلات) إن وجدت. وتسمى أيضاً الفواقد الصغرى Minor Losses ، وينبغي أخذها بالاعتبار حينما وجدت.

ويمكن في نظم الري بالرش تجاهل قيمة $\frac{V^2}{2g}$ حيث أنها صغيرة بالنسبة لقيمة H_f و P وذلك لتسهيل تصميم الأنابيب. ولكن للحصول على تصميم أكثر دقة لابد من اعتبار سرعة السريان في العمليات الحسابية. ومن المعروف ان سرعة السريان في الخطوط الفرعية تقل بزيادة طول الانبوب حيث أن التصرف يقل وذلك لوجود فتحات على طول الأنبوب. ومن المعروف أن التغير المسموح به في الضغط (P) بين نقطتي البداية والنهاية لخط فرعي لا يتجاوز ٢٠٪ من متوسط الضغط وفرق المنسوب.

(٤,٦) فواقد الطاقة وتغيرات الضغط في أنابيب الري:

Energy Losses and Pressure Variation in Irrigation Pipe

تتكون شبكات أنابيب الري بالرش بوجه عام من الأنابيب الرئيسية التي ينقل خلالها التدفق الكلي، وأنابيب الرشاشات التي يتفرع إليها التدفق، وحوامل الرشاشات، والرشاشات. ويضاف الماء عادة في عملية الري بالرش بشكل منتظم على كامل الحقل، ويتوقف ذلك على مقدار ضغوط التشغيل المتاحة عند قواعد الرشاشات، وللحصول على درجات عالية من الانتظامية في التوزيع، يتطلب الأمر توفير الضغط اللازم لكل رشاش على حدة لتحقيق الأداء المرغوب منه، غير أنه في الواقع يختلف الضغط في الحقل من موقع لآخر نتيجة لعدد من الأسباب التي يمكن إجمالها في مقاومة الاحتكاك في الأنابيب، واضطراب التدفق في الملتحقات، بالإضافة إلى اختلاف المناسيب في الحقل، وبشكل عام يؤدي السريان الأول والثاني إلى انخفاض الضغط باتجاه التدفق، بينما يؤدي اختلاف المناسيب إما إلى انخفاض الضغط أو زيادته حسب اتجاه الميل إلى الأعلى أو إلى الأسفل على الترتيب.

(٤,٦,١) فاقد الاحتكاك في الأنابيب (Pipe Friction Losses H_f) :

هناك عدة مصادر لفقد الطاقة في الأنابيب، وغالباً ما يمثل الفاقد الناتج من احتكاك المياه مع جدران الأنابيب مضافاً إليه الاضطراب الحادث بين جزيئات الماء نفسه الجزء الأكبر من الفاقد الكلي في الطاقة. بينما ينتج الجزء المتبقي من التغير في شكل أو مساحة مقطع التدفق عند مواضع معينة في الأنابيب بسبب وجود تغير في قطر الأنبوب أو صمام أو وصلات بين اجزاء الأنبوب أو انحناء في مسار السريان أو مرشح للمياه أو مقياس للضغط أو التصرف أو تفرع أو تقابل لعدة أنابيب إلخ. ويسمى الفاقد في الطاقة نتيجة الاحتكاك والاضطراب بالفاقد الرئيسي أما الفاقد نتيجة شكل المقطع فيسمى بالفاقد الثانوي أو الموضعي أو فاقد الشكل. ويعتمد مقدار هذا الفاقد على خشونة السطح الداخلي للأنبوب، وقطر الأنبوب ولزوجة الماء، وتصرف الأنبوب أو سرعة السريان وطول الأنبوب. وهناك كثير من المعادلات الشائعة الاستخدام في إيجاد فواقد الاحتكاك في الأنابيب.

إذا اعتبرنا أن الماء يسري في أنبوب ما خلال المسافة بين النقطتين 1 , 2 كما في الشكل رقم (٤,١) فإن الماء الساري لا بد وأن يفقد جزءاً من طاقته الكلية (الضاغظ المائي الكلي) أثناء السريان وذلك نتيجة لاحتكاك جزيئات الماء مع جدران الأنبوب وعلى هذا الأساس إذا طبقنا معادلة الطاقة عند المقطعين 1 , 2 من الأنبوب فينتج الآتي:

$$E_1 = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1$$

$$E_2 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_f$$

حيث H_f هي مقدار الضاغظ المفقود أثناء سريان جزيئات الماء من النقطة 1 إلى النقطة 2 نتيجة للاحتكاك مع جدران الأنبوب:

وبما أن الطاقة مقدار ثابت لا يتغير أي إن $E_1 = E_2$ فإن:

$$(٤,٣) \quad \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_f$$

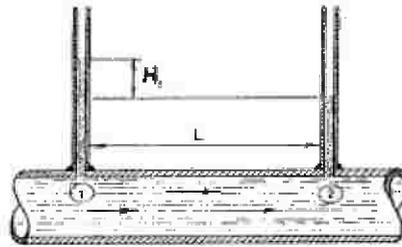
وبالتالي يكون:

$$(٤,٤) \quad H_f = \left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left(\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right)$$

وحيث أن المقطع الهندسي للأنبوب لم يتغير خلال المسافة L لذلك تتساوى V_1 و V_2 ويصبح فاقد الاحتكاك مساوياً:

$$(٤,٥) \quad H_f = \left(\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right)$$

أي يساوي الفرق في الضاغظ المائي بين أي نقطتين على خط السريان ويمكن قياس هذا الفرق عملياً إذا وصلت جدار الأنبوب بمانومترا أو أنابيب صغيرة تسمى بيزومترا، الشكل رقم (٤,١)، فنجد أن ارتفاع الماء في البيزومتر عند المقطع 2 أقل من ارتفاعه في البيزومتر عند المقطع 1 ويمثل الفرق في الارتفاع بين منسوب الماء فيهما فاقد الضاغظ المائي الناتج من الاحتكاك خلال السريان للمسافة L من الأنبوب.

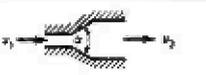
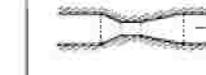


الشكل رقم (٤,١) الضاغظ المفقود بالاحتكاك خلال سريان الماء في الأنابيب.

ومن الواضح أن مقاومة جدار الأنبوب للسريان تزداد كلما زادت سرعة السريان مما يسبب زيادة فاقد الاحتكاك، كذلك يزداد هذا الفاقد بزيادة مسافة السريان وزيادة خشونة جدار الأنبوب ومن الناحية العملية الأخرى فإن زيادة قطر الأنسب تقلل من الفاقد بالاحتكاك حيث تقل نسبة الجزيئات القريبة من جدار الأنبوب والتي تعاني من مقاومة السريان.

(٤, ٦, ٢) الفواقد الثانوية (الموضعية) Minor (Local) Losses :

يطلق على فواقد الطاقة التي تنشأ عن الاضطراب الموضعي لنمط سريان المياه خلال الملحقات المختلفة لأنابيب شبكات الري أسم الفواقد الثانوية أو الموضعية، وذلك إشارة إلى ظهور آثارها في موضع وجود مسبباتها، خلافاً لفقد الطاقة بسبب الاحتكاك في الأنابيب ذو الأثر المستمر على امتداد مسار تدفق المياه، وقد تسمى أيضاً فواقد الملحقات fitting losses نسبة لمسبباتها. وفي كثير من المراجع تدرج تحت أسم الفواقد الثانوية minor losses، وقد تواجه هذه التسمية بعض الاعتراض في بعض الأحيان، حيث أنه في كثير من شبكات توزيع المياه ربما تكون هذه الفواقد رئيسة major، وخاصة عندما يكون متوسط طول الأنابيب إلى أقطارها أقل من ١٠٠٠. ومن أمثلة الملحقات المستخدمة كثيراً في شبكات الري بالرش، الشكل رقم (٤, ٢): الجلب couplers، ووصلات T tees، والأكواع elbows، والنقاصات reducers، والمحابس valves. وتحسب الفواقد الثانوية بمعادلة حسب نوع الملحق أو تقدر الفواقد الثانوية في شبكة الأنابيب على أنها تساوي حوالي ١٠٪ من فواقد الاحتكاك الكلية.

			
انحاش تدريجي	اتساع فجائي	نقاص فجائي	نقاص تدريجي
			
كوع ٩٠	كوع ٤٥	وصلة T	مقياس تصرف (فنشوري)
			
صمام دوار	صمام بوابي	صمام كروي	مصفاة

الشكل رقم (٤, ٢) بعض ملحقات أنابيب شبكة الري بالرش المسببة للفواقد الثانوية

Slope Loss (٤, ٦, ٣) فاقد الميل:

تتميز شبكات الري بالرش بإمكانية استخدامها لري مساحات من الأرض ذات تضاريس متعرجة، أو ميول حادة، إضافة للأراضي المستوية، وتؤدي الاختلافات في مناسيب الأرض إلى تغيرات في قيم الضغط داخل الأنابيب، وفي حالة الأنابيب الفرعية فإن هذه التغيرات تؤدي إلى اختلاف معدلات تصرف الرشاشات المركبة عليها، مما يؤثر على انتظامية أدائها، ويعود سبب هذه التغيرات في الضغط داخل الأنابيب لكونها محصلة انخفاض الطاقة باتجاه السريان نتيجة الاحتكاك، وفقد الطاقة أو كسبها تبعاً لاتجاه ميل الأنبوب للأعلى أو للأسفل. وللسبب نفسه تحدث أيضاً تغيرات في قيم الضغط داخل الأنبوب الرئيس، مما يترتب عليه أيضاً اختلاف في قيم الضغوط المتاحة عند النقاط المختلفة لاتصال الأنابيب الفرعية بالأنبوب الرئيس، والتي يفضل عادة أن لا تقل عن قيم محددة خاصة بظروف تشغيل كل أنبوب فرعي على حدة.

ومن المعلوم أن معادلة الطاقة التي سبق ذكرها تأخذ في الاعتبار فرق المنسوب بين النقاط محل الاهتمام، وعندما تكون مناسيب النقاط المختلفة التي توضع عليها الأنابيب معلومة فإن فرق المنسوب بين أي نقطتين يحسب مباشرة بالعلاقة :

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 \quad (٤, ٦)$$

كما أنه يحسب بمعلومية كل من الميل المنتظم S ، والمسافة بين نقطتين L بالعلاقة:

$$\Delta Z = S \cdot L \quad (٤, ٧)$$

حيث أن:

$$\Delta Z = \text{فرق المنسوب بين نقطتين (متر).}$$

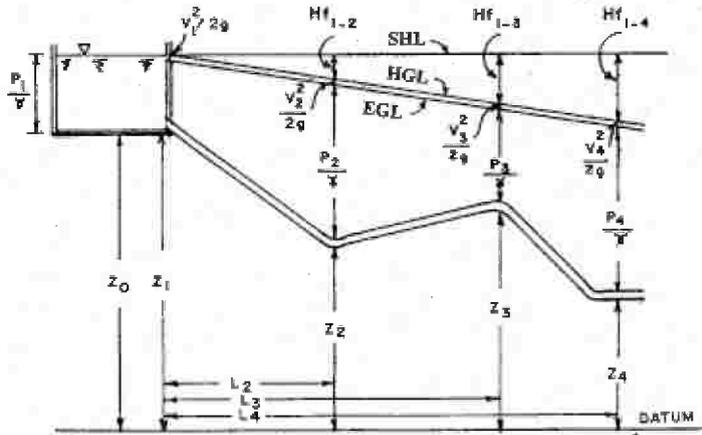
$$Z_2, Z_1 = \text{منسوب نقطتين متعاقبتين (متر).}$$

$$S = \text{الميل المنتظم للأنبوب (\%).}$$

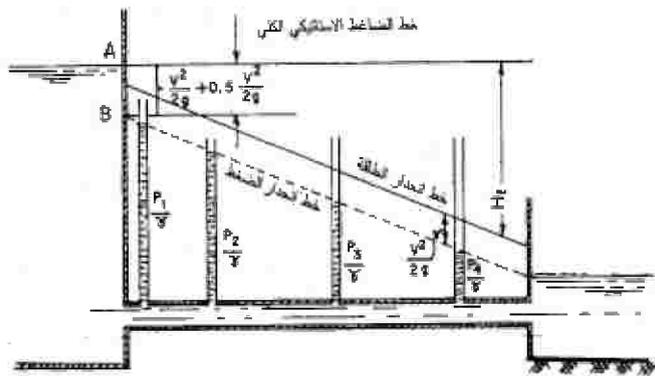
(٤,٧) توزيع الضغط في أنابيب الري بالرش:

Pressure distribution in Sprinkler Irrigation pipes

الشكل رقم (٤,٣) يوضح توزيع خطوط الطاقة لماء يتحرك على طول انبوب متغير الميل، والشكل رقم (٤,٤) يوضح توزيع خطوط الطاقة لماء يتحرك على طول انبوب أفقى. حيث أن:



الشكل رقم (٤,٣) توزيع خطوط الضاغظ الكلي والمحدار الطاقة والمحدار الضاغظ الهيدروليكي على طول أنبوب ذو ميل متغير.



الشكل رقم (٤,٤) توزيع خطوط الضاغظ الكلي والمحدار الطاقة والمحدار الضاغظ أثناء سريان المياه في أنبوب أفقى.

- خط الضاغظ الاستاتيكي (S H L) Static Head Line يبين توزيع الضغط في حالة عدم وجود سريان للمياه في الأنبوب.
- خط انحدار الطاقة (E G L) Energy Grade Line يصف تغير الضاغظ الكلي على طول الأنبوب، شاملاً ضاغظ السرعة عند حدوث السريان.
- خط الانحدار الهيدروليكي (H G L) Hydraulic Grade Line يمكن تعريفه بأنه يساوي خط انحدار الطاقة مطروحاً منه ضاغظ السرعة $\frac{V^2}{2g}$. وهو يدل على مقدار ارتفاع الماء في أنبوب بيزومتري وضع في نقطة على طول الخط. أما خط الأنحدار الهيدروليكي يبين مقدار ضغط التشغيل الموجود عند أي نقطة على طول الأنبوب.

ويمكن تلخيص ذلك بالتعبير الرياضي الآتي:

$$(٤,٨) \quad E G L = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z$$

$$(٤,٩) \quad H G L = \frac{P}{\gamma} + Z$$

$$(٤,١٠) \quad S H L = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z + H_f$$

يجب ملاحظة ان فرق المنسوب يؤثر مباشرة على الضغط وفاقدا الاحتكاك على طول الانبوب كما يبين ذلك الشكل رقم (٤,٣). رغم أن هذه الخطوط وهمية إلا أنها توضح بصورة عملية مكونات الضاغظ المائي المسبب للسريان. ويلاحظ من الشكل رقم (٤,٤) أن انحدار الضغط ينتج عند توصيل مناسب السائل في مجموعة من البيزومترا المثبتة في جدار انبوب السريان، والتي تبين تغيرات الضغط على طول خط السريان دون اعتبار لضاغظ السرعة. وعلى ذلك يكون الفرق بين خط الضاغظ الاستاتيكي (خط الضاغظ الكلي) وخط انحدار الضغط ماهر الا ضاغظ السرعة + فواقد الضاغظ التي تحدث أثناء السريان ، أي أن :

$$(٤,١١) \quad SHL - HGL = \frac{V^2}{2g} + H_f$$

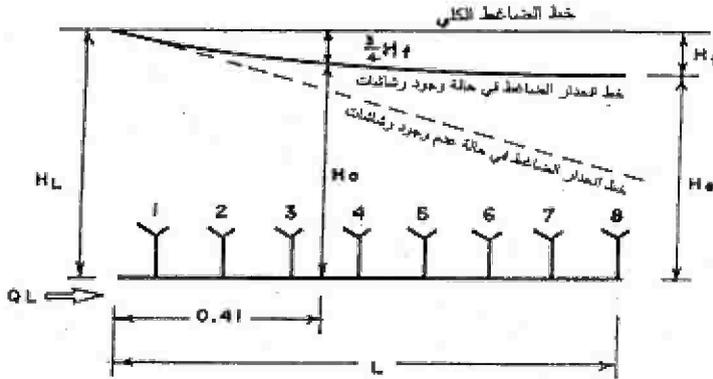
ومن المعلوم ان فواقد الضاغظ تشمل فاقد الاحتكاك الناتج من جدار الأنبوب الداخلي والفواقد الثانوية الناتجة عن المحابس والصمامات والمنحنيات إلخ. وعلى ذلك إذا تخيلنا حدوث السريان خلال أنبوب مستقيم متمائل القطر فإن خط انحدار الضاغظ للماء الساري في هذا الأنبوب لابد ان ينحدر مع اتجاه السريان، الشكل رقم (٤,٤). وفي نفس الوقت يعبر الفرق بين النقطتين A ، B عن الضاغظ المفقود أثناء دخول الماء إلى الأنبوب مضافاً إليه ضاغظ سرعة السريان.

لذلك نلاحظ ان الفواقد في الضاغظ على خط السريان يصحبها حدوث انخفاض في خط انحدار الضاغظ مساوياً لها في القيمة ويحدث ذلك في جميع الحالات المسببة للفقد في الضاغظ باستثناء حالة واحدة إلا وهي حدوث توسعه فجائية أو تدريجية، بالرغم من أن هناك فقد في الضاغظ الا ان خط انحدار الضاغظ يرتفع بمقدار يساوي الفرق بين الانخفاض في ضاغظ السرعة وفاقد التوسعة. مما سبق يمكن استخلاص النقاط الآتية:

١. يعتبر خط انحدار الضاغظ (الضاغظ) دليلاً لحالة الضاغظ على طول الأنابيب.
٢. في الأنابيب المصنوعة من نفس المادة والمتماثلة في القطر يزداد انحدار خط الضاغظ كلما زادت سرعة السريان حيث أن فاقد الاحتكاك H_f يتناسب مع مربع السرعة.
٣. عند أي نقطة على طول خط السريان يكون الفرق الراسي بين خط الطاقة الكلية (خط الضاغظ الاستاتيكي) SHL وبين خط انحدار الضاغظ (HGL) مساوياً لضاغظ السرعة + فاقد الاحتكاك + الفواقد الثانوية.

ويجب ملاحظة ان درجة انحدار خط الانحدار الهيدروليكي تختلف في حالة وجود فتحات على الأنبوب كالرشاشات مثلاً من عدمها ، فيكون أكثر انحدار في

حالة عدم وجود فتحات كما يوضح ذلك الشكل رقم (٤,٥) والسبب في ذلك يرجع إلى زيادة الفواقد، لأن سرعة السريان والتصرف لم يتغيرا على طول الأنبوب.



الشكل رقم (٤,٥) توزيع الضاغط وفاقد الاحتكاك على طول الخط القرعي

(٤,٨) تقدير الفاقد بالاحتكاك: Determining Friction Loss

هناك العديد من المعادلات التي قدمت على مدى فترة طويلة من الزمان لحساب فاقد الاحتكاك في الأنابيب للموائع المختلفة، مثل معادلات كل من: دارسي - ويسباخ Darcy-Weisbach، هيزن - ويليام Hazen-Williams، ماننج Manning وسكوبي Scobey. ولكل من هذه المعادلات ميزات واستخدامات خاصة بها، وفيما يلي أهم هذه المعادلات وأكثرها انتشاراً في تصميم شبكات الري بالرش:

١. معادلة دارسي - ويسباخ: Darcy - Weisbach's Equation

$$(٤,١٢) \quad H_f = f \times \frac{L}{d} \times \frac{V^2}{2g}$$

ويمكن كتابتها في صورة أخرى عند معرفة التصرف كالتالي :-

$$(٤,١٣) \quad H_f = \frac{8f \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^5}$$

حيث أن :-

$$\begin{aligned}
 H_f &= \text{فاقد الضاغط بسبب الاحتكاك (متر).} \\
 f &= \text{معامل دارسي - ويسباخ للاحتكاك (بلتون وحدات).} \\
 V &= \text{السرعة المتوسطة للمياه (م/ث).} \\
 d &= \text{قطر الأنبوب الداخلي (متر).} \\
 L &= \text{طول الأنبوب (متر).} \\
 g &= \text{عجلة الجاذبية الأرضية (م/ث^٢).} \\
 Q &= \text{تصرف الأنبوب (م^٣/ث).}
 \end{aligned}$$

تعد هذه المعادلة الأكثر شيوعاً في تطبيقات التدفق في الأنابيب، ورغم أنها الأكثر تعقيداً إلا أنها أكثرها دقة. وتعتبر هذه المعادلة في الأصل تجريبية إلا أنها أيضاً نظرية وذلك لإمكانية اشتقاقها من استقصاء جهد القص للسائل قرب جدار الأنبوب الأملس وقوانين التشابه أو التحليل البعدي. ولحل معادلة دارسي ينبغي تقدير قيمة مناسبة لمعامل الاحتكاك f تناسب ظروف السريان الأنية، ويرتبط حساب معامل الاحتكاك بنمط السريان الذي يصنف بدوره حسب قيمة رقم رينولدز (R_{ff}).

٢. معادلة هيزن - ويليام : Hazen - William's Equation

$$(٤,١٤) \quad H_f = K \times L \times \left(\frac{Q}{CHW} \right)^{1.852} \times d^{-4.87}$$

حيث أن :-

CHW = معامل هيزن ويليام للاحتكاك ويعتمد على نوع مادة الأنبوب.

K = معامل ثابت حسب الوحدات المستخدمة كالتالي :

$$K = 1.22 \times 10^{10} \quad \text{for } H_f (m) , L (m) , Q (L/s) , d (mm)$$

$$K = 10.46 \quad \text{for } H_f (ft) , L (ft) , Q (gpm) , d (inch)$$

وهذه المعادلة تكون أقل دقة عندما يقترب رقم رينولد من مدى قيم الجريان الطبقي ولكنها تعتبر من أكثر المعادلات استخداماً في حساب فاقد الاحتكاك في أنابيب نظم الري بالرش لأنها سهلة الاستخدام. وقد توجد صور أخرى لهذه المعادلات التجريبية حسب العناصر المستخدمة في حسابها. فيما يلي بعض قيم معامل هيزن - ويليام (C_{HW}) حسب نوع مادة الأنابيب المستخدم:

المادة	حديد صلب	بلاستيك مرن (PE)	بلاستيك قاسي (PVC)	ألومنيوم مع وصلات
قيمة C_{HW}	١٤٠-١٠٠	١٥٠-١٣٠	١٥٠-١٤٠	١٣٠-١١٠

ويمكن استنتاج الآتي عند حساب فاقد الاحتكاك :

- الفاقد في الضغط يكون أعلى كثيراً في الأنابيب الأصغر قطراً لنفس التصريف.
- يزداد الفاقد في الضغط بسرعة مع زيادة التصريف خاصة في الأنابيب صغيرة القطر.
- يزداد الفاقد مباشرة بزيادة طول الأنبوب. فإذا تضاعف الطول فإن الفاقد في الضغط يتضاعف أيضاً.

توصيل الأنابيب وتأثيرها على فواقد الطاقة:

من الشائع استخدام عدة أقطار مختلفة في الخطوط الرئيسية وشبه الرئيسية لشبكة الري بالرش، وأحياناً في خطوط الرشاشات أيضاً. وقد يكون التوصيل بينها على التوالي أو التوازي أو الأثنين معاً كالتالي:

أ. توصيل الأنابيب على التوالي:

في هذه الحالة (الشكل رقم ٦، ٤) يكون التصريف المار خلال الأنابيب المتتالية متساوياً حيث أن:

$$(٤, ١٥) \quad Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n$$

أما فاقد الاحتكاك الكلي خلال هذه الأنابيب فيساوي مجموع الفواقد الجزئية لكل أنبوب أي أن:

$$(٤,١٦) \quad H_f = \sum_n^l h_{f_i} = h_{f_1} + h_{f_2} + \dots + h_{f_n}$$

ب. توصيل الأنابيب على التوازي:

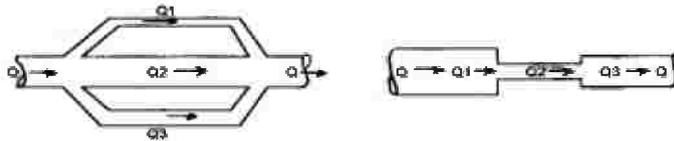
في هذه الحالة (الشكل رقم ٤,٦ ب) يتوزع التصرف Q المار في بداية الأنابيب الأصلي قبل التفرع إلى الأنابيب الفرعية بحيث:

$$(٤,١٧) \quad Q = \sum_n^l Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

أما الفاقد في الطاقة بين النقطتين (موضعي التفرع والتقابل) فيكون متساوياً للأنابيب المختلفة أي أن:

$$(٤,١٨) \quad h_{f_1} = h_{f_2} = h_{f_3} = \dots = h_{f_n}$$

وعند حساب الفاقد الكلي في الطاقة لحظ أنابيب به جزء متفرع (على التوازي) فيراعى إضافة الفاقد لواحدة من الأنابيب على التوازي وليست كلها.



ب. على التوازي

أ. على التوالي

الشكل رقم (٤,٦) توصيل الأنابيب.

(٤,٩) فواقد الاحتكاك في الخط الرئيسي: Friction Losses In Mainline

بالنسبة لفوائد الاحتكاك في الأنابيب الرئيسية فيجب حساب فاقد الاحتكاك في هذه الأنابيب. وقد يتكون الخط الرئيسي في الشبكة من أكثر من قطر لذلك لابد من حساب الفاقد حسب طول وقطر كل جزء مع مراعاة التغير في انحدار سطح الأرض. ولكن الناحية الاقتصادية هي عامل رئيسي عند اختيار قطر الأنابيب وتصميم الخط الرئيسي. بمعنى انه يجب اختيار أصغر الأقطار (أقل التكاليف)، ولكن يجب الموازنة بين التكاليف والفوائد التي تزداد مع صغر الأقطار. لذلك يجب دراسة طبوغرافية الأرض وفهمه حتى يمكن الاستفادة منه لأنه يعتبر عامل رئيسي عند تصميم خط رئيسي.

(٤,١٠) فاقد الاحتكاك في الخط الفرعي: Friction Loss in Lateral

فاقد الاحتكاك الناتج من سريان تصرف معين في أنبوب ذو قطر معين يقل في حالة وجود مخارج (فتحات) على طول الأنبوب عنه إذا لم توجد هذه المخارج. وبالتالي عند زيادة هذه المخارج يقل فاقد الاحتكاك والسبب في ذلك أن جزء من التصرف يخرج من هذه الفتحات وبالتالي يقل التصرف على طول الأنبوب وهذا يؤدي إلى خفض سرعة السريان والضغط مما يؤدي إلى خفض فاقد الاحتكاك. وقد تم استنتاج معامل يسمى معامل الفتحات (F) ليأخذ في الاعتبار وجود هذه الفتحات عند حساب فاقد الاحتكاك في الخط الفرعي باستخدام معادلات فواقد الاحتكاك، ويمكن إيجاد قيمة (F) مباشرة من جداول خاصة (الجدول ٤,١) أو من المعادلة التالية :-

$$(٤,١٩) \quad F = \frac{I}{m+1} + \frac{I}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2}$$

حيث أن :-

m = ثابت يعتمد على نوع معادلة فاقد الاحتكاك المستخدمة

N = عدد الفتحات على طول الأنبوب

الجدول رقم (٤، ١) معامل التصحيح F لفاقد الاحتكاك h_f للخطوط الفرعية.

عدد الرشاشات	معادلة هيزن وويليام		معادلة سكوبي		معادلة دارسي ويسباخ	
	$h_f = K \cdot L \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}}\right)^{1.852} \cdot d^{-4.87} \cdot F$		$h_f = K \cdot K_s \cdot L \cdot V^{1.9} \cdot d^{-11} \cdot F$		$h_f = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot F$	
Nsp	*** ١,٨٥٢		*** ١,٩٠٠		*** ٢,٠٠٠	
	*	**	*	**	*	**
١	١,٠٠٠	١,٠٠٠	١,٠٠٠	١,٠٠٠	١,٠٠٠	١,٠٠٠
٢	٠,٦٣٩	٠,٥١٩	٠,٦٣٤	٠,٥١٢	٠,٦٢٥	٠,٥٠٠
٣	٠,٥٣٤	٠,٤٤١	٠,٥٢٩	٠,٤٣٥	٠,٥١٩	٠,٤٢٢
٤	٠,٤٨٥	٠,٤١٢	٠,٤٨٠	٠,٤٠٥	٠,٤٦٩	٠,٣٩٣
٥	٠,٤٥٧	٠,٣٩٦	٠,٤٥١	٠,٣٩٠	٠,٤٤٠	٠,٣٧٨
٦	٠,٤٣٨	٠,٣٨٧	٠,٤٣٣	٠,٣٨١	٠,٤٢١	٠,٣٦٩
٧	٠,٤٢٥	٠,٣٨١	٠,٤١٩	٠,٣٧٥	٠,٤٠٨	٠,٣٦٣
٨	٠,٤١٦	٠,٣٧٧	٠,٤١٠	٠,٣٧٠	٠,٣٩٨	٠,٣٥٨
٩	٠,٤٠٨	٠,٣٧٣	٠,٤٠٢	٠,٣٦٧	٠,٣٩١	٠,٣٥٥
١٠	٠,٤٠٢	٠,٣٧١	٠,٣٩٦	٠,٣٦٥	٠,٣٨٥	٠,٣٥٣
١١	٠,٣٩٧	٠,٣٦٩	٠,٣٩٢	٠,٣٦٣	٠,٣٨٠	٠,٣٥١
١٢	٠,٣٩٣	٠,٣٦٧	٠,٣٨٨	٠,٣٦١	٠,٣٧٦	٠,٣٤٩
١٣	٠,٣٩٠	٠,٣٦٦	٠,٣٨٤	٠,٣٦٠	٠,٣٧٣	٠,٣٤٨
١٤	٠,٣٨٧	٠,٣٦٤	٠,٣٨١	٠,٣٥٨	٠,٣٧٠	٠,٣٤٧
١٥	٠,٣٨٥	٠,٣٦٣	٠,٣٧٩	٠,٣٥٧	٠,٣٦٧	٠,٣٤٦
١٦	٠,٣٨٢	٠,٣٦٣	٠,٣٧٧	٠,٣٥٧	٠,٣٦٥	٠,٣٤٥
١٧	٠,٣٨١	٠,٣٦٢	٠,٣٧٥	٠,٣٥٦	٠,٣٦٣	٠,٣٤٤
١٨	٠,٣٧٩	٠,٣٦١	٠,٣٧٣	٠,٣٥٥	٠,٣٦٢	٠,٣٤٤
١٩	٠,٣٧٧	٠,٣٦١	٠,٣٧٢	٠,٣٥٥	٠,٣٦٠	٠,٣٤٣
٢٠	٠,٣٧٦	٠,٣٦٠	٠,٣٧٠	٠,٣٥٤	٠,٣٥٩	٠,٣٤٢
٢٢	٠,٣٧٤	٠,٣٥٩	٠,٣٦٨	٠,٣٥٣	٠,٣٥٦	٠,٣٤١
٢٤	٠,٣٧٢	٠,٣٥٨	٠,٣٦٦	٠,٣٥٢	٠,٣٥٤	٠,٣٤١
٢٦	٠,٣٧٠	٠,٣٥٨	٠,٣٦٤	٠,٣٥٢	٠,٣٥٣	٠,٣٤٠
٢٨	٠,٣٦٩	٠,٣٥٧	٠,٣٦٣	٠,٣٥١	٠,٣٥١	٠,٣٤٠
٣٠	٠,٣٦٧	٠,٣٥٧	٠,٣٦٢	٠,٣٥١	٠,٣٥٠	٠,٣٣٩
٣٥	٠,٣٦٥	٠,٣٥٦	٠,٣٥٩	٠,٣٥٠	٠,٣٤٨	٠,٣٣٨
٤٠	٠,٣٦٣	٠,٣٥٥	٠,٣٥٧	٠,٣٤٩	٠,٣٣٦	٠,٣٣٨
٥٠	٠,٣٦١	٠,٣٥٤	٠,٣٥٥	٠,٣٤٨	٠,٣٤٣	٠,٣٣٧
١٠٠	٠,٣٥٦	٠,٣٥٢	٠,٣٥٠	٠,٣٤٧	٠,٣٣٨	٠,٣٣٥

(*) أول رشاش على بعد مسافة كاملة من بداية الخط الرئيسي.

(**) أول رشاش على بعد نصف مسافة من بداية الخط الرئيسي.

(***) الأس m على رمز السرعة.

ويجب ملاحظة قيمة معامل الفتحات (F) والتي تتوقف على عدد المخارج في الخط. كذلك يجب ملاحظة مسافة أول مخرج من نقطة الاتصال بالخط الرئيسي، حيث قد تكون هذه المسافة مساوية لنصف المسافة بين المخارج أو تكون مسافة كاملة مساوية للمسافة بين المخارج وهذه تؤثر على قيمة معامل الاحتكاك (F) والجدول رقم (٤،١) يوضح قيم (F) لأعداد مختلفة من المخارج عند استخدام معادلات فواقد الاحتكاك. وفي الري بالرش يستخدم معامل الفتحات (F) عند حساب فاقد الاحتكاك في الخطوط الفرعية والرئيسية. ففي حالة الخطوط الفرعية نجد أن (F) تمثل عدد الرشاشات على الخط الفرعي الواحد. أما في حالة الخطوط شبه الرئيسية والرئيسية نجد أن (F) يمثل عدد الفتحات التي تتصل بخطوط الرشاشات والتي تعمل في وقت واحد. وحساب (F) في الخطوط الرئيسية يعطى أكثر دقة عند حساب فاقد الاحتكاك. وقد يمكن تجاهل (F) عند تصميم الخطوط الرئيسية واعتباره أنبوب مصمت بدون فتحات، ولكن يفضل أخذ عدد الفتحات في الاعتبار عند حساب الفاقد.

أن اختلاف الضغط على طول الخط الفرعي بسبب فاقد الاحتكاك يؤدي إلى اختلاف التصرف الخارج من الرشاشات مما يسبب عدم انتظام توزيع المياه الناتجة من الرشاشات. ولتحقيق انتظام جيد لتوزيع المياه يجب ألا يتجاوز الاختلاف بين أكبر وأقل تصرف للرشاشات في الخط الفرعي الواحد ١٠٪ من التصرف التصميمي للرشاش. لتحقيق ذلك يجب أن لا تتعدى الفواقد الكلية المسموح بها (h_L) في الخط ٢٠٪ من ضاغط التشغيل التصميمي للرشاش (H_{sp}).

ويمكن تحديد مصادر الفواقد الثانوية (الوصلات، الصمامات، إلخ) في الخطوط الفرعية وتقديرها بدقة بدلالة ضاغط السرعة في بداية الخط ($V^2/2g$)، أو تؤخذ حوالي ١٠٪ من الفاقد نتيجة الاحتكاك (H_f). وعلى ذلك يمكن إيجاد فواقد الاحتكاك المسموح بها (h_L) مع الأخذ في الاعتبار ضاغط فرق المنسوب (ΔH_s) كالتالي:

$$(٤،٢٠) \quad h_L = 1.1 H_f \leq 0.20 H_{sp} \pm \Delta H_s$$

أو يمكن كتابتها كالتالي:

$$(٤,٢١) \quad h_L \pm \Delta H_z \leq 0.20 H_{sp}$$

حيث أن :-

H_{sp} = متوسط ضاغط التشغيل للرشاش .

h_L = فاقد الضغط المسموح به ويشمل فاقد الاحتكاك والتغير في المنسوب .

ΔH_z = ضاغط فرق المنسوب بين بداية ونهاية الخط ، وهو موجب للخط

هابط إلى اسفل وسالب للخط الصاعد إلى أعلى . $\Delta H_z = S \cdot L$

L = طول الخط .

S = ميل الخط (%).

وبالتالي إذا كان الخط مائل لأسفل تكون العلاقة :

$$(٤,٢٢) \quad h_L = 1.1 H_f \leq 0.20 H_{sp} + \Delta H_z$$

حيث يمكن الاستفادة بالضغط الناتج عن فرق المنسوب (ΔH_z) بين طرفي

الخط وإضافته إلى الفاقد المسموح. أما إذا كان الخط مائل لأعلى تكون العلاقة:

$$(٤,٢٣) \quad h_L = 1.1 H_f \leq 0.20 H_{sp} - \Delta H_z$$

(٤,١١) الطرْق المائي : Water Hammer

الطرْق المائي عبارة عن موجات سريعة جدا من الضغوط المرتفعة و/أو المنخفضة والتي تتولد عند موضع معين في الأنبوب نتيجة تغير مفاجئ وسريع لسرعة تدفق المياه. وذلك بسبب مؤثر خارجي مثل إغلاق أو فتح صمام التحكم في التصريف، وإيقاف وتشغيل المضخة الخ . فمثلا عند إغلاق صمام التحكم في لحظات وجيزة تجبر المياه المتدفقة على التوقف السريع، وتتحول الطاقة الحركية لها إلى طاقة ضغط، مما يؤدي إلى حدوث ارتفاع كبير جدا في قيمة ضغط المياه أمام الصمام، ويقابله انخفاض شديد في الضغط خلف الصمام. حيث تتوالى عملية تحويل الطاقة مع وصول الكتل المتتابعة من المياه ، ويتوالى الارتفاع في الضغط معها .

ويتوقف مقدار الضغط المنقطع المرتبط بالطرق المائي على:

١. هندسة النظام.
٢. مقدار التغير في السرعة.
٣. سرعة موجة الضغط لنظام معين.

وتحدث مشاكل الطرق المائي بكثرة عند وجود أنابيب صغيرة الحجم ومع وجود سرعات عالية للمياه المتدفقة. أيضا وجود خطوط رئيسية طويلة يساعد على حدوث الطرق المائي. وفي هذه الحالة ينصح باستخدام سرعات تدفق منخفضة. فمثلا عند وجود أنبوب سرعة تدفق المياه فيه ١ متر/ثانية وتم إغلاق مفاجئ لصمام التحكم. فسوف يؤدي ذلك إلى زيادة في الضغط أمام الصمام تصل إلى ١٠٠٠ كيلوبسكال في حالة عندما يكون الأنبوب من الحديد الصلب، ٨٠٠ كيلوبسكال في حالة الأنبوب من الألمنيوم. وإذا كانت سرعة التدفق ٢ متر/ثانية فإن الزيادة في الضغط أمام الصمام تتضاعف، فتصبح ٢٠٠٠ كيلوبسكال (أي ما يعادل عمود من الماء ارتفاعه ٢٠٠ متر) للأنبوب الصلب، و ١٦٠٠ كيلوبسكال للأنبوب الألمنيوم، وهكذا.

يمكن أن يصبح الطرق المائي مشكلة خطيرة في نظم الري بالرش. هذه الظاهرة مألوفة لمعظم الطلاب في الاستخدامات المتولية، حيث تظهر الطريقة المائية على صورة ضوضاء تتميز بضربات ترددية تحدث غالبا عند إغلاق محبس المياه السريعة بسرعة كبيرة. وهذه الضربات ماهي إلا موجات ضغط مرتفع تتحرك بسرعة عالية خلال أنبوب المياه نتيجة الإيقاف المفاجئ للمياه عند المحبس.

عموما يمكن القول بأن ظاهرة الطرق المائي تنتج من تغيرات فجائية تحدث في شبكة الأنابيب. وهذه التغيرات تؤدي إلى حدوث موجات ضغط مرتفع تتحرك بسرعة عالية خلال أنبوب المياه، ويمكن أن تتولد ضغوط تفوق ضغط التشغيل المعتاد بعدة مرات قد يؤدي في بعض الحالات إلى انفجار الأنابيب أو أتلاف المضخات. وقد يحدث الطرق المائي بسبب واحد أو أكثر من العوامل التالية :-

١. الإغلاق السريع لصمام التحكم أو محبس الري.
 ٢. بدء تشغيل وإيقاف المضخات، المضخة الكهربائية تتوقف بسرعة عن الدوران إذا حدث انقطاع للطاقة الكهربائية.
 ٣. انسداد مفاجئ في الأنبوب أو في فوهة الرشاش.
 ٤. مرور عجلات آلة فوق أنبوب مرن.
- ويمكن تجنب حدوث الطرق المائي بتجنب حدوث تغير مفاجئ في التصرف وذلك عند اتباع الآتي :-
١. تشغيل أو إيقاف المضخة تدريجياً.
 ٢. إغلاق الصمامات أو محابس الري ببطء.
 ٣. تجنب مرور العجلات فوق الأنابيب المرنة.
 ٤. تجنب مشاكل الانسداد باستعمال مرشحات مع الصيانة المستمرة.
- بالإضافة إلى ذلك يوجد بعض مسببات الطرق المائي التي لا يمكن تجنبها في نظم الري بالرش، لذلك فمن الشائع عملياً استخدام صمام عدم رجوع (Reflux Valve) لحماية المضخة من الأضرار المتوقعة.

الأضرار المحتملة من حدوث الطرق المائي :

- أن الارتفاع الناشئ في ضغط المياه عقب حدوث الطرق المائي يكون كبير جداً بحيث يتسبب في الآتي أو في بعض منها :
- انفجار الأنبوب.
 - أضرار الوصلات وأجزاء المضخة والصمامات.
 - حدوث تآكل تدريجي لمكونات شبكة الري.
- أما الانخفاض الشديد في الضغط قد يؤدي إلى :-
- تكوين فقاعات هوائية كبيرة داخل الأنبوب.
 - الإقلال من مقدار تصرف الماء خلال الأنبوب.

- تسبب الفقاعات ضوضاء مرتفعة واهتزازاً شديداً للأنبوب والأجهزة الأخرى المتصلة به.
 - هذه الفقاعات لا تظل في حالة ثبات وإنما تتكمش وتفجر بعد زمن وجيز من تكوُّنها.
- الحد من خطورة الطرق المائي :**

يمكن عملياً تقليل احتمال حدوث الطرق المائي بمراعاة تجنب أحداث تغير سريع في سرعة المياه داخل الأنبوب، سواء كان ذلك بالزيادة أو النقصان وهذا يستلزم البطء والتدرج في فتح أو إغلاق الصمام. ويستلزم أيضاً منع الأسباب التي قد تؤدي إلى انسداد الرشاش أو الأنبوب، وعدم المرور فوق الأنابيب المضاطية مباشرة بأية الآت زراعية كذلك يجب مراعاة اتباع الخطوات الصحيحة لتشغيل أو إيقاف المضخة. فعند تشغيل المضخة يجب أن يكون صمام التحكم في التصرف خلفها مغلقاً، وبعد دوران المضخة لمدة دقيقة إلى دقيقتين يفتح هذا الصمام تدريجياً. وعند إيقاف المضخة يغلق هذا الصمام أولاً ببطء مع استمرار دوران المضخة، ثم توقف المضخة بعد إغلاقه تماماً.

أيضاً هناك احتياطات أخرى لتقليل خطورة الطرق المائي في شبكة أنابيب الري يمكن اعتبارها عند تصميم وإنشاء الشبكة والأجهزة الملحقة بها، وذلك مثل استعمال أنواع خاصة من الصمامات، أو استعمال ما يعرف بالغرفة الهوائية، أو زيادة قطر الأنبوب، أو سمك جداره.

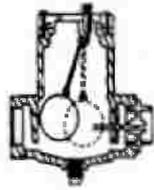
(٤، ١٢) الصمامات والمنظمات : Valves and Regulators

تستخدم الصمامات للتحكم في التصرف والضغط في الأنابيب الرئيسية والخطوط الفرعية، ويطلق عليها أحياناً محابس الري. هناك أنواع مختلفة من الصمامات والمنظمات تؤدي أغراض مختلفة في شبكة الري، وتصنف حسب المبدأ الذي تعمل بموجبه، وهي تتوفر بأشكال وأحجام مختلفة وتوضع على خطوط الأنابيب في المواقع المطلوبة. وتقدر الفواقد نتيجة مرور السريان في الصمامات

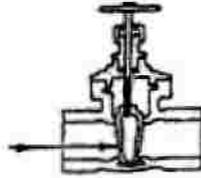
والمنظمات حسب المعادلات المعروفة كفواقد ثانوية أو بالرجوع إلى كتالوج الشركة المنتجة للصمام أو المنظم. ويوضح الشكل رقم (٤،٧) تصميم بعض أنواع صمامات التحكم في السريان. ومن أهم أنواع الصمامات والمنظمات المستخدمة في أنابيب نظم الرش:-

- ١ . صمام تفريغ وغسيل الخط (الشبكة) :- Flushing & Drain Valve
غالباً يدوية التشغيل وتوضع في نهاية الخطوط، والهدف من تركيبها هو غسيل الشبكة وطرده الرواسب العالقة في الخطوط.
- ٢ . صمام تفريغ الخط :- Drain Valve
وهي صمامات أوتوماتيكية أو يدوية تفتح عندما ينخفض الضغط إلى ما يقرب من الصفر. والهدف منها هو تفريغ الخط من المياه بعد الانتهاء من الري.
- ٣ . صمام القدم (صمام الامتصاص) :- Foot Valve
يوضع هذا الصمام في بداية أنبوب السحب للمضخة والهدف من ذلك هو أن يبقى أنبوب السحب ممتلئاً بالماء بعد توقف المضخة عن العمل مما يسهل إعادة تشغيل المضخة بدون ملء أنبوب السحب بالماء وبذلك لا يتم قهية المضخة قبل التشغيل.
- ٤ . صمام التصريف :- Discharge Valve
عبارة عن صمام يتحكم في التصريف يركب خلف المضخة، وغالباً يفتح ويقفل يدوياً. وقد تكون من النوع البوابي Gate Valve أو الكهربائي Solenoid Valve
- ٥ . صمام عدم الرجوع :- Check Valve أو Non- return Valve
يوضع هذا النوع من الصمامات على أنبوب الطرد للمضخة. والهدف من ذلك لمنع رجوع (ارتداد) المياه إلى المضخة عند توقف المضخة المفاجئ.
- ٦ . صمام تخفيف الضغط :- Pressure relief Valve
تستخدم لتخفيض الضغط الزائد، وهي تكون عادة من نابض يفتح الصمام تلقائياً عندما يزداد الضغط عن ضغط التشغيل. وبذلك يمكن تجنب الآثار الضارة الناتجة عن الضغوط العالية الفجائية.

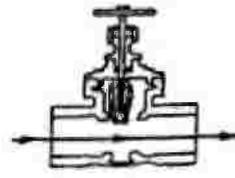
- ٧ . صمام الضغط المنخفض : - Vacuum relief Valve
تركب على الأنابيب الرئيسية أو عند مصدر المياه تفتح تلقائياً إذا قل ضغط المياه داخل الأنبوب عن حد معين وتتخلص من الفقاعات الهوائية التي يمكن أن تتواجد في الشبكة. وبالتالي يمكن تجنب الآثار الضارة الناتجة من الضغوط السالبة. وتوضع صمامات الضغط المنخفض عند المواقع المحتمل حدوث تفرغ للضغط عندها. مثل بداية الأنابيب المنحدرة إلى أسفل ، أو المواقع المرتفعة للأنبوب.
- ٨ . صمام التفرع : - T / Valve
عبارة عن صمام بثلاثة شعب لتوزيع تصرف خط إلى خطين فرعيين .
- صمام إغلاق : - Line Valve
عبارة عن عدة صمامات موجودة على الخط الرئيسي ، الغرض منها فصل السريان عن جزء معين في الخط .
- صمام تفرغ الهواء : - Air Valve
الهدف منه التخلص من الهواء المتجمع داخل الأنبوب وهو يعمل آلياً في الغالب .
- ٩ . منظم الضغط Pressure regulator
توضع اسفل الرشاشات أو عند بداية خط الرشاشات . والهدف من ذلك للحفاظ على ثبات ضغط التشغيل في حدود معينة وذلك سواء كان الخط صاعداً أو هابطاً. أن منظمات الضغط يمكنها فقط تقليل الضغط في خط الرشاشات ولكنها لا ترفع الضغط في حالة إنخفاضه اصلاً في خط الرشاشات.
- ١٠ . منظم التصرف Flow Regulator
تتحكم في ضغط وكمية المياه المتدفقة إلى الرشاشات حسب التصرف المطلوب.
- ١١ . مقياس الضغط Pressure gauge
يستخدم لقياس ضغط المياه عند المضخة أو على الخطوط أو عند الرشاشات.



صمام عدم الرجوع



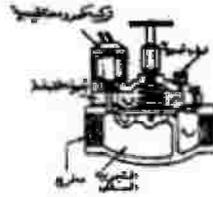
صمام بوابة مغلق



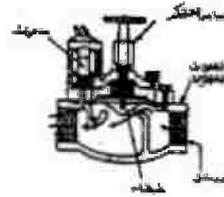
صمام بوابة مفتوح



صمام التخلص من الهواء



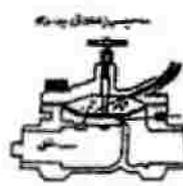
صمام كهربائي مغلق



صمام كهربائي مفتوح



صمام إدخال الهواء



صمام مائي مغلق



صمام مائي مفتوح

الشكل رقم (٤،٧) تصميم بعض انواع صمامات التحكم في السريان.

الفواقد في الصمامات والمنظمات: Head Loss in Valves and Regulators

تحسب الفواقد في الصمامات والمنظمات بشكل منفرد لكل منها، بالنسبة للصمامات فيمكن تقدير الفواقد نتيجة سريان المياه خلالها بطريقتين هما:

١. طريقة الطول المكافئ:

في هذه الطريقة يحدد الفاقد في الصمامات بطول مكافئ لخط الأنابيب ذات القطر المتساوي معها كما يلي:

$$(٤,٢٤) \quad h_{fp} = f \cdot \frac{L_e}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

حيث أن:

h_{fp} = الفاقد في الضاغط نتيجة وجود الصمام (متر).

f = معامل الاحتكاك لخط الأنابيب.

L_e = الطول المكافئ للفاقد في الصمام (متر).

d = القطر الداخلي للأنبوب (متر).

V = متوسط سرعة السريان في الأنبوب (متر/ث).

g = عجلة الجاذبية الأرضية (متر/ث^٢).

٢. طريقة معامل الفاقد:

وهي الطريقة الأكثر استخداماً لسهولة تطبيقها، ويتم تقدير الفاقد كالتالي:

$$(٤,٢٥) \quad h_{fp} = K_r \cdot \frac{V^2}{2g}$$

حيث أن:

K_r = معامل المقاومة للسريان في الصمام.

ويتوقف معامل المقاومة في الصمام على نوع الصمام وحالة الفتح جزئي أم

تام، ويمكن الحصول على قيمة هذا المعامل من الجداول المرفقة في الفصل

العاشر.

أما بالنسبة لمنظومات الضغط التي تتركب في الغالب قبل الرشاش مباشرة للتحكم في

الضغط الواصل إلى الرشاش بحيث يكون الضغط اللازم للتشغيل حسب مواصفات

الشركة المنتجة. لقد تم تصميم أنواع مختلفة من منظومات الضغط ذات تصرفات تتراوح بين ١ - ٠,١ لتر/ثانية وتعمل تحت ضغوط معيارية محددة مسبقا من قبل الشركات المنتجة لتلك المنظومات، وهذه الضغوط هي ٧٠، ١٠٥، ١٤٠، ١٧٠، ٢٠٥، ٢٧٥، ٣٤٥ كيلوبسكال (١٠، ١٥، ٢٠، ٢٥، ٣٠، ٤٠، ٥٠ رطل/بوصة^٢) وبالتالي يتم اختيار منظم الضغط حسب ضغط تشغيل الرشاش المستخدم. وفي المعتاد تكون قيمة الضغط الداخل إلى المنظم (P_1) وقيمة الضغط الخارج من المنظم (P_2) متساوية وتقارب ضغط تشغيل الرشاش. وعندما تزيد قيمة (P_1) يبدأ الضغط (P_2) في الارتفاع أيضا فيدفع بالإطار إلى أسفل مما يؤدي إلى تقليل مقطع التدفق داخل المنظم ونقصان التصرف المتجه إلى الرشاش، وهذا بدوره يسبب انخفاض الضغط (P_2) حتى يعود إلى قيمة ضغط تشغيل الرشاش، بينما يبقى الضغط (P_1) أعلى منه. أما في حالة انخفاض الضغط (P_1) ينخفض الضغط (P_2) معه مسببا ارتفاع الاطار وزيادة التصرف المتجه إلى الرشاش مع ارتفاع الضغط (P_2) إلى قيمة ضغط التشغيل المطلوب. ويتم التحكم في الضغط (P_2) بواسطة زنبرك مضغوط داخل الاطار، وبالتالي فإن منظم الضغط يمكنه فقط تقليل الضغط الزائد إلى الضغط المناسب لضغط تشغيل الرشاش ولكنه لا يرفع الضغط في حالة انخفاضه. ويمكن إيجاد P_2 من المعادلة التالية:

$$(٤, ٢٦) \quad P_2 = P_1 - P_{cv} = P_1 - k \left(\frac{q_r}{CV} \right)^2$$

حيث أن:

P_2 = الضغط الخارج من منظم الضغط عند الرشاش المطلوب (كيلوبسكال).

P_1 = الضغط الداخل إلى منظم الضغط ويساوي الضغط المعياري (كيلوبسكال).

P_{cv} = الضغط المفقود خلال المنظم للتصرف q_r (كيلوبسكال).

q_r = التصرف المار خلال المنظم إلى الرشاش (لترات).

k = فاقد الضغط لوحدة القياس المحددة (كيلوبسكال).

c_v = معامل التصريف الذي يساوي عددياً معدل التصريف عندما يكون الضغط المفقود P_{ev} يساوي ١ كيلوبسكال (لتر/ث). ومن المعلوم أن قيمة c_v لمعظم المنظمات حوالي ٠,٢٤ لتر/ث وهي متساوية لنفس النوعية من المنظمات حتى لو اختلف تصنيف الضغط المعياري.

وفي الواقع في كثير من المراجع تدرج فواقد الصمامات والمنظمات وكذلك فواقد الملحقات الأخرى تحت اسم الفواقد الثانوية أو الموضوعية ويتم تقديرها على أنها تتراوح بين ٥-١٥٪ من الفواقد الرئيسية (فاقد الاحتكاك). وتتوفر في كثير من كتب ومراجع الهيدروليكا والري جداول لقيم الفواقد الموضوعية للعديد من ملحقات الأنابيب أما بشكل اطوال مكافئة لأقطار مختلفة ومواد تصنيع متنوعة، أو كمعاملات تستخدم مع المعادلة (٤,٢٦) المتقدمة، ومن المصادر التي يمكن الرجوع إليها هي أرقام (٤ ، ٥ ، ٩ ، ١١) بالمراجع في هذا الكتاب.

(٤,١٣) أمثلة محلولة:

مثال ١:

خط فرعي هابط إلى أسفل من الخط الرئيسي بميل ٠,٥٪ (٠,٠٠٥ م/م) وكان ضغط التشغيل للرشاش ٣١٠ كيلوبسكال، طول الخط الفرعي ٢٠٠ متر بين الرشاش الأول والأخير. المطلوب إيجاد أقصى فاقد احتكاك مسموح به.

الحل

$$H_{SP} = \frac{P_{SP}}{\gamma} = \frac{310}{9.81} = 31.6m$$

$$\Delta H_z = S.L = \frac{0.5}{100} \times 200 = 1m$$

$$h_L = 20\% H_{SP} \pm \Delta H_z$$

$$h_L = \frac{20}{100} \times 31.6 + 1 = 7.32 \text{ m}$$

$$\therefore h_L = 1.1 H_f$$

$$\therefore H_f = \frac{h_L}{1.1} = \frac{7.32}{1.1} = 6.65 \text{ m}$$

مثال ٢ :

خط فرعي لشبكة ري بالرش طوله ١٩٠ متر، فاذا كان فاقد الاحتكاك للخط ٠,٣٠ كجم/سم^٢ لكل ١٠٠ متر طولي، والضغط في بداية الخط ٣ كجم/سم^٢. أحسب الضغط في نهاية الخط اذا كان الخط موضوع على ارض تميل الى أعلى بمقدار ٢٥ سم/١٠٠متر.

الحل

$$H_L = H_e + H_f + H_s \pm \Delta H_z$$

+ للميل إلى أعلى - للميل إلى أسفل

$$\Delta H_z = +25 \text{ cm}/100\text{m}$$

الأنبوب يميل إلى أعلى

$$H_e = H_L - H_f - H_s - \Delta H_z$$

$$= 3 \times 10 - 1.10 \times \left(\frac{0.3 \times 10}{100} \times 190 \right) - \frac{0.25}{100} \times 190$$

$$= 30 - 6.27 - 0.475 = 23.255 \text{ m}$$

$$P_e = 2.3255 \text{ kg/cm}^2$$

مثال ٣ :

خط رشاشات من البلاستيك، معامل هيزن ويليام له ١٤٠، وقطره ١٢٠ مم يوجد عليه ٢٠ رشاش على مسافات متساوية مقدارها ١٢ متر وتصرفه ٤٠ لتر/دقيقة. ويوجد الرشاش الأول على مسافة ٦ متر من الخط الرئيسي. المطلوب إيجاد الفرق في الضاغظ بين بداية ونهاية الخط إذا كان فرق المنسوب بين النهايتين على النحو التالي :-

أ. الأنبوب على أرض أفقية.

ب. الأنبوب صاعد (٥ متر).

ج. الأنبوب هابط (- ٥ متر).

الحل

$$Q_{sp} = 40 \text{ L/min} = 0.67 \text{ L/s} , \quad N_{sp} = 20 , \quad d = 120 \text{ mm} , \quad C_{hw} = 140$$

$$L = (20 \times 12) - 6 = 234 \text{ m}$$

$$Q_L = Q_{sp} \cdot N_{sp} = 40 \times 20 = 800 \text{ L/min} = 13.33 \text{ L/s}$$

من جدول (٤، ١) لعدد رشاشات ٢٠ رشاش وأول رشاش على بعد نصف مسافة
 $F = 0.36$

$$H_f = 1.22 \times 10^{10} \times 0.36 \times 234 \times \left(\frac{13.33}{140} \right)^{1.852} \times (120)^{-4.87} = 0.988 \text{ m}$$

الاختلاف في الضاغط بين النهايتين (Δh) مع إهمال الفواقد الثانوية كالتالي :-

$$\Delta h = H_f + \Delta H_z = 0.988 + 0 = 0.988 \text{ m} \quad \text{أ. الأنبوب على أرض أفقية:}$$

$$\Delta h = H_f + \Delta H_z = 0.988 + 5 = 5.988 \text{ m} \quad \text{ب. الأنبوب صاعد (٥ متر).}$$

$$\Delta h = H_f - \Delta H_z = 0.988 - 5 = -4.012 \text{ m} \quad \text{ج. الأنبوب هابط (- ٥ متر).}$$

أي انه يوجد زيادة في الضغط في حالة c

مثال ٤ :

خط فرعي قطره ١٠٠ مم يميل إلى أسفل بمقدار ١,٥٪ يوجد عليه ١٣ رشاش على مسافات متساوية مقدارها ١٢ متر، والرشاش الأول على بعد ٦ متر من الخط الرئيسي. فإذا كان تصرف الرشاش ٣,٧ م^٣/ساعة وضغط تشغيله ٢,٧ كجم/سم^٢ وان معامل هيزن ويليام ١٤٠. أوجد: فاقد الاحتكاك في الخط الفرعي، الفرق في الضغط بين بداية ونهاية الخط، الضغط في بداية الخط الفرعي.

الحل

$$d = 100 \text{ mm} \quad N_{sp} = 13 \quad S_s = 12 \text{ m} \quad S_L = 6 \text{ m} \quad Q_{sp} = 3.7 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$P_{sp} = 2.7 \text{ kg/cm}^2 \quad CHW = 140 \quad S = 1.5\% = 0.015 \uparrow$$

$$H_f = ? \quad HL - H_e = ? \quad HL = ?$$

من جدول (٤,١) لعدد رشاشات ١٣ رشاش وأول رشاش على بعد نصف مسافة
 $F = 0.366$

$$Q_{sp} = 3.7 \text{ m}^3/\text{hr} = \frac{3.7 \times 1000}{3600} = 1.0278 \text{ L/sec}$$

$$L = S_j + S_s(N_{sp} - 1) = 6 + 12(13 - 1) = 150 \text{ m}$$

$$Q_L = N_{sp} \times Q_{sp} = 13 \times 1.0278 = 13.36 \text{ L/sec}$$

فاقد الاحتكاك في الخط الفرعي:

$$H_f = 1.22 \times 10^{-10} \times L \times \left(\frac{Q}{CHW} \right)^{1.852} \times d^{-4.87} \times F$$

$$H_f = 1.22 \times 10^{-10} \times 150 \times \left(\frac{13.36}{140} \right)^{1.852} \times 100^{-4.87} \times 0.366 = 1.56 \text{ m}$$

الفرق في الضغط بين بداية ونهاية الخط:

$$H_L - H_e = 1.1 H_f \pm \Delta H_s$$

$$H_L - H_e = 1.1 \times 1.56 + 0.015 \times 150 = 1.72 + 2.25 = 3.97 \text{ m}$$

الضغط في بداية الخط الفرعي:

$$H_L = H_{sp} + 0.75 H_f + H_r + 0.5 \Delta H_s$$

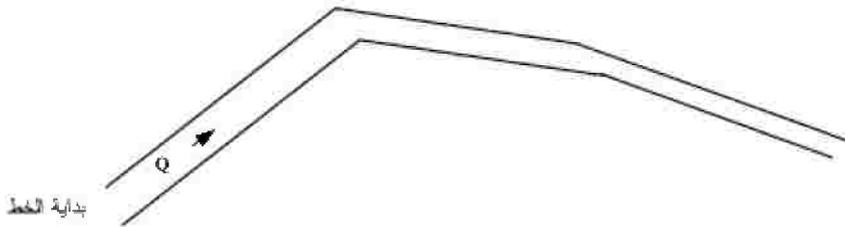
وعلى فرض أن ارتفاع حامل الرشاش ١,٥ متر ($H_r = 1.5 \text{ m}$)

$$H_L = 2.7 \times 10 + 0.75 \times 1.56 + 1.5 + 0.50 \times 0.015 \times 150$$

$$= 27 + 1.17 + 1.5 + 1.123 = 30.79 \text{ m}$$

مثال ٥:

أوجد الضغط عند بداية الخط الفرعي الموضح بالشكل ، إذا علمت ان تصرف الرشاش ١٠ لتر/دقيقة والضغط عند نهاية الخط ٣ كجم/سم^٢ ومعامل هيزن وديلامز ١٤٥ ، استخدم قيمة معامل الفتحات حسابياً.



٤ %	١ %	٢ %	: (S)
٨	٥	٦	: (Nsp)
٩٦ م	٦٠ م	٧٢ م	: (L)
٥٠ سم	٣٧ سم	٢٥ سم	: (d)

الحل

$$Q_{S_3} = Ns \times Q_{sp} = 6 \times \frac{10}{60} = 1 \text{ Lit/sec}$$

$$Q_{S_2} = Ns \times Q_{sp} = 11 \times \frac{10}{60} = 1.833 \text{ Lit/sec}$$

$$Q_{S_1} = Ns \times Q_{sp} = 19 \times \frac{10}{60} = 3.17 \text{ Lit/sec}$$

$$F_3 = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N_3} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N_3^2} = \frac{1}{1.852+1} + \frac{1}{2 \times 6} + \frac{\sqrt{1.852-1}}{6 \times 6^2} = 0.438$$

$$F_2 = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N_2} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N_2^2} = \frac{1}{1.852+1} + \frac{1}{2 \times 5} + \frac{\sqrt{1.852-1}}{6 \times 5^2} = 0.457$$

$$F_1 = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N_1} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N_1^2} = \frac{1}{1.852+1} + \frac{1}{2 \times 8} + \frac{\sqrt{1.852-1}}{6 \times 8^2} = 0.4155$$

$$H_{f3} = 1.22 \times 10^{10} \times L_3 \times \left(\frac{Qs_3}{CHW} \right)^{1.852} \times d_3^{-4.87} \times F_3$$

$$H_{f3} = 1.22 \times 10^{10} \times 72 \times \left(\frac{1}{145} \right)^{1.852} \times 25^{-4.87} \times 0.438 = 5.95m$$

$$H_{f2} = 1.22 \times 10^{10} \times L_2 \times \left(\frac{Qs_2}{CHW} \right)^{1.852} \times d_2^{-4.87} \times F_2$$

$$H_{f2} = 1.22 \times 10^{10} \times 60 \times \left(\frac{1.833}{145} \right)^{1.852} \times 37^{-4.87} \times 0.457 = 2.354m$$

$$H_{f1} = 1.22 \times 10^{10} \times L_1 \times \left(\frac{Qs_1}{CHW} \right)^{1.852} \times d_1^{-4.87} \times F_1$$

$$H_{f1} = 1.22 \times 10^{10} \times 96 \times \left(\frac{3.17}{145} \right)^{1.852} \times 50^{-4.87} \times 0.4155 = 2.174m$$

$$Hf_{total} = H_{f1} + H_{f2} + H_{f3}$$

$$Hf_{total} = 2.174 + 2.354 + 5.95 = 10.48m$$

$$(H)_{LS1} = 0.10Hf_{total} = 0.10 \times 10.48 = 1.048m$$

$$HL = Hf_{total} + H_{Ls} \pm \sum \Delta Hz + He$$

$$HL = 10.48 + 1.048 + \frac{4}{100} \times 96 - \frac{1}{100} \times 60 - \frac{2}{100} \times 72 + (3 \times 10) = 43.33m$$

$$PL = 4.333 \text{ kg/cm}^2$$