

## تحليل شبكات توزيع المياه العاملة بنظام التغذية المتقطعة باستخدام برنامج SWMM 5.1

د. م. محمد بشار المفتي<sup>1</sup>

<sup>1</sup>أستاذ مساعد - قسم الهندسة الصحية والبيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

### الملخص

يسود في سوريا نظام التغذية المتقطعة في معظم التجمعات السكانية، فيلجأ السكان إلى تركيب خزانات منزلية لجمع المياه خلال فترة التغذية، ويمكن أن يتم تركيب خزانات أرضية، أو يتم الضخ مباشرة من الشبكة، مما يؤدي إلى فراغها من المياه كلياً أو جزئياً خلال فترة القطع، ويسيطر الضغط الجوي ضمن الأنابيب، وتعمل الشبكة وفقاً لظروف الجريان الحر في الألفية المكشوفة. عند بداية فترة التغذية التالية، يتم شحن الشبكة بالمياه، التي تقوم بطرد الهواء من الأنابيب، فيزداد الضغط ضمن الأنابيب بشكل سريع وتمر المياه بسرعات عالية، ويمكن أن تتشكل موجة ضغط عالي شبيهة بالمطرقة المائية. وتشكل النماذج الهيدروليكية أداة فعالة لفهم سلوك الشبكة، وتحديد مشاكلها ونقاط ضعفها، وإيجاد وتجريب الحلول المناسبة للتخلص من سلبيات التغذية المتقطعة دون الحاجة للعمل على الشبكة الفعلية. لكن البرامج المستخدمة لنمذجة شبكات مياه الشرب مثل برنامج EPANET2.2 تعتبر أن الشبكة ممثلة تماماً بالمياه خلال كامل فترة المحاكاة، مما يجعلها غير مناسبة لتمثيل سلوك الشبكة خلال فترة شحنها بالمياه. يهدف البحث إلى استخدام برنامج SWMM5.1 لدراسة فترة الشحن، وقد تبين بنتيجة البحث أن طرد الهواء الناتج عن التغذية المفاجئة بالمياه يؤدي إلى تشكل سرعات عالية تستمر لفترة زمنية قصيرة وتصل إلى 14 m/s مع تذبذب كبير في قيمة السرعة، كما تتشكل موجة ضغط مرتفع مع تذبذب كبير في قيمه قبل الاستقرار، أما عند التغذية التدريجية أو عندما تكون الشبكة ممثلة بالمياه عند بداية التغذية، فلا تزيد السرعة الناتجة عن 4 m/s، ولا تحصل تذبذبات كبيرة في قيمة السرعة، كما أن الضغط يزداد تدريجياً حتى الوصول لقيمة الاستقرار، كما تبين أن برنامج SWMM مناسب لمحاكاة شحن الشبكة بالمياه عند بداية فترة التغذية.

تاريخ الإيداع: 2022/3/7

تاريخ القبول: 2022/3/30



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،

يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

الترخيص CC BY-NC-SA 04

**الكلمات المفتاحية:** شبكات مياه الشرب، التغذية المتقطعة، شحن الشبكة، نمذجة شبكات

المياه، EPANET 2.2، SWMM 5.1

## Analysis of water distribution networks operating under intermittent supply conditions using SWMM 5.1

**Dr. Bashar Al-Mofti<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Associated Professor in the Department of Sanitary and Environmental Engineering of Faculty of Civil Engineering- Damascus University.

### Abstract

Intermittent water supply is prevalent among most of Syrian municipalities, residents are forced to install household tanks in order to collect water during the supply period, ground tanks can be installed, or water is pumped directly from the network, this leads to the network being completely or partially emptied of water during the cut-off period, and the atmospheric pressure dominates within the pipes, the network operates under open channel conditions. At the beginning of the next supply period, the network is charged with water, which expels the air from the pipes, so the pressure within the pipes increases rapidly and the water passes at high speeds, and a high-pressure wave similar to a water hammer can be formed. Hydraulic models create an effective tool for understanding the behavior of the network, identifying its problems and weaknesses, finding and experimenting appropriate solutions to avoid the negatives of intermittent supply without the need to work on the actual networks. The used water networks models such as EPANET2.2 consider that the network is completely filled with water during the entire simulation period, which makes it unsuitable for understanding the behavior of the network during the charge period. The research aims to use the SWMM5.1 to study the charging period. The research result shows, that the air expelled during the sudden charge of the network, leads to high velocity values that last for a short period of time and reaches 14m/s, with a large fluctuation in its values, a high-pressure wave is also formed with a large fluctuation in its values before getting stable. For the gradual supply or when the network is full of water at the beginning of the supply period, the resulting velocity does not exceed 4m/s, and there are no large fluctuations in its values, the pressure increases gradually until reaching the stability value. It was found that the SWMM is suitable for the simulation of network charge at the beginning of the supply period.

Received: 7/3/2022

Accepted: 30/3/2022



**Copyright:** Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

**Keywords:** Water Supply Networks, Intermittent Supply, Network Charge, Water Network Modelling, EPANET 2.2, SWMM 5.1

**المقدمة:**

أدت الهجرات السكانية وزيادة تركيز السكان في التجمعات السكانية الكبيرة والتوسع في وصلهم إلى شبكات توزيع مياه مركزية وارتفاع المستوى المعاشي والتغيرات المناخية إلى عدم قدرة المصادر المائية المتوفرة على تلبية الاحتياجات المتزايدة للسكان [1]، يضاف لذلك زيادة المياه غير المحسوبة UfW الناتجة عن عدم القيام بأعمال الصيانة المطلوبة وزيادة التعديات على شبكات المياه، كل هذه العوامل أدت إلى لجوء مؤسسات المياه إلى البحث عن مصادر مياه داعمة، وفي حال عدم توفر المصادر المائية البديلة، أو عدم توفر التمويل اللازم لإيجادها، اللجوء إلى إجراءات خاصة لتوزيع كمية المياه المتوفرة فعلاً على السكان بغض النظر عن احتياجاتهم الفعلية، من أهم هذه الإجراءات التغذية المتقطعة [2].

تعرف التغذية المستمرة بأنها تزويد السكان بالمياه لمدة 24 ساعة في اليوم وباستمرار دون انقطاع على مدار أيام الأسبوع، ويرمز لها (24/7)، أما التغذية المتقطعة فيقصد بها تزويد السكان بالمياه لعدد من الساعات أقل من 24 ساعة يومياً، وقد لا تتجاوز فترة التغذية الفعلية 2-4 ساعات، وقد تتم التغذية مرة واحدة يومياً أو كل يومين أو حتى بتواتر أقل من ذلك.

في حالة التغذية المستمرة تتطابق كمية المياه المرسلة في الشبكة مع الاحتياج الفعلي للسكان، وبالتالي تتطابق كمية المياه الواصلة لأي من عقد الشبكة مع احتياجات السكان فيها. أما في حالة التغذية المتقطعة فتزود الشبكة بكمية مياه أقل من احتياجات السكان الفعلية، وبالتالي قد تختلف كمية المياه الواصلة في العقد المختلفة عن احتياجات السكان تبعاً للضغط المسيطر عند كل عقدة [3].

وقد أصبحت التغذية المتقطعة النظام الأساس للتغذية بالمياه في العديد من دول العالم في آسيا وأفريقيا وأمريكا اللاتينية، خاصة تلك الواقعة في المناطق الجافة وشبه الجافة،

وفي الأرياف وفي المدن المكتظة بالسكان، حيث لا تزيد فترة تغذية الشبكات بالمياه في معظمها عن 2-4 ساعات [4]. فوفقاً لإحصاءات منظمة الصحة العالمية WHO فإن ثلث سكان أمريكا اللاتينية وأفريقيا وأكثر من نصف سكان آسيا الموصولين لشبكات مياه أصبحت تغذيتهم بالمياه تتم باستخدام نظام التغذية المتقطعة [1]، والعدد في تزايد مستمر، كما تنتشر التغذية المتقطعة بشكل واسع في دول حوض البحر الأبيض المتوسط [5] [6].

وفي سوريا تسود التغذية المتقطعة في معظم التجمعات السكانية، ويمكن أن يرد ذلك إلى عدم توفر المصادر المائية، أو إلى ارتفاع المياه غير المحسوبة UfW، إضافة إلى عدم توفر التيار الكهربائي اللازم لتشغيل مضخات الآبار، ويمكن أن يتم ذلك في فصول الجفاف فقط في بعض المدن كما هو الحال في مدينة دمشق، التي تتغذى بشكل مستمر في بقية أوقات السنة، أو تتم التغذية بشكل متقطع باستمرار، ويمكن أن تتم التغذية مرة واحدة كل يومين أو بتواتر أقل حسب كمية المياه المتوفرة.

**المشاكل المرتبطة بالتغذية المتقطعة:**

تكمن المشكلة الأساس في نظام التغذية المتقطعة في قيام مؤسسات المياه بتصميم شبكات التوزيع على حالة التغذية المستمرة 24/7 دون مراعاة نظام التشغيل [1]، حيث يلجأ المستهلكون لسحب أكبر كمية ممكنة من المياه خلال فترة التغذية [7]، فتمر كميات مياه أكبر من التصميمية في أنابيب الشبكة، مما يزيد من سرعة الجريان وبالتالي تزداد الفوائد الهيدروليكية، مما يؤدي إلى انخفاض الضغط ضمن عقد الشبكة، فلا تصل كميات المياه المطلوبة إلى المناطق العالية أو إلى أطراف الشبكة، وقد لاتصل المياه إليها إطلاقاً [1] [8]، ولتأمين المياه خلال فترات الانقطاع يقوم العديد من السكان بتركيب خزانات منزلية لجمع المياه خلال فترة التغذية [7]، يمكن أن تكون الخزانات تحت الأرض [9]، أو يتم الاستعانة

عبر الوصلات المفتوحة باستمرار لخزانات المشتركين. تعمل الأنابيب خلال فترة الامتلاء الجزئي وفقاً لقوانين الجريان الحر في الأقبية المكشوفة [8]، وعند بداية فترة التغذية يزداد الضغط ضمن الأنابيب بشكل سريع وتمر المياه بسرعات عالية [15]، ويؤدي خروج الهواء إلى تسارع كبير للمياه ضمن الأنابيب، مما يتسبب بتشكيل موجة ضغط تسمى صدمة الهواء "air slam"، شبيهة بالمطرقة المائية المتشكلة خلال الإغلاق المفاجئ لمام، لكن قيمتها أقل وتستمر لعدة ثواني، وتكمن مشكلتها في تكرارها كل بداية فترة تغذية [7]، وبما أن تكرار ارتفاع وانخفاض الضغط يؤدي إلى تآكل الأنابيب فهو يتسبب بانخفاض عمرها الاقتصادي، وزيادة احتمال تعرضها للتقرب والانفجار [8]، لذا لابد من دراسة شحن الشبكات بالمياه.

يوجد أسلوبان للتخلص من المشاكل المرتبطة بالتغذية المتقطعة [10]، يستند الأسلوب الأول إلى العودة لنظام التغذية المستمرة عن طريق تخفيض المياه غير المحسوبة UfW، وإيجاد مصادر مائية جديدة لتعويض النقص الحاصل في كمية المياه المتوفرة، أما الأسلوب الثاني فيستند إلى اعتبار التغذية المتقطعة حقيقة واقعة لابد من التعايش معها، وإيجاد الحلول اللازمة للحد من أثارها السلبية [10].

وتشكل النماذج الهيدروليكية أداة فعالة، تساعد على فهم سلوك الشبكة، وتحديد المشاكل ونقاط الضعف، وإيجاد وتجريب الحلول المناسبة للتخلص من سلبات التغذية المتقطعة دون الحاجة للعمل على الشبكة الفعلية، مما يوفر الوقت والجهد والمال. ويجب أن تراعى النماذج المستخدمة الفروقات بين نظامي التغذية المستمرة والتغذية المتقطعة، حيث يجب أن تكون النماذج المستخدمة لتحليل التغذية المتقطعة قادرة على نمذجة فترة شحن أنابيب الشبكة بالمياه عند بداية التغذية، والتي يمكن أن تستمر لمدة قد تصل إلى 20min حسب حجم الشبكة [11]. ومن الفروق الهامة بين النظامين عند نمذجة وتصميم الشبكات استخدام التحليل

بالضخ المباشر من الشبكة لملء الخزانات [10]، وبالتالي قد يستمر جريان المياه في الأنابيب خلال فترات الانقطاع، ولو لم يبق السكان باستهلاك المياه خلالها، مما قد يتسبب في فراغ الأنابيب من المياه جزئياً أو كلياً خلال فترات انقطاع التغذية. ويصبح الاحتياج المائي عند استخدام نظام التغذية المتقطعة غير متعلق بتغيرات الاحتياج الساعية للسكان، بل بكمية المياه العظمى التي يمكن جمعها خلال فترة التغذية، والتي تتعلق بالضغط المسيطر عند عقد الشبكة [11]. وبالمحصلة تنتج عن التغذية المتقطعة العديد من المشاكل من أهمها [12] [5] [13]:

1. انخفاض الضغط عند العقد.
  2. التوزيع غير العادل للمياه [3] [4].
  3. احتمال تلوث المياه وتشكل خطر على الصحة العامة.
  4. هدر المياه [6].
  5. تشكل كلف إضافية على المستهلكين، ناتجة عن تركيب خزانات إضافية ومضخات [14].
  6. تشكل كلف إضافية على مؤسسات المياه ناتجة عن زيادة أعطال الشبكة [14].
  7. عدم دقة عدادات المياه [6].
  8. فراغ أنابيب الشبكة كلياً أو جزئياً من المياه خلال فترة انقطاع التغذية، وضرورة شحن أنابيب الشبكة بالمياه عند بداية كل فترة تغذية [7].
- يعد فراغ أنابيب الشبكة من المياه كلياً أو جزئياً خلال فترة الانقطاع، والناتج عن الضخ المباشر وملء الخزانات، وإعادة شحن الشبكة بالمياه عند بداية التغذية، من المشاكل الهامة المرتبطة بالتغذية المتقطعة، لأن تشكل فراغ ضمن الأنابيب يؤدي إلى ملئه بالهواء، وبالتالي تصبح الأنابيب ممتلئة جزئياً، ويصبح الضغط الجوي مسيطراً ضمن الأنابيب [15]، وعند بداية فترة التغذية التالية، تقوم المياه بطرد الهواء من الأنابيب فور وصول الضغط إلى القيمة المناسبة لذلك، حيث يخرج

وصفه بأنه متغير تدريجياً gradually varied كون تغير العمق والسرعة على طول الأنبوب قليل جداً [20]. في الجريان غير المستقر وغير المنتظم تتغير الغزارة والمميزات الهيدروليكية لمقطع الأنبوب مع الزمن وعلى طول الأنبوب، وبالتالي تقدم معادلات الجريان غير المستقر مفتاحاً لفهم الجريان في الأنابيب لحالة الامتلاء الجزئي خلال شحن الشبكة بالمياه عند بداية فترة التغذية، ويتم ذلك عن طريق التكامل بين معادلات الاستمرار continuity وكمية الحركة Momentum [20].

تستخدم معادلات سانت فينانت Saint Venant equations للتعبير عن الجريان غير المستقر والمتغير تدريجياً في الأقينية المكشوفة، وتتألف من معادلتين: معادلة مصونية الكتلة Conservation of mass (معادلة الاستمرار)، ومعادلة مصونية كمية الحركة Conservation of momentum [20].

معادلة مصونية الكتلة:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

ويمكن أن تكتب المعادلة بالشكل:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \left(\frac{A}{T}\right) \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

حيث:

A: مساحة مقطع الجريان

Q: غزارة الجريان

t: الفاصل الزمني المعتبر

x: طول حبس القناة المعتبر

V: سرعة الجريان

y: عمق المياه

T: عرض مقطع الجريان عند السطح

معادلة مصونية كمية الحركة:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\alpha \partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(S_f - S_0) = 0$$

حيث:

المتعلق بالضغط PDA بدل التحليل المتعلق بالاحتياج DDA [16]، التغيرات الساعية للاحتياج وبالتالي معاملات الذروة Pf المستخدمة [17]، الضغطين الأعظمي والأدنى في عقد الشبكة [10]. وقد تم تطوير عدد من النماذج تراعي هذه المتطلبات لتحليل شبكات المياه ضمن ظروف التغذية المتقطعة، لكنها بقيت ضمن إطار الدراسات الأكاديمية، ولم تجد طريقها للاستخدام العملي [10]. لذا ينصح باستخدام البرامج المفتوحة والمتوفرة لتحليل الشبكات العاملة وفق نظام التغذية المتقطعة، مثل برنامج EPANET 2.2 لتحليل عمل الشبكة عندما تكون الأنابيب مضغوطة [4]، وبرنامج SWMM 5.1 لنمذجة عمل الشبكة خلال فترة الشحن عند بداية التغذية [18].

**الجريان خلال شحن أنابيب الشبكة بالمياه عند بداية فترة التغذية:**

كما تم استعراضه سابقاً، فإنه لا بد من فهم أفضل لسلوك شبكات المياه من أجل تجاوز المشاكل الناتجة عن نظام التغذية المتقطعة، ويمكن أن يتم ذلك أساساً عن طريق نمذجة الشبكات مع مراعاة ظروف التشغيل. بما أن الأنابيب تعمل خلال فترة شحن الشبكة بالمياه تحت ظروف الجريان الحر في الأقينية المكشوفة لأنها تكون ممتلئة جزئياً، ثم تنتقل إلى الجريان المضغوط بعد الامتلاء الكامل، فلا يمكن لبرنامج تحليل الشبكات التقليدية والمتوفرة حالياً مثل EPANET 2.2 [19] تحليل الشبكات ضمن هذه الظروف، لأنها تقترض الامتلاء الكامل للأنابيب وخلال كامل فترة المحاكاة [7] [20]، و يتطلب الأمر استخدام نماذج هيدروليكية يمكنها محاكاة شحن الأنابيب بالمياه لتحديد موقع السطح المشترك هواء-ماء ضمن الشبكة في أية لحظة [11].

يمكن وصف جريان المياه هيدروليكيًا ضمن أنابيب الشبكة في حالة الامتلاء الجزئي بأنه جريان غير مستقر unsteady flow، بسبب تغير عمق المياه وسرعتها مع الزمن، ويمكن

شبكات الصرف الصحي لنظامي الصرف المشترك والمنفصل ضمن ظروف عمل مختلفة. يستخدم البرنامج في المحاكاة كل من طريقة الموجة الحركية kinematic wave، وطريقة الموجة الديناميكية dynamic wave، ويمكن للبرنامج باستخدام الطريقة الأخيرة نمذجة جريان مياه الأمطار ضمن أنابيب الشبكة، اعتباراً من الجريان الحر في الأفتنية المكشوفة عندما تكون الأنابيب ممتلئة جزئياً، حتى الجريان المضغوط ضمن الأنابيب عند الامتلاء الكلي، وبالتالي فبالإمكان استخدامه لمحاكاة فترة شحن الأنابيب بالمياه عند بداية فترة التغذية عند استخدام نظام التغذية المتقطعة [10].

تعتمد طريقة الموجة الديناميكية Full Dynamic Wave في البرنامج على حل معادلات سانت فينانت للجريان غير المستقر والمتغير تدريجياً unsteady gradually varied flow، ويمكنها محاكاة الشبكات الشجرية والشبكات الحلقية، وهذا ما يجعلها قادرة على نمذجة شبكات المياه، ويمكن استخدامها بخطوة حساب زمنية time step قصيرة تصل إلى ثانية واحدة.

### الهدف من البحث:

بما أن البرامج المستخدمة لنمذجة شبكات مياه الشرب لاتصلح لدراسة شحن الشبكات بالمياه في بداية فترة التغذية، فسيتم استخدام برنامج SWMM 5.1 لدراسة فترة الشحن، حيث سيتم دراسة فترة تأخير وصول المياه إلى المستهلكين، والنتائج عن كون أنابيب الشبكة فارغة من المياه عند بداية المحاكاة، لحالتي الفتح السريع لصمام المياه على الخزان (بعد بداية المحاكاة مباشرة)، وحالة ضخ المياه إلى الخزان خلال التغذية (بعد 24h من بداية المحاكاة)، وسيتم دراسة تغيرات سرعة جريان المياه والضغوط في عقد الشبكة بعد فتح المياه مباشرة (بداية المحاكاة)، وستتم جميع الدراسات لحالتي الشبكة فارغة والشبكة ممتلئة عند بداية المحاكاة، وبعد 24h و48h و72h من بداية المحاكاة ولفترات تغذية 2h و4h ولمرة

g: تسارع الجاذبية الأرضية

S<sub>0</sub>: ميل قاع القناة

S<sub>f</sub>: الميل الهيدروليكي

α: معامل الطاقة

ويمكن أن تكتب المعادلة بالشكل:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_0 - S_f)$$

كل المتغيرات في المعادلتين تابعة لكل من الزمن والمسافة على طول القناة (الأنبوب).

ويعطى الميل الهيدروليكي S<sub>f</sub> بالمعادلتين:

من أجل الجريان المضغوط:

$$S_f = \frac{kV|V|}{2D}$$

من أجل الجريان الحر في الأفتنية المكشوفة:

$$S_f = \frac{n^2 V |V|}{R_h^{4/3}}$$

حيث:

k: الخشونة في معادلة دارسي فايسباخ

n: معامل مانينغ

D: قطر الأنبوب

R<sub>h</sub>: نصف القطر الهيدروليكي للقناة (الأنبوب)

برنامج SWMM 5.1 [21]:

موديل إدارة مياه الأمطار (SWMM) Storm Water Management Model هو برنامج مفتوح لمحاكاة نوعية وكمية مياه الأمطار في شبكات الصرف الصحي sewer systems، يحتوي البرنامج على محركات هيدروليكية فعالة ومرنة، وقادرة على محاكاة جريان الماء عبر نظام مؤلف من أنابيب مغلقة وأفتنية مفتوحة، ويمكن أن يحتوي على ملحقات مختلفة مثل: الخزانات، ومحطات التنقية، والمضخات، ومنشآت وتجهيزات تنظيم جريان. طور البرنامج من قبل قسم التغذية بالمياه والموارد المائية في وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة الأمريكية USEPA، وقد حظي البرنامج بانتشار واسع لنمذجة

خزان التغذية الرئيس على أساس الاحتياج اليومي الأعظمي، فكان مقطعه  $1735\text{m}^2$  واستخدم الارتفاع الأولي حسب حجم المياه اللازم للتغذية وفقاً لعدد ساعات التغذية المستخدم في المحاكاة.

تم وصل الخزانات إلى العقد بأنابيب بطول مكافئ هيدروليكيماً لأنابيب التغذية للأبنية المختلفة ضمن التجمع المدروس كما يظهر في الجدول (1)، حيث اعتمد أنبوب تغذية البناء الواحد بقطر 40mm، وطول 35m، واستخدمت الغزارات الواردة في الجدول (1). ويظهر الشكل (1) الشبكة مع الخزانات المضافة، وقد زودت الشبكة بمصب outfall مع أنبوب وصل بقطر 1.0cm حتى يصبح بالإمكان تشغيل البرنامج، واختير القطر الصغير حتى لا يؤثر المصب على غزارات المياه ضمن الشبكة.

الجدول (1) مواصفات الخزانات المستخدمة في العقد حسب موقعها في الشبكة وأقطار أنابيب الوصل

العقدة	حجم الخزان $\text{m}^3$	ارتفاع المياه m	مساحة المقطع $\text{m}^2$	أنبوب الوصل القطر mm	الطول المكافئ m
زاوية	104.81	2	52.41	40	35.31
طرفية	209.63	2	104.81	50	29.35
وسطية	419.25	2	209.63	65	30.16

تم اعتماد ارتفاع غرف التفقيش بنفس أقطار الأنابيب المستخدمة، ومساحة مقطع  $0.008\text{m}^2$ ، وتم اعتماد منسوب فيضان surcharge depth لغرف التفقيش  $+100\text{m}$  فوق منسوب القاع، لمنع فيضان المياه من الشبكة وللتمكن من قياس الضاغط عندها. تم الحساب باستخدام طريقة الموجة الديناميكية dynamic wave، تم اختيار معامل مانينج  $C=0.011$  من أجل الحساب عند الامتلاء الجزئي، واختيرت معادلة دارسي فايسباخ للحساب عند الامتلاء الكلي  $k=1.0\text{mm}$ .

### النتائج ومناقشتها:

تم تصميم الشبكة على حالة التغذية المستمرة باستخدام طريقة التحليل المعتمد على الطلب DDA مع اعتماد الفرضيات التالية: الضاغط الأدنى اللازم لإيصال المياه

واحدة يومياً، ولحالاتي استخدام خزانات عالية للأبنية واستخدام خزانات أرضية على الطرف البعيد عن خزان التغذية الرئيس للشبكة.

### مواد وطرائق البحث:

سيتم استخدام برنامج EPANET 2.2.0 [19] لتصميم وتحليل شبكة توزيع افتراضية مؤلفة من 16 حلقة كما هو وارد في الشكل (1). طول كل من أنابيب الشبكة 125 m، تخدم ضاحية سكنية تحوي على 312 بناء، مساحة البناء  $600\text{m}^2$ ، مقام على أرض مساحتها  $800\text{m}^2$ ، كل بناء مؤلف من خمسة طوابق في كل منها 4 شقق، شقتين بمساحة  $140\text{m}^2$  لكل شقة، وشقتين بمساحة  $100\text{m}^2$  لكل شقة، بعدد سكان إجمالي 31200 P وكثافة سكانية  $1248\text{p/ha}$ . وقد اعتبرت الشبكة أفقية تماماً بهدف إلغاء أثر فروق المناسيب على أداء الشبكة. تم التحليل باستخدام معادلة دارسي-فايسباخ مع اعتبار الخشونة  $k=1.0\text{mm}$  [22]، مع استخدام طريقة التحليل المعتمد على الضاغط (PDA).

من أجل دراسة شحن الشبكة بالمياه تم استخدام برنامج SWMM 5.1 [21]، تم تحميل الشبكة على البرنامج، ثم تم تعريف الأنابيب في البرنامج على أساس ناقل رئيس force main، وتم إضافة خزانات لعقد الشبكة لمحاكاة الاحتياج المائي للسكان ضمنها (خزانات السكان)، حجم الخزان مساوٍ للاحتياج اليومي الأعظمي في العقدة، وارتفاعه 27m مساوٍ للضاغط اللازم لإيصال المياه لمبنى مؤلف من خمسة طوابق كما في الجدول (3)، وتم وصل كل خزان إلى مصب مياه outfall منسوبه  $\pm 0.00$  لمحاكاة سحب السكان للمياه من الخزان، وتم تعريف سحب المياه من المصب عن طريق rating curves يعطي الغزارة الخارجة حسب الضاغط المتوفر على المصب، وعلى أساس سحب المياه خلال 24h، ويلخص الجدول (1) مواصفات الخزانات المستخدمة في العقد حسب موقعها في الشبكة: الوسطية والطرفية والزواوية. تم حساب حجم

mm كما هو واضح في الشكل (1)، وتراوحت سرعة جريان المياه بين 0.22 m/s في الأنابيب بقطر 80 mm وهو القطر الأدنى الذي تم اعتماده في التصميم و1.14 m/s، وتراوحت الضواغط ضمن عقد الشبكة بين 34.0 m عند العقدة الطرفية J25 و45.57 m عند عقدة المدخل J1، ارتفاع الخزان 46.2 m في المرحلة التمهيديّة من البحث تم محاكاة الشبكة باستخدام طريقة التحليل المعتمد على الضاغط (PDA) [19]، من أجل عدد ساعات تغذية: 2 و3 و4 و6 ساعات، بهدف تحديد الغزارة الفعلية الواصلة للشبكة حسب عدد ساعات التغذية، وتم إدخال المعلومات التالية للنموذج:

الاحتياج المائي في العقد: وهو احتياج السكان الواجب توفره، وقد أخذت قيم الاحتياج اليومي الأعظمي  $Q_{d,max}$  من الجدول (2) مع استخدام معامل الذروة اليومي الأعظمي  $Pf_{d,max}=1.72$ ، وأخذت عوامل الذروة الساعية الأعظمية حسب عدد ساعات التغذية من الجدول (3) والتي حسبت من العلاقة التالية [7]:

$$P_f = \frac{24}{N}$$

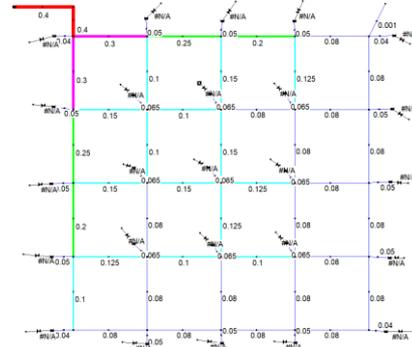
الجدول (3) معامل عدم الانتظام  $Pf_{h,max}$  حسب عدد ساعات التغذية

عدد ساعات التغذية	2	3	4	6	8	10	12
$Pf_{h,max}$	12	8	6	4	3	2.4	2

الضاغط الأدنى المطلوب  $H_{min}$ : وهو الضاغط الأدنى اللازم لإيصال المياه إلى خزانات التغذية، وقد أعطى دليل إمداد المياه في الهند القيم الواردة في الجدول (4) للضاغط الأدنى اللازم حسب عدد طوابق المبنى [7]. وقد تم استخدام الضاغط الأدنى  $H_{min}=27$  m اللازم لإيصال المياه إلى الخزان العلوي من أجل مباني بارتفاع خمسة طوابق المستخدمة في نموذج البحث.

الضاغط الأعظمي  $H_{max}$ : هو الضاغط اللازم لوصول الاحتياج الفعلي إلى العقدة، وقد أخذ في الحساب  $H_{max}=32$  m بإضافة 5 m الضاغط الواجب توفره عند صمام الفواشة.

للطابق الخامس 34 m بحيث يتشكل ضاغط أدنى على الجهاز الصحي الأسوأ هيدروليكيًا لا يقل عن 10 m، وفواقد مجموعة العداد مع فواقد الوصلة المنزلية 8.5m [23]. الاحتياج المائي للفرد  $1/P/d$ ، عوامل الذروة المستخدمة في التصميم  $Pf_{d,max}=1.72$ ،  $Pf_{h,max}=3.18$  محسوبة على أساس الغزارة اليومية الوسطية  $Q_{d,av}$  [24]، فكانت: الغزارة اليومية الوسطية  $Q_{d,av}=3900$  m<sup>3</sup>/d، والغزارة الساعية الأعظمية  $Q_{d,max}=6708$  m<sup>3</sup>/d، والغزارة باستخدام  $Q_{h,max}=143.54$  l/s. تم حساب الغزارات في العقد باستخدام الطريقة التحليلية المتضمنة توزيع الغزارات على أنابيب الحلقات حسب أطوالها، ثم تحديد الغزارات ضمن العقد، بحيث تغذي كل عقدة المساحة المشكّلة من أنصاف الأنابيب المتصلة بها [22]، وقد لخصت قيم الاحتياج المائي الواجب توفره في عقد الشبكة حسب موقعها في الجدول (2). كما يبين الشكل (1) أقطار الأنابيب (m).



الشكل (1) مخطط الشبكة الافتراضية مع أقطار الأنابيب (m)

الجدول (2) توزيع الاحتياج المائي في عقد الشبكة حسب موقعها

العقدة	$Q_{d,max}$ l/sec	$Q_{d,av}$ l/sec	$Q_{h,max}$ l/sec
زاوية	1.21	0.71	2.26
طرفية	2.43	1.41	4.48
وسطية	4.85	2.82	8.97

تمت نمذجة الشبكة على برنامج EPANET 2.2.0 وفقاً لتقييم الغزارة  $Q_{d,max}$  الواردة في الجدول (2)، تم الحساب لنظام التغذية المستمر 24/7 لحالة الاستقرار Steady-State وكانت نتائج الحساب كالتالي: تراوحت أقطار الأنابيب بين 80-400

## الجدول (5) الغزارة الواجب تأمينها وارتفاع المياه في خزان التغذية

## حسب عدد ساعات التغذية

عدد ساعات التغذية	النسبة من الاحتياج الكلي %	حجم المياه m <sup>3</sup> /d	Q l/s	ارتفاع المياه m
2	39%	2617	363.47	1.51
3	52%	3488	323	2.01
4	62%	4159	288.82	2.40

تم في المرحلة الأولى من البحث تحليل الشبكة من أجل زمن تغذية ساعتين يومياً (2/7)، وقد تم العمل في هذه المرحلة وفق أربع مراحل فرعية:

- الأولى أنابيب الشبكة فارغة تماماً من المياه عند بداية المحاكاة واستخدام خزانات عالية في الأبنية.
- الثانية نفس الأولى مع استخدام خزانات أرضية على أطراف الشبكة البعيدة.
- الثالثة أنابيب الشبكة ممثلة بالمياه عند بداية المحاكاة واستخدام خزانات عالية في الأبنية.
- الرابعة نفس الثالثة مع استخدام خزانات أرضية على أطراف الشبكة البعيدة.

استخدمت في هذه المرحلة الفرضيات التالية: ارتفاع المياه الأولي في خزان التغذية الرئيس عند بداية المحاكاة 1.51m (الجدول (5))، فترة المحاكاة الكلية أربعة أيام، ارتفاع المياه الأولي في الخزان بعد 24 و 48 و 72 ساعة من بداية المحاكاة يساوي الصفر، وتم تغذيته في هذه الأوقات بالمياه بغزارة 363.47l/s لمدة ساعتين كل مرة. الخطوة الزمنية لكل من الحساب وإظهار النتائج 1sec.

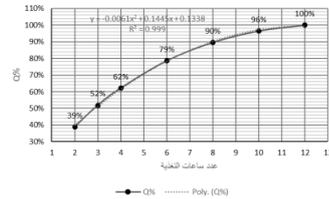
في المرحلة الفرعية الأولى حيث أنابيب الشبكة فارغة تماماً من المياه عند بداية المحاكاة واستخدام خزانات عالية في الأبنية، تم تحديد الزمن اللازم لوصول المياه إلى خزانات المستهلكين اعتباراً من بداية المحاكاة (بداية التغذية)، والتي تمثل الزمن اللازم لوصول المياه إلى المستهلكين، ويظهر الشكل (3) الزمن اللازم لوصول المياه حسب بعد عقدة التغذية عن الخزان الرئيس. يلاحظ أن زمن تأخير وصول المياه إلى المستهلكين يتراوح بين 22sec في بداية الشبكة و 4 دقائق

ثم تم تحديد الغزارات الفعلية الواصلة لعقد الشبكة حسب عدد ساعات التغذية والتي لخصت في الشكل (2) الذي يظهر الغزارة الفعلية الواصلة للشبكة كاملة كنسبة مئوية من الاحتياج الكلي حسب عدد ساعات التغذية.

تم بعد ذلك نمذجة الشبكة باستخدام برنامج SWMM 5.1، وبسبب عدم احتواء البرنامج على صمامات تحكم، تم تحديد زمن التغذية في البرنامج عن طريق تحديد كمية المياه الفعلية الواجب تأمينها من أجل زمن التغذية المطلوب باستخدام النسب المئوية المعطاة في الشكل (2)، وبضربها بالغزارة اليومية الأعظمية وقدرها 6708 m<sup>3</sup>/d وبعدد ساعات التغذية، نحصل على حجم المياه اللازم تأمينه من أجل عدد ساعات التغذية المفروض، وبتقسيم حجم المياه الناتج على مساحة مقطع خزان التغذية الرئيس وقدرها 1735 m<sup>2</sup> نحصل على ارتفاع الماء في الخزان عند بداية التغذية، ويعطي الجدول (5) الغزارة الواجب تأمينها وارتفاع المياه في خزان التغذية حسب عدد ساعات التغذية، ثم يعوض الارتفاع الناتج في الارتفاع الأولي للمياه في الخزان Initial Depth في البرنامج.

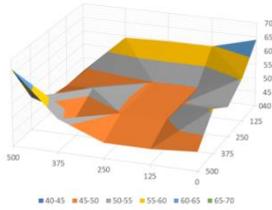
## الجدول (4) الضاغط الأدنى اللازم لإيصال المياه لخزانات التغذية [7]

عدد الطوابق	ارتفاع الخزان (m)
طابق واحد	7
طابقين	12
ثلاثة طوابق	17
أربعة طوابق	22
خمسة طوابق	27



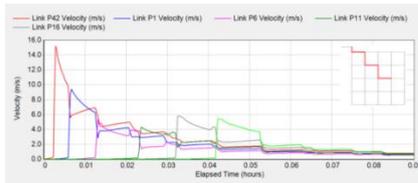
الشكل (2) الغزارة الفعلية الواصلة للشبكة كنسبة مئوية من الاحتياج الكلي الواجب توفره حسب عدد ساعات التغذية

وصلت إلى 6.2bar عند عقدة النهاية، ويستمر هذا التذبذب بحدود 3min، ويلاحظ بمقارنة الشكلين (4) و(5) التشابه بين تذبذبات الضاغط وتذبذبات وصول المياه إلى خزانات المستهلكين. ويمكن أن يرد هذا التذبذب لطرد الهواء من الشبكة، ويظهر الشكل (6) مغلف القيم العظمى للضاغط في عقد الشبكة بعد بداية التغذية. ويلاحظ أن قيمة الضاغط قد حققت قيمة عظمى 64m عند عقدة مدخل الشبكة، وبحدود 67m عند عقدة النهاية.



الشكل (6) مغلف القيم العظمى للضاغط بعد بداية التغذية

ثم تم تحديد تغيرات سرعة الجريان لمجموعة مختارة من الأنابيب وفق المسار القطري للشبكة اعتباراً من أنبوب الوصل إلى الخزان الأنبوب P-42 وحتى الوصول إلى عقدة نهاية الشبكة الأنبوب P-36، ويظهر الشكل (7) النتائج. يلاحظ من الشكل التذبذب الكبير للسرعة ووصولها إلى قيم مرتفعة جداً عند بداية الشبكة، حيث وصلت السرعة في أنبوب الوصل إلى الخزان P-42 إلى 15m/s، وكانت القيمة الدنيا بحدود 4m/s، وتستمر هذه السرعة لفترات قصيرة، لكن ارتفاع قيمها وتذبذبها وتكرارها عند بداية كل فترة تغذية للشبكة يؤدي إلى تآكل الأنابيب. ويلاحظ مطابقة النتائج لما ورد في الدراسة المرجعية. يظهر الشكل (8) تغيرات السرعة في أنابيب مختارة من الشبكة بعد 20h وحتى 96h من بداية المحاكاة.

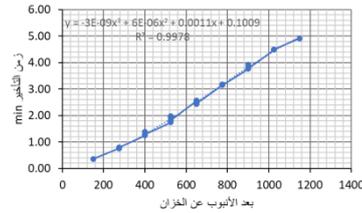


الشكل (7) تغيرات السرعة مع الزمن لأنابيب مختارة، الأنابيب فارغة عند بداية المحاكاة

و55 ثانية عند الطرف الأبعد للشبكة، أي أن السكان عند طرف الشبكة يتلقون المياه بتأخير يقارب 4.5 دقيقة عن السكان في بداية الشبكة.

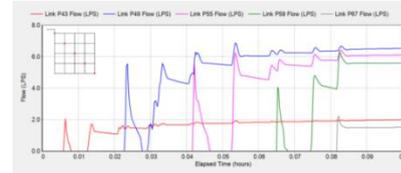
ويظهر الشكل (4) الغزارة الواصلة إلى خزانات المياه المتصلة بعقد المحور القطري للشبكة عند بداية التغذية، يلاحظ من الشكل وصول المياه بشكل متقطع في البداية ثم تتذبذب الغزارة الواصلة، ثم تزداد تدريجياً حتى استقرارها.

تم تحديد تغيرات الضاغط مع الزمن لمجموعة مختارة من العقد، وقد تم اختيار المسار القطري للشبكة الواصل من عقدة البداية J-1 إلى العقدة الطرفية J-25، وقد تم إظهار النتيجة في الشكل (5).

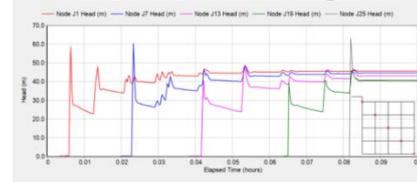


الشكل (3) الزمن اللازم لوصول المياه حسب بعد عقدة التغذية عن

الخزان الرئيس لمدة تغذية ساعتين



الشكل (4) الغزارة الواصلة إلى خزانات المياه المتصلة بعقد المحور القطري للشبكة عند بداية التغذية



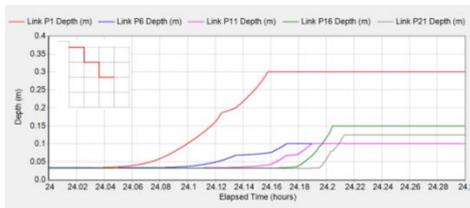
الشكل (5) تغيرات الضاغط مع الزمن لعقد مختارة، الأنابيب فارغة عند بداية المحاكاة

يظهر من الشكل تذبذب قيم الضاغط خلال الدقائق الأولى من بداية المحاكاة، وقد وصلت قيمته العظمى إلى حدود 6.0bar في عقد بداية الشبكة، علماً بأن ارتفاع الخزان يبلغ 46.2 m، أي بزيادة تقارب 30% من ارتفاع الخزان، وقد

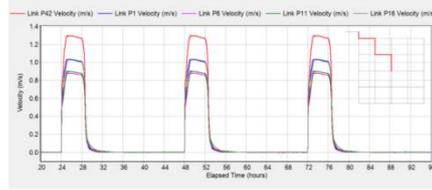
المياه فيها تدريجياً وببطء، ويرد ذلك إلى التغذية التدريجية في هذه الحالة. ويلاحظ أن امتلاء الأنابيب قد استغرق زمناً يتراوح بين 7min عند بداية الشبكة (قطر الأنبوب 400mm) وما يقارب الدقيقة والنصف عند منتصفها (قطر الأنبوب 150mm) والدقيقتين عند نهايتها (قطر الأنبوب 80mm). يلاحظ من الشكل (12) زيادة الضاغط وتذبذبه حتى استقراره، ولم يلاحظ تشكل موجة ضغط مرتفع، لكن تكرار تذبذب الضغط عند بداية التغذية في كل مرة يمكن أن يتسبب بأضرار للشبكة على المدى الطويل، ويمكن أن يرد السبب في هذا التذبذب إلى طرد الهواء من الشبكة.

ثم تم تحديد تغيرات السرعة بعد 24h من بداية المحاكاة بعد بدء التغذية مباشرةً، ويظهر الشكل (11) النتيجة. ويلاحظ من الشكلين تذبذب السرعة، وتشكل سرعة مرتفعة نسبياً في بعض أنابيب الشبكة، خصوصاً في أنابيب وسط ونهاية الشبكة، لكن هذه السرعة لم تتجاوز 4m/s، ويمكن أن يرد السبب في ذلك إلى طرد الهواء من الشبكة، وبالربط مع زمن امتلاء الأنابيب، يلاحظ أنه كلما زاد زمن امتلاء الأنابيب كلما كانت سرعة الجريان أقل وأكثر انتظاماً.

كما تم دراسة تغيرات الضاغط في عقد محور الشبكة القطري بعد 24h من بداية المحاكاة، ولخصت النتيجة في الشكل (12). ويلاحظ تزايد الضاغط تدريجياً وتذبذبه الضاغط قبل دون حصول ارتفاع مفاجئ.

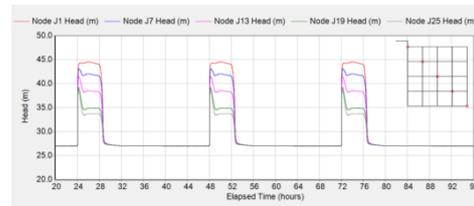


الشكل (10) تغيرات ارتفاع المياه في أنابيب مختارة بعد بداية التغذية بعد 24h من بداية المحاكاة



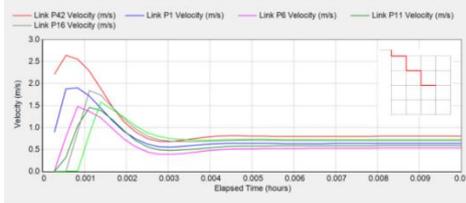
الشكل (8) تغيرات السرعة في أنابيب مختارة من الشبكة بعد 20h من بداية المحاكاة

يلاحظ من الشكل أن التغذية التدريجية للشبكة أدت إلى عدم تشكل سرعة كبيرة في أنابيب الشبكة، حيث لم تتجاوز السرعة قيمة 1.3m/s في أي من أنابيب الشبكة، وأنابيب الشبكة كانت ممتلئة بالمياه عند بداية تغذية الخزانات بالمياه. ويظهر الشكل (9) تغيرات الضاغط في عقد محور الشبكة بعد 20h وحتى 96h من بداية المحاكاة. يلاحظ من الشكل عدم تشكل موجة ضغط عند عقدة بداية الشبكة، وحصول موجة تزايد قيمتها تدريجياً مع الاقتراب من عقدة نهاية الشبكة حيث تبلغ قيمتها الأعظمية، لكن لم تحصل تذبذبات في الضغط، ويرد ذلك إلى التغذية التدريجية، وامتلاء أنابيب الشبكة بالمياه عند بداية التغذية، والتي ترافقت مع ملء الخزانات بالمياه في هذه الحالة.



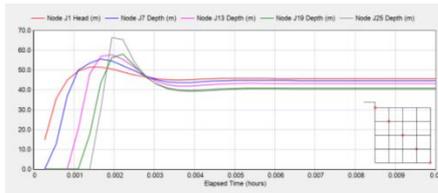
الشكل (9) تغيرات الضاغط في عقد محور الشبكة بعد 20h من بداية المحاكاة

في المرحلة الفرعية الثانية: أعيدت المحاكاة مع اعتبار وجود خزانات أرضية في العقد الطرفية في نهاية الشبكة، العقد J-19, J-20, J-24, J-25 مع بقاء بقية العوامل في المرحلة الفرعية الأولى دون تغيير، ويظهر الشكل (10) تغيرات منسوب المياه في أنابيب مختارة من الشبكة بعد بداية التغذية مباشرةً بعد 24h من بداية المحاكاة، ويلاحظ من الشكلين أن الأنابيب كانت شبه فارغة عند بداية التغذية، وارتفع منسوب



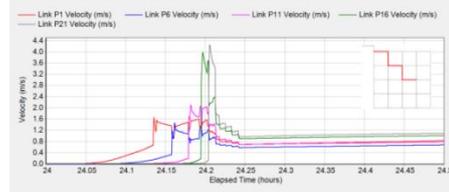
الشكل (13) تغيرات السرعة في أنابيب مختارة، الأنابيب ممتلئة بالمياه عند بداية المحاكاة

ويظهر الشكل (14) تغيرات الضاغظ في عقد محور الشبكة بعد بداية المحاكاة، ويلاحظ تشكل موجة ضغط عند بداية التغذية دون حصول أية تذبذبات، وحصلت هذه الموجة بشكل متزامن تقريباً مع تأخير بسيط بين عقد الشبكة، وكانت قيمتها العظمى عند عقدة نهاية الشبكة، وبالمقارنة مع الشكل (5) عندما كانت الشبكة فارغة عند بداية المحاكاة، يظهر بوضوح تأثير ملء الأنابيب وطرد الهواء والذي يؤدي إلى تأخير موجة الضغط وتذبذبها الكبير عند بداية فترة التغذية عندما تكون أنابيب الشبكة فارغة عند بداية التغذية. ولم يلحظ وجود أية فروق في تغيرات الضاغظ في عقد الشبكة بعد 24h و 48h و 72h من بداية التغذية مقارنة بالوضع عندما كانت الشبكة فارغة عند بداية المحاكاة والتي يمثلها الشكل (9)، ويعود ذلك إلى التغذية التدريجية.

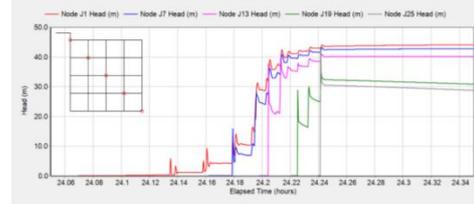


الشكل (14) تغيرات الضاغظ في عقد محور الشبكة بعد بداية المحاكاة

في المرحلة الفرعية الرابعة: تم محاكاة الشبكة والأنابيب ممتلئة بالمياه عند بداية المحاكاة، نفس الحالة السابقة لكن مع استخدام خزانات أرضية في العقد الطرفية. وبنسبة تحليل سلوك الشبكة لم يلحظ وجود فروق واضحة في تغيرات السرعة والضاغظ عند بداية المحاكاة (بداية التغذية) عن حالة استخدام خزانات عالية في العقد الطرفية في المرحلة الفرعية



الشكل (11) تغيرات سرعة الجريان في أنابيب مختارة من الشبكة بعد 24h من بداية المحاكاة

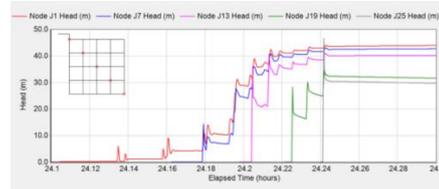


الشكل (12) تغيرات الضاغظ في عقد المحور القطري للشبكة في المرحلة الفرعية الثالثة: تم محاكاة الشبكة والأنابيب ممتلئة تماماً بالمياه عند بداية المحاكاة، مع استخدام خزانات عالية في كل العقد والمحافظة على بقية العوامل دون تغيير. تم في البداية دراسة تغيرات السرعة عند بداية المحاكاة، ويظهر الشكل (13) النتائج، يلاحظ من الشكل تشكل زيادة في السرعة وصلت قيمتها الأعظمية إلى حدود 2.5 m/s، وهي زيادة طبيعية ناتجة عن تغير الطاقة الحركية للمياه، ولم يحصل أي تذبذب في السرعة، وبمقارنة هذه النتيجة مع الشكل (8) يلاحظ الأثر الواضح لطرد الهواء من الشبكة عندما تكون الشبكة فارغة عند بداية التغذية.

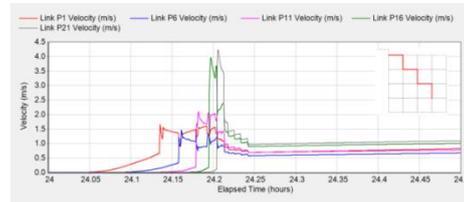
ولم يلحظ وجود أي تغيير في السرعات عند بداية التغذية بعد 24h و 48h و 72h من بداية المحاكاة مقارنة بالوضع عندما كانت الشبكة فارغة عند بداية المحاكاة والتي يمثلها الشكل (8)، وهذا متوقع لأن الظروف كانت مماثلة تماماً من حيث امتلاء الأنابيب بالمياه عند بداية التغذية عند هذه الأزمنة، مما يؤكد الاستنتاج بأن التغذية التدريجية لا تسبب تشكل سرع كبيرة في الأنابيب كما هو الحال مع التغذية عند فتح الخزانات الممتلئة بالمياه.

- كان هناك تطابق شبه كامل في الزمن اللازم لوصول المياه إلى المستهلكين في معظم العقد كما ورد في الشكل (3)، ولم يزد الفرق الأعظمي في بعض العقد عن 3sec.
- كان مخطط الغزرات الواصلة إلى الخزانات مطابق تماماً لما ورد في الشكل (4).
- كان هناك تطابق كامل في تغيرات الضاغط مع الزمن في العقد عند بداية المحاكاة (بداية التغذية)، تماماً كما ورد في الشكل (5).
- لوحظ وجود تطابق كامل في تغيرات السرعة مع الزمن عند بداية المحاكاة (بداية التغذية)، تماماً كما ورد في الشكل (7).
- لوحظ وجود تطابق في تغيرات السرعة مع الزمن والسرعة العظمى بعد 24h من بداية المحاكاة (بداية فترات التغذية التالية)، لكن تستمر السرعة العالية لزمان أطول بسبب استمرار التغذية لفترة أطول.
- لوحظ وجود تطابق في تغيرات الضاغط مع الزمن والضاغط الأعظمي بعد 24h و 48h و 96h من بداية المحاكاة (بداية فترات التغذية التالية)، لكن هناك زمن استمرار للضغوط بسبب استمرار التغذية لفترة أطول.
- أعيدت المحاكاة مع اعتبار وجود خزانات أرضية في العقد الطرفية في نهاية الشبكة، في العقد J19, J20, J24, J25 وبمقارنة وبقاء بقية العوامل تماماً كما في المرحلة السابقة، وبمقارنة النتائج مع الحالة المماثلة عند التغذية لمدة ساعتين (الحالة الفرعية الثانية)، حيث ستمت المقارنة لسلوك الشبكة بعد 24h من بدء المحاكاة، وليس لسلوكها بعد بدايتها مباشرة بسبب تطابق الظروف، يتبين التالي:
- تم امتلاء الأنابيب بالمياه بعد 24h من بدء المحاكاة بسلوك مشابه لما ورد في الشكل (10) وتراوحت مدة الامتلاء بين 8.7 min عند بداية الشبكة والدقيقة الواحدة قرب نهايتها.

الثالثة، والظاهرة في الشكلين (13) و (14)، وكان سلوك الشبكة بعد 24h مشابهاً لسلوكها عندما كانت الشبكة فارغة عند بداية المحاكاة في المرحلة الفرعية الثانية، حيث تم تفريغ الأنابيب من المياه خلال فترة القطع، وكانت تغيرات ارتفاع المياه في الأنابيب مشابهة تماماً لما هو وارد في الشكل (10). ويظهر الشكل (15) تغيرات الضاغط في عقد محور الشبكة بعد 24h، كما يظهر الشكل (16) تغيرات السرعة في أنابيب مختارة من الشبكة لنفس الحالة. ويلاحظ تطابقهما مع الشكلين (12) و (11) على الترتيب.



الشكل (15) تغيرات الضاغط في عقد محور الشبكة بعد 24h، الشبكة ممتلئة بالمياه عند بداية المحاكاة مع استخدام خزانات أرضية في العقد الطرفية



الشكل (16) تغيرات السرعة في أنابيب مختارة بعد 24h، الشبكة ممتلئة بالمياه عند بداية المحاكاة مع استخدام خزانات أرضية في العقد الطرفية

في المرحلة الثانية من البحث تم تحليل الشبكة من أجل زمن تغذية أربع ساعات يومياً (4/7)، وقد تم العمل في هذه المرحلة وفق نفس المراحل الفرعية التي تمت دراستها في المرحلة الأولى. عندما تمت المحاكاة لحالة الشبكة فارغة عند بداية المحاكاة، واستخدام خزانات عالية في الأبنية، وبالمقارنة مع الحالة المماثلة لمدة تغذية ساعتين في اليوم (الحالة الفرعية الأولى) يتبين التالي:

- كان هناك تطابق كامل في تغيرات الضاغط مع الزمن في العقد عند بداية المحاكاة (بداية التغذية)، تماماً كما ورد في الشكل (14).

ثم أعيدت المحاكاة مع اعتبار الشبكة ممتلئة تماماً بالمياه عند بداية المحاكاة، مع اعتبار وجود خزانات أرضية في العقد الطرفية في نهاية الشبكة، في العقد J-19, J-20, J-24, J-25، وبقاء بقية العوامل تماماً كما في المرحلة السابقة، وبمقارنة النتائج مع الحالة المماثلة عند التغذية لمدة ساعتين (الحالة الفرعية الرابعة)، يتبين التالي:

- هناك تشابه في سلوك تغيرات الضاغط مع الزمن عند بداية المحاكاة والوارد في الشكل (14)، مع انخفاض في قيمة الضاغط الأعظمية في أنابيب نهاية الشبكة.

- هناك تشابه كبير في سلوك تغيرات السرعة مع الزمن بعد بداية المحاكاة الوارد في الشكل (13)، مع وجود اختلاف طفيف من أنبوب لآخر في أنابيب نهاية الشبكة.

- هناك تشابه كبير في سلوك تغيرات الضاغط في عقد الشبكة بعد 24h من بداية المحاكاة والوارد في الشكل (15) مع إزاحة زمنية بحدود الدقيقتين.

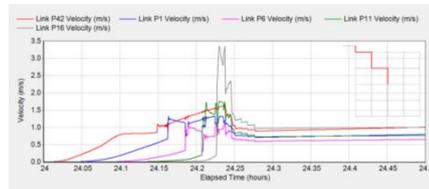
- هناك تشابه كبير في سلوك تغيرات السرعة مع الزمن في أنابيب الشبكة بعد 24h من بداية المحاكاة والظاهر في الشكل (16)، مع إزاحة زمنية تقارب الدقيقتين، وانخفاض طفيف في القيم، حيث وصلت السرعة العظمى في الأنابيب P-16 إلى 4m/s، وفي الأنابيب P-21 إلى 3.5m/s، وفي بقية الأنابيب لم تزد عن 1.7m/s.

#### الاستنتاجات والتوصيات:

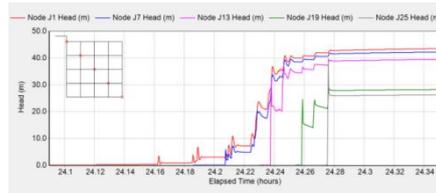
- يمكن أن يعطي استخدام برنامج SWMM فكرة واضحة عن الأداء الهيدروليكي لشبكة الإمداد بالمياه خلال فترة الشحن بالمياه عند بداية التغذية، سواء كانت الشبكة فارغة أو ممتلئة بالمياه عند بداية التغذية.

- سارت تغيرات السرعة مع الزمن ضمن أنابيب الشبكة مع الزمن بسلوك مشابه، لكن مع تأخير زمني طفيف وانخفاض في قيمة السرعة العظمى كما يتضح من الشكل (17) ومقارنته بالشكل (11).

- سارت تغيرات الضاغط مع الزمن ضمن أنابيب الشبكة بعد 24h من بدء المحاكاة بسلوك مشابه، لكن مع انزياح زمني طفيف كما يتضح من الشكل (18) ومقارنته بالشكل (12).



الشكل (17) تغيرات سرعة الجريان مع الزمن في أنابيب مختارة من الشبكة بعد 24h من بداية المحاكاة



الشكل (18) تغيرات الضاغط مع الزمن في عقد مختارة من الشبكة بعد 24h من بداية المحاكاة

ثم أعيدت المحاكاة مع اعتبار الشبكة ممتلئة تماماً عند بداية المحاكاة، واستخدام خزانات عالية في الأبنية، مع بقاء بقية العوامل تماماً كما في المرحلة السابقة، وبمقارنة النتائج مع الحالة المماثلة عند التغذية لمدة ساعتين (الحالة الفرعية الثالثة)، حيث تمت المقارنة لسلوك الشبكة بعد بداية المحاكاة مباشرة، وليس لسلوكها بعد 24h من بدايتها بسبب تطابق الظروف في هذه الحالة، يتبين التالي:

- لوحظ وجود تطابق كامل في تغيرات السرعة مع الزمن عند بداية المحاكاة (بداية التغذية)، تماماً كما ورد في الشكل (13).

- في حالة التغذية المفاجئة (فتح صمامات خزان التغذية)، وعندما تكون الشبكة فارغة من المياه عند بداية التغذية:
  - o تتأخر المياه في الوصول إلى المستهلكين، ويتعلق زمن التأخير بكل من بعد عقدة التغذية عن خزان التغذية، والضغوط المسيطر في العقدة، وذلك بغض النظر عن الزمن المستخدم للتغذية، وكان وصول المياه متقطعاً في البداية، ويقدم برنامج SWMM أداة مناسبة لتقدير زمن التأخير.
  - o تتعرض الشبكة إلى سرعات جريان عالية، قد تتجاوز 14m/s، خاصة في أنبوب وصل الشبكة مع الخزان الرئيس، وتتنخفض السرعة تدريجياً مع الاقتراب من نهاية الشبكة، لكنها تبقى مرتفعة. كما تتعرض إلى تذبذبات كبيرة في السرعة، تستمر لفترة زمنية قصيرة قبل أن تستقر.
  - o تتعرض الشبكة إلى ضغوط مرتفع، قد يزيد بحدود 30% عن ضغوط التشغيل. كما تتعرض إلى تذبذبات كبيرة في الضغوط، تستمر لفترة زمنية قصيرة قبل أن تستقر.
  - o يمكن أن ترد القيم المرتفعة وتذبذبات كل من السرعة والضغوط إلى طرد الهواء من الشبكة، وهذا ما يؤكد سلوك الشبكة عندما تكون مملوءة بالمياه عند بداية التغذية.
- تتعرض الشبكة عند التغذية المفاجئة (فتح صمامات خزان التغذية)، وعندما تكون الشبكة ممتلئة بالمياه عند بداية التغذية إلى زيادة مفاجئة في كل من الضغوط والسرعة، تنخفض القيم بعدها لتستقر، قد تصل زيادة الضغوط إلى 30% من قيمة ضغوط التشغيل، ولم تزد السرعة العظمى عن 2.5m/s، لكن لم يلحظ حصول أية تذبذبات سواء في الضغوط أو السرعة.
- لا يؤثر وجود خزانات أرضية في عقد الشبكة على سلوك الشبكة خلال شحنها عند بداية التغذية في حالتها فارغة أو ممتلئة عند بداية التغذية.
- تؤدي التغذية المفاجئة سواءً عندما تكون الشبكة فارغة أو ممتلئة عند بداية التغذية، إلى زيادة مفاجئة في قيم السرعة والضغوط.
- في حالة التغذية التدريجية (بعد 24h و 48h و 72h)، وعندما تكون الشبكة فارغة من المياه عند بداية التغذية، مع استخدام المستهلكين لخزانات أرضية:
  - o تتعرض الشبكة إلى زيادة مفاجئة في السرعة، ثم تنخفض حتى الوصول إلى وضع الاستقرار، وبلغت سرعة الجريان العظمى حوالي 4m/s قرب نهاية الشبكة، ويلاحظ حصول تذبذبات كبيرة في السرعة قبل استقرارها.
  - o ازداد الضغوط تدريجياً حتى وصوله إلى قيمة الاستقرار، ولم تحصل زيادات مفاجئة، لكن لوحظ حصول تذبذبات كبيرة في قيم الضغوط قبل استقراره.
  - o استغرق امتلاء الأنابيب بالمياه زمناً تراوح بين 7min عند بداية الشبكة (8min عند زمن تغذية ساعتين)، ووصل إلى دقيقتين عند نهايتها. ومن هنا يمكن الاستنتاج أنه يجب بدء التغذية تدريجياً وبشكل بطيء خلال ما يقارب 7min، ولو أدى ذلك إلى تأخر وصول المياه إلى المستهلكين، لكنه يجنب الشبكة حصول سرع عالية وصددمات ضغط.
- في حالة التغذية التدريجية مع استخدام خزانات عالية في كل عقد الشبكة، لم تتشكل ضغوط أو سرعات جريان مرتفعة في الشبكة، كما لم تحصل تذبذبات في الضغوط أو في سرع الجريان، ويرد ذلك إلى امتلاء الشبكة بالمياه وعدم حصول تحميل مفاجئ بالمياه.
- ليس هناك تأثير كبير لزمن التغذية على السلوك الهيدروليكي للشبكة خلال فترة الشحن، ويمكن أن يؤثر على قيم سرع الجريان والضغوط وتوزيعها الزمني.
- ينصح في حالة التغذية المتقطعة باستخدام التغذية التدريجية عن طريق:

- تخزين المياه المراد توزيعها ضمن خزانات أرضية،  
وضخها إلى خزانات التوزيع وصمامات القطع مفتوحة، بحيث  
تمتلئ الشبكة تدريجياً.
- فتح صمامات خزانات التغذية تدريجياً وعلى مراحل،  
وبحيث لا تقل مدة الفتح حتى الوصول إلى الفتح الكامل عن  
7-8min.
- ضخ المياه من عدة مواقع على الشبكة حتى امتلائها  
قبل فتح خزانات التغذية.

## Reference

1. Kumpel, E. and K.L. Nelson, Intermittent water supply: prevalence, practice, and microbial water quality. *Environmental science & technology*, 2016. 50(2): p. 542-553.
2. Soltanjalili, M.-J., O. Bozorg Haddad, and M.A. Marino, Operating water distribution networks during water shortage conditions using hedging and intermittent water supply concepts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013. 139(6): p. 644-659.
3. Mohammed, A.B. and A.A. Sahabo, Water Supply and distribution problems in developing countries: A case study of Jimeta-Yola, Nigeria. *Int. J. Sci. Eng. Appl. Sci*, 2015. 1: p. 473-483.
4. Mohapatra, S., A. Sargaonkar, and P.K. Labhassetwar, Distribution network assessment using EPANET for intermittent and continuous water supply. *Water resources management*, 2014. 28 (11): p. 3745-3759.
5. Fontanazza, C., G. Freni, and G. La Loggia, Analysis of intermittent supply systems in water scarcity conditions and evaluation of the resource distribution equity indices. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2007. 103.
6. Totsuka, N., N. Trifunovic, and K. Vairavamoorthy, Intermittent urban water supply under water starving situations. 2004.
7. Batish, R. A new approach to the design of intermittent water supply networks. in *World Water & Environmental Resources Congress 2003*. 2003.
8. Gottipati, P.V. and U.V. Nanduri, Equity in water supply in intermittent water distribution networks. *Water and Environment Journal*, 2014. 28(4): p. 509-515.
9. Sashikumar, N., M. Mohankumar, and K. Sridharan. Modelling an intermittent water supply. in *World Water & Environmental Resources Congress 2003*. 2003.
10. Cabrera-Bejar, J. and V. Tzatchkov. Inexpensive modeling of intermittent service water distribution networks. in *World environmental and water resources congress 2009: great rivers*. 2009.
11. Ingeduld, P., et al. Modelling intermittent water supply systems with EPANET. in *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. 2008.
12. Vairavamoorthy, K., et al. Design of sustainable water distribution systems in developing countries. in *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges*. 2001.
13. Vairavamoorthy, K., S.D. Gorantiwar, and S. Mohan, Intermittent water supply under water scarcity situations. *Water International*, 2007. 32(1): p. 121-132.
14. McIntosh, A., *Asian water supplies: reaching the urban poor*. 2003: Asian Development Bank.

15. Kumpel, E. and K.L. Nelson, Mechanisms affecting water quality in an intermittent piped water supply. *Environmental science & technology*, 2014. 48(5): p. 2766-2775.
16. Pickford, J. Water and sanitation for underprivileged rural and urban communities. in *Proceedings Asia-Pacific Conference on Water Engineering*. Jakarta, Indonesia. 1987.
17. Chandapillai, J., K. Sudheer ,and S. Saseendran, Design of water distribution network for equitable supply. *Water resources management*, 2012. 26(2): p. 391-406.
18. Manish, S. and S. Buchberger, Role of Satellite Water Tanks in Intermittent Water Supply System Manish. *Environmental ,World Program, Environmental Engineering*, 2012: p. 944-951.
19. Rossman, L.A., et al., *EPANET 2.2 users manual*. 2020: U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-20/133, 2020.
20. Nyende-Byakika, S., G. Ngirane-Katashaya, and J.M. Ndambuki, Modeling flow regime transition in intermittent water supply networks using the interface tracking method. *International Journal of Physical Sciences*, 2012. 7(2): p. 327-337.
21. Rossman, L.A., *Storm water management model user's manual, version 5.1 :2015* .National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and....
22. Trifunovic, N., *Introduction to urban water distribution*. Second Edition ed. Unesco-IHE lecture note series. Vol. 1. 2020: CRC Press.
23. Standard, E., BS EN 805:2000, *Water supply Requirements for systems and components outside buildings*, English version. 2000, BSI. p. 70.
24. Baur,A.,*etal.*, *Mutschmann/Stimmelmayr Taschenbuch der Wasserversorgung*. 2019: Springer-Verlag.