

استخدام التحليل المعتمد على الضاغط (PDA) في تقييم أداء شبكات مياه الشرب خلال التغذية المتقطعة

الدكتور المهندس محمد بشار المفتي

أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق

ملخص البحث: يسود في سوريا نظام التغذية المتقطعة في معظم التجمعات السكانية، حيث لاتزيد فترة تغذية الشبكات بالمياه في معظمها عن 2-4 ساعات يومياً أو كل يومين أو بتواتر أقل حسب كمية المياه المتوفرة، والسبب الأساس لاستخدام هذا النظام هو عدم توفر الموارد المائية الكافية لتأمين احتياجات السكان. وتستخدم الطرائق التقليدية في تصميم شبكات المياه مبدأ التحليل المتعلق بالاحتياج (DDA) والذي يعتمد على وضع احتياج المياه المفترض عند كل عقد الشبكة، ثم يتم حساب الضاغط المسيطر عند العقد، والغزارات وسرع الجريان في أنابيب الشبكة. لكن خلال العمل الفعلي للشبكة عند استخدام نظام التغذية المتقطعة، يلجأ السكان لتركيب خزانات منزلية بهدف تأمين المياه اللازمة خلال فترة القطع، فيتم سحب غزارات مياه أكبر من التصميمية، وتمر المياه بسرعه كبيرة تؤدي إلى فواقد هيدروليكية عالية، مما يتسبب بانخفاض الضاغط بشكل كبير في المناطق البعيدة عن مصدر المياه والمناطق المرتفعة، فيحصل السكان فيها على كمية مياه أقل من احتياجاتهم الفعلي أو لاتصل المياه إليهم أصلاً، وبالتالي أصبح الاحتياج متعلقاً بالضاغط المتوفر في العقدة، وبالتالي فاستخدام التحليل المعتمد على الضاغط (PDA) يعطي تمثيلاً أقرب للأداء الواقعي للشبكة ضمن ظروف التغذية المتقطعة. تم خلال البحث تحليل شبكة افتراضية باستخدام طريقتي التحليل، وتبين بشكل واضح مناسبة التحليل المتعلق بالضاغط (PDA) لدراسة الشبكات في حالة التغذية المتقطعة،

حيث أنه يعطي صورة واضحة عن أداء الشبكة، ويحدد نقاط الضعف التي يجب مراعاتها خلال تصميم وتشغيل شبكات مياه الشرب، وتم التأكد من إمكانية التحكم بكمية المياه الكلية الموزعة على الشبكة عن طريق التحكم بعدد ساعات التغذية، ولكن تبين وجود عدم عدالة واضحة في توزيع المياه على المستهلكين، وقد استخدم كل من عامل الانتظام والموثوقية الهيدروليكية للشبكة وتبين أن استخدامهما يعطي صورة واضحة عن أداء الشبكة.

كلمات مفتاحية: شبكات توزيع المياه، التغذية المتقطعة، التحليل المعتمد على الضغوط، التحليل المعتمد على الاحتياج، عامل الانتظام، الموثوقية الهيدروليكية، برنامج

EPANET 2.2

Using of pressure-driven analysis (PDA) for the evaluation of the water distribution networks performance during intermittent supply

Dr. Eng. M. Bashar Al-Mofti

Damascus University, Faculty of civil Eng.

Abstract: In Syria, the intermittent water supply system prevails in most communities, where the supply period in most of them does not exceed 2-4 hours per day, every two days or with less frequency depending on the water availability, the main reason for using this system is the water scarcity. The traditional method of designing water networks use the principle of demand-driven analysis (DDA), which is based on the assumption of water demand at each network node. Then the head at the nodes, the discharge and the flow velocity in the network pipes are calculated.

However, during the actual operation of the network when using the intermittent supply system, residents are forced to install household tanks in order to secure their water needs during the cut-off period, so the residents far from the water source and at highland areas, get less water than their actual needs, or the water does not reach them at all. Thus, the demand becomes related to the pressure available in the node, and the use of pressure-driven analysis (PDA) gives a closer representation of the real performance of the network under intermittent supply conditions. In this paper, a virtual network was analyzed using the two described methods of analysis, and it was clearly demonstrated the suitability of the pressure-driven analysis (PDA) to analyze networks in the case of intermittent water supply, as it gives a clear picture of the network's performance, and identifies the weaknesses that must be taken into account during the design and operation of drinking water supply networks. It was proved that the total amount of water distributed on the network can be controlled by controlling the feeding hours, but it was found that there is a clear inequality in the distribution of water to consumers, and both the Uniformity Coefficient (UC) and the network hydraulic reliability were used and it was found that their use gives a clear picture of the network performance.

Key words: water supply networks, intermittent supply, demand-driven analysis, pressure driven analysis, Uniformity Coefficient, hydraulic reliability, EPANET 2.2.

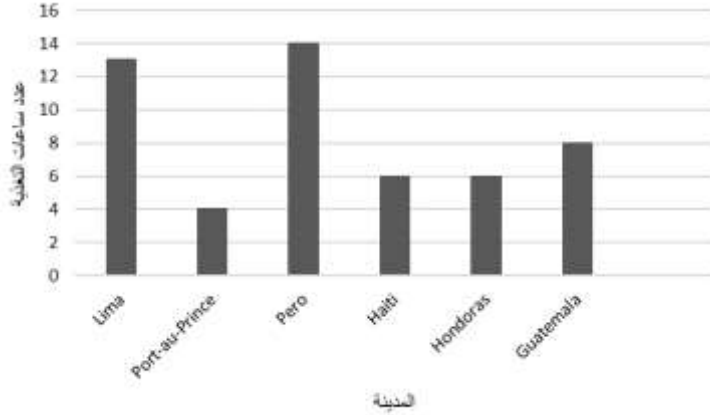
1. مقدمة:

نقول عن تغذية شبكات المياه أنها مستمرة إذا تم تزويد الشبكة بالمياه لمدة 24 ساعة خلال 7 أيام في الأسبوع (24/7) [1]، وتتطابق في هذه الحالة كمية المياه المرسله في الشبكة مع الاحتياج الفعلي للسكان، هيدروليكيًا تتطابق الغزارة الواصلة لأي من عقد الشبكة مع احتياجات السكان في هذه العقدة، وتصمم الشبكة على أساس أن لا يقل الضاغط المتوفر في أي عقدة من عقد الشبكة عن الضاغط الأدنى اللازم لإيصال المياه للسكان.

أما في حال التغذية المتقطعة فيتم تغذية الشبكة بالمياه لعدد من الساعات أقل من 24 ساعة يوميًا، وقد تتراوح فترة التغذية بين 2-8 ساعات وقد تصل إلى 12 ساعة يوميًا أو أكثر، وقد تتم التغذية يوميًا أو مرة واحدة كل يومين أو بتواتر أقل خلال أيام الأسبوع. ويتم في هذه الحالة تزويد الشبكة بكمية مياه أقل من الاحتياج الفعلي للسكان، وبالتالي لا تتطابق كمية المياه الواصلة لغالبية عقد الشبكة مع احتياجات السكان الفعلية فيها.

ويسود نظام التغذية المتقطعة في معظم الدول النامية، خاصة تلك الواقعة في المناطق الجافة، وفي الأرياف وفي المدن المكتظة بالسكان، حيث لا تزيد فترة تغذية الشبكات بالمياه في معظمها عن 4-2 ساعات [2]، وقد بينت إحصائيات منظمة الصحة العالمية WHO أن 91% من أنظمة التغذية بالمياه في جنوب شرق آسيا تعمل على مبدأ التغذية المتقطعة [3]. وأظهرت الإحصاءات المتوفرة أن حوالي 50% من مؤسسات المياه في 50 مدينة في آسيا تؤمن المياه بشكل متقطع أقل من 24 ساعة يوميًا [4]، كما أن كل مدن الهند تقريبًا تعمل على مبدأ التغذية المتقطعة [5]، وفي جاكرتا في أندونيسيا يتغذى حوالي 38% من السكان بالمياه من شبكة مركزية، وتصل المياه إلى 9% منهم بشكل متقطع [6]. والوضع مشابه في معظم دول أفريقيا، ففي مدينة مومباسا-كينيا يتغذى السكان بالمياه وسطياً 2.9 ساعة يوميًا [6]. كذلك الوضع في دول أمريكا اللاتينية، ففي مدينة كوتشابامبا-بوليفيا يتغذى 53% من السكان بالمياه من شبكة مركزية، و77%

منهم تتم تغذيتهم بالمياه بشكل متقطع، والشكل-1 يظهر عدد ساعات التغذية في عدد من دول ومدن أمريكا اللاتينية.



الشكل-1: عدد ساعات التغذية في عدد من دول ومدن أمريكا اللاتينية

كذلك تنتشر التغذية المتقطعة بشكل واسع في دول البحر الأبيض المتوسط [7, 8].

وفي سوريا تسود التغذية المتقطعة في معظم التجمعات السكانية، وذلك بسبب نقص الموارد المائية أساساً، 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.

تعتمد الطرائق التقليدية في تصميم شبكات المياه على مبدأ التحليل المتعلق بالاحتياج (demand-driven analysis DDA) والذي يعتمد على وضع احتياج المياه المفترض عند كل عقد الشبكة، ثم يتم حساب الضغوط المسيطر عند العقد، والغزارات وسرع الجريان في أنابيب الشبكة باستخدام معادلة الاستمرار ومعادلات حساب فاقد الاحتكاك مثل معادلة دارسي-فايسباخ أو معادلة هيزين-ويليامز [7]. لكن خلال العمل الفعلي للشبكة خلال التغذية المتقطعة ولتأمين المياه اللازمة خلال فترة القطع يلجأ السكان لتركيب خزانات منزلية يمكن أن تكون ساعاتها أكبر من احتياجهم الفعلي، لذا تبقى

صماماتها مفتوحة خلال كامل فترة التغذية كي تمتلئ بالمياه [7]، مما يؤدي لسحب غزارات مياه أكبر من الاحتياج الفعلي في المناطق القريبة من المصدر المائي، وانخفاض الضاغط بشكل كبير في المناطق البعيدة عنه والمناطق المرتفعة مما يؤدي إلى حصول السكان في هذه المناطق على كمية مياه أقل من احتياجاتهم الفعلي أو عدم وصول المياه إليهم [9]، وبالتالي لم يعد الاحتياج الفعلي في عقد الشبكة هو الناتج عن التغيرات الزمنية للاحتياج المتعلقة بعادات المستهلكين، بل أصبح متعلقاً بكمية المياه العظمى التي يمكن سحبها من الشبكة خلال فترة التغذية، لذا فإن استخدام التحليل المعتمد على الضاغط (pressure-driven analysis PDA) يعطي تمثيلاً أقرب للعمل الواقعي للشبكة ضمن ظروف التغذية المتقطعة [2, 10].

التحليل المعتمد على الضاغط (PDA): يمكن تحديد الغزارة الفعلية الواصلة لعقدة معينة حسب قيمة الضاغط المتوفر فيها باستخدام طريقة Wagner من العلاقات التالية [7, 11, 12]:

$$(1) \begin{cases} H_i < H_{min} \Rightarrow Q_i = 0 \\ H_i > H_{max,i} \Rightarrow Q_i = Q_{max,i} \\ H_{min,i} < H_i < H_{max,i} \Rightarrow Q_i = f(H) \end{cases}$$

حيث:

H_i : الضغط المتوفر في العقدة i

H_{min} : الضغط الأدنى الواجب توفره في العقدة i حتى تصل المياه إليها

H_{max} : الضغط الواجب توفره عند العقدة i كي تصلها كمية المياه

اللازمة (أكبر من ارتفاع خزان المياه)

ضغط المياه في أي عقدة هو الضاغط عندها مطروح منه ارتفاعها

الجغرافي

Q_i : الغزارة الواصلة للعقدة i

Q_{max} : الاحتياج المائي المطلوب توفره في العقدة

تحسب الغزارة الواصلة فعلاً إلى العقدة حسب الضغط المتوفر عندها من العلاقة (2):

$$Q_i = Q_{max} \cdot \sqrt{\frac{H_i - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}} \quad (2)$$

وهي الطريقة التي تعتمدها النسخ الحديثة لبرامج حساب الغزارة المتعلقة بالضاغط، ومنها النسخة الحديثة من برنامج EPANET وهي النسخة EPANET2.2 [11] (التي سيتم استخدامها في البحث).

من أجل تقييم أداء شبكة الإمداد تم تطوير عدد من المعاملات من أهمها: الموثوقية الهيدروليكية للشبكة ومعامل الانتظام.

الموثوقية الهيدروليكية للشبكة [13] **Hydraulic reliability**: طريقة عملية للحكم على أداء الشبكة، وتعرف بأنها النسبة المئوية للزمن الذي يكون خلاله الضاغط في عقدة معينة أكبر من قيمة حدية معينة p_{min} ، ويعطى بالعلاقة (3):

$$R_j = \sum_{i=1}^k \frac{r_{ij} t_i}{T} \quad (3)$$

حيث:

R_j : الموثوقية الهيدروليكية للعقدة j

r_{ij} : معامل الموثوقية الهيدروليكية للعقدة j خلال الخطوة الزمنية i

$r_{ij}=1$ عندما يكون ضاغط العقدة $p_i \geq p_{min}$

$r_{ij}=0$ عندما يكون ضاغط العقدة $p_i < 0$

t_i : طول الخطوة الزمنية i

k : عدد الخطوات الزمنية

T : طول فترة المحاكاة، عند استخدام خطوات زمنية متساوية يعطى

طول الخطوة الزمنية i بالعلاقة التالية (4):

$$t_i = \frac{T}{k} \quad (4)$$

وتعرف الموثوقية الهيدروليكية R لشبكة مؤلفة من n عقدة بأنها المتوسط الحسابي

للموثوقية الهيدروليكية لكل عقد الشبكة، وتحسب من العلاقة التالية (5):

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n R_j}{n} \cdot 100\% \quad (5)$$

معامل الانتظام [9] **Uniformity Coefficient (UC)**: بنتيجة تعلق كمية المياه

الواصلة لعقدة تغذية بالضاغط المسيطر عندها في حالة التغذية المتقطعة، وعدم وصول

الاحتياج الفعلي لكل عقد الشبكة، طرحت مشكلة عدالة توزيع المياه (Equity in water

supply) كواحدة من أهم المشاكل المرتبطة بالتغذية المتقطعة، ومن أجل تحديد العدالة

في توزيع المياه بين عقد الشبكة تم تطوير معامل الانتظام UC.

لحساب UC يتم تحليل الشبكة باستخدام التحليل المعتمد على الضاغط، تحسب نسبة

كمية المياه الواصلة فعلاً إلى العقدة إلى احتياجها الفعلي والتي تسمى نسبة تغذية العقدة

Node Supply Ratio، تحسب نسبة التغذية الوسطية (ASR) والتي هي المتوسط

الحسابي لنسب التغذية لكل عقد الشبكة، ثم يحسب انحراف نسبة تغذية كل عقدة عن

ASR ثم يحسب المتوسط الحسابي لانحرافات كل عقد الشبكة ADEV، ثم يحسب

معامل الانتظام UC من العلاقة التالية (6):

$$UC = 1 - \left(\frac{ADEV}{ASR} \right) \quad (6)$$

عند وصول الاحتياج المائي الفعلي لكل عقد الشبكة يصبح $ASR=1$ و $ADEV=0$ وبالتالي $UC=1$ ، أما عند وصول كمية مياه أقل من الاحتياج الفعلي إلى أي من عقد الشبكة يصبح $UC<1$ ، وكلما كانت قيمته أقرب للواحد كانت عدالة توزيع المياه في الشبكة أفضل.

2. هدف البحث:

بما أن تغذية السكان بالمياه في حالة التغذية المتقطعة تتم عبر الخزانات المنزلية، فإن الغزارة التي تؤمنها المآخذ المركبة على شبكة التوزيع تتعلق بالضغوط المسيطر عندها وليس بالاحتياج الفعلي، لذا فإن تحليل الشبكات في هذه الحالة اعتماداً على الضغوط بدلاً من الاحتياج يقارب بشكل كبير السلوك الفعلي للشبكة، والهدف من البحث بيان أثر التغذية المتقطعة على أداء شبكات المياه باستخدام طريقة التحليل المعتمد على الضغوط (PDA)، حيث سيتم دراسة توزيع الضغوط ضمن العقد، وسرعات الجريان ضمن الأنابيب، وكميات المياه الواصلة للمستهلكين، وتحديد موثوقية الشبكة ومعامل الانتظام.

3. مواد وطرائق البحث:

تم البحث باستخدام شبكة افتراضية مؤلفة من 16 حلقة كما هو وارد في الشكل-2، طول كل من أنابيب الشبكة 125 m، تخدم ضاحية سكنية تحوي على 312 بناء، مساحة البناء 600 m^2 ، مقام على أرض مساحتها 800 m^2 ، كل بناء مؤلف من خمسة طوابق في كل منها 4 شقق، شقتين بمساحة 140 m^2 لكل شقة، وشقتين بمساحة 100 m^2 لكل شقة، بعدد سكان إجمالي $P = 31200$ وكثافة سكانية 1248 p/ha . وقد اعتبرت الشبكة أفقية تماماً بهدف إلغاء أثر فروق المناسيب على أداء الشبكة. تم نمذجة الشبكة وتحليلها باستخدام برنامج EPANET 2.20 [11]، باستخدام معادلة دارسي-فايسباخ، $k=1.0 \text{ mm}$ [14] وذلك باستخدام طريقتي التحليل المتعلقة بالاحتياج (DDA) والتحليل المعتمد على الضغوط (PDA)

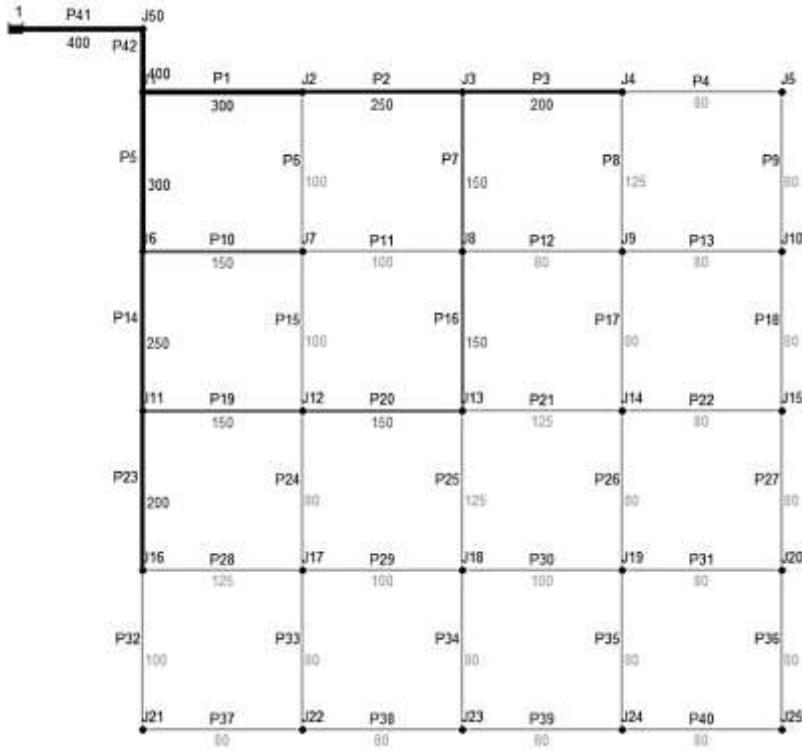
4. النتائج ومناقشتها:

تم تصميم الشبكة على حالة التغذية المستمرة مع اعتماد الفرضيات التالية: الضاغط الأدنى اللازم لإيصال المياه للطابق الخامس m 34 بحيث يتشكل ضاغط أدنى على الجهاز الصحي الأسوأ هيدروليكيًا لا يقل عن m 10، وفواقد مجموعة العداد مع فواقد الوصلة المنزلية m 8.5 [15]. الاحتياج المائي للفرد $l/P/d$ 125، عوامل الذروة المستخدمة في التصميم $Pf_{d,max}=1.72$, $Pf_{h,max}=3.18$ محسوبة على أساس الغزارة اليومية الوسطية $Q_{d,av}$ [16]، فكانت: الغزارة اليومية الوسطية $Q_{d,av}=3900 \text{ m}^3/d$ ، والغزارة اليومية الأعظمية $Q_{d,max}=6708 \text{ m}^3/d$ ، والغزارة الساعية الأعظمية $Q_{h,max}=143.54 \text{ l/s}$. تم حساب الغزارات في العقد باستخدام طريقة توزيع الغزارات على أنابيب الحلقات حسب أطوالها، وكل عقدة تغذي المساحة المشكلة من أنصاف الأنابيب المتصلة بها [13]، وقد لخصت قيم الاحتياج المائي الواجب توفره في عقد الشبكة حسب موقعها في الجدول-1.

تمت نمذجة الشبكة على برنامج EPANET 2.2 وفقاً لقيم الغزارة $Q_{d,max}$ الواردة في (الجدول-1)، تم الحساب لنظام التغذية 24/7 لحالة الاستقرار Steady-State وكانت نتائج الحساب كالتالي: تراوحت أقطار الأنابيب بين mm 80-400 كما يظهر في (الشكل-2) في ملحق البحث، وتراوحت سرعة جريان المياه بين m/s 0.22 في الأنابيب بقطر mm 80 وهو القطر الأدنى الذي تم اعتماده في التصميم و m/s 1.14، وتراوحت الضواغط ضمن عقد الشبكة بين m 34.0 عند العقدة الطرفية J25 و m 45.57 عند عقدة المدخل J1، ارتفاع الخزان m 46.2.

الجدول-1: توزيع الاحتياج المائي في عقد الشبكة حسب موقعها

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



الشكل-2: مخطط أقطار الأنابيب (mm) للشبكة الافتراضية

في حالة التغذية المتقطعة يختلف تعريف معامل الذروة $P_{f,h,max}$ عنه في حالة التغذية المستمرة، فبسبب قيام السكان بتركيب خزانات لجمع المياه خلال فترة التغذية وعدم استهلاكهم للمياه من الشبكة مباشرة، فإن الغزارة المارة بالشبكة تصبح أكثر انتظاماً، ولاتتعرض لتغيرات ساعية واضحة، لذا يمكن اعتبار معامل الذروة ثابتاً خلال فترة التغذية [17]، ويحسب من العلاقة التالية (7):

$$P_f = \frac{24}{N} \quad (7)$$

حيث N: عدد ساعات التغذية

ويتم حساب الغزارة الساعية على أساس الغزارة اليومية الأعظمية من العلاقة:

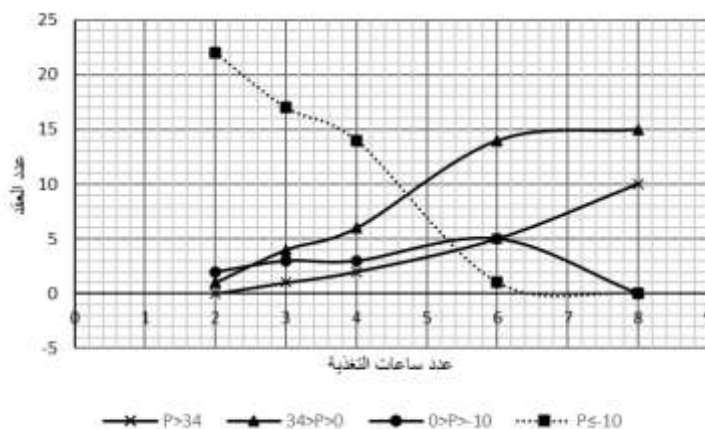
$$Q_{h,max} = \frac{Q_{d,max}}{24} \cdot P_f \quad (8)$$

تم في المرحلة الأولى تحليل الشبكة لحالة التحليل المتعلق بالاحتياج (DDA) لعدد ساعات التغذية 2, 3, 4, 6 و8 ساعات، حيث استخدمت قيم عامل عدم الانتظام الساعي الأعظمي $Pf_{h,max}$ المحسوبة حسب عدد ساعات التغذية من العلاقة (6) والواردة في الجدول-2، وتم الحساب على أساس الاحتياج اليومي الوسطي $Q_{d,av}$ المأخوذ من (الجدول-1) بعد التصعيد بمعامل الذروة اليومي الأعظمي $Pf_{d,max}=1.72$

الجدول-2: معامل عدم الانتظام $Pf_{h,max}$ حسب عدد ساعات التغذية

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

ويظهر (الشكل-3) قيم الضواغط المسيطرة في العقد من أجل عدد ساعات التغذية المختلفة.



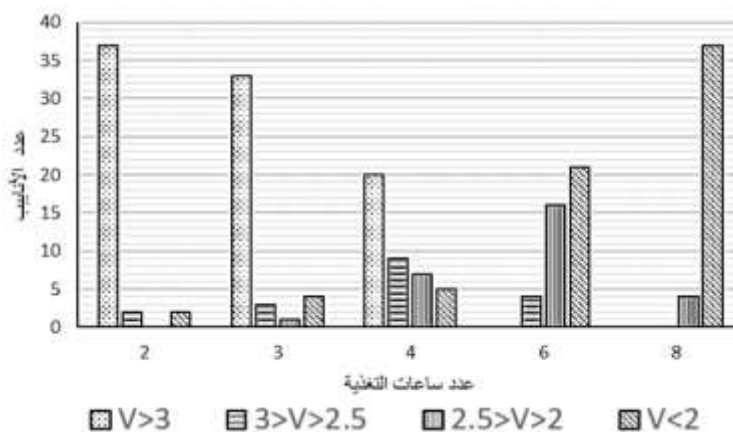
الشكل-3: توزيع الضواغط في عقد الشبكة من أجل أزمدة تغذية مختلفة

يلاحظ من (الشكل-3) سيطرة ضاغط سلبي $P < -10m$ في 22 عقدة من أصل 25 (عدد العقد الكلي) عند زمن تغذية ساعتين، ويتناقص عددها مع زيادة زمن التغذية حتى يصل إلى الصفر عند زمن تغذية 7 ساعات، وهذا مستحيل فيزيائياً، لكن يمكن اعتباره دليل على عدم وصول المياه إلى العقدة. ولاتوجد أية عقدة يسيطر فيها ضاغط أكبر من

34 m عند زمن تغذية ساعتين، وبتزايد العدد مع زيادة زمن التغذية حتى يصل إلى 10 عقد عند زمن تغذية 8 ساعات.

ويوضح (الشكل-4) توزيع السرعة ضمن أنابيب الشبكة والتي يبلغ عددها الكلي 41 أنبوباً لعدد ساعات تغذية مختلفة بين 2h و 8h، يلاحظ من الشكل أنه في حالة زمن تغذية 2h تسيطر سرعة $v > 3m/s$ في 37 أنبوباً كما هو واضح في (الشكل-3) و(الشكل-1-A) في ملحق البحث، ويتناقص عددها تدريجياً مع زيادة عدد ساعات التغذية حتى يصل عددها إلى الصفر عند زمن تغذية 6h، حيث تسيطر سرعة أعظمية لاتزيد عن 2.5 m/s في أربعة أنابيب فقط (الشكل-4)، وهذا ما يظهر بوضوح سبب سيطرة الضواغط المنخفضة في عقد الشبكة عندما يكون عدد ساعات التغذية منخفضاً. ويبلغ عدد الأنابيب التي تسيطر فيها سرعة جريان أقل من 2m/s عند عدد ساعات تغذية 2h أنبوبين فقط (الشكل-4) و(الشكل-1-A) في ملحق البحث، ويزداد عددها مع زيادة عدد ساعات التغذية حتى يصل إلى 37 أنبوباً عند زمن تغذية 8h (الشكل-4).

كما يلاحظ من (الشكل-4) تغير نمط الزيادة عند عدد ساعات تغذية أكبر من 4h، وقد لوحظ من نتائج الدراسة وجود سرعة جريان أقل من 0.4m/s في أنبوبين من أنابيب الشبكة عند زمن تغذية أقل من 8h مما يهدد نوعية المياه في الأنابيب.



الشكل-4: توزيع السرعة $V(m/s)$ في أنابيب الشبكة حسب عدد ساعات التغذية

تم في المرحلة الثانية من البحث محاكاة الشبكة باستخدام طريقة التحليل المعتمد على الضاغط (PDA)، من أجل عدد ساعات تغذية: 2 و 3 و 4 و 6 و 8 و 10 و 12 ساعة، 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-1)، وأخذت عوامل الذروة الساعية الأعظمية حسب عدد ساعات التغذية من (الجدول-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-3) للضاغط الأدنى اللازم حسب عدد طوابق المبنى [18].

الجدول-3: الضاغط الأدنى اللازم لإيصال المياه لخزانات التغذية [18]

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

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

تم أولاً حساب الشبكة لزمن تغذية ساعتين فلوحظ تراوح قيم الضاغط بين 27m في العقدة الطرفية J25 و 42.22m في العقدة J1 عند مدخل المياه إلى الشبكة. ويظهر

(الشكل 2-A) في ملحق البحث توزع الغزارات الخارجة من العقد (l/sec) وسرعة الجريان (m/s) في أنابيب الشبكة، ويمكن من (الشكل 2-A) ملاحظة الانخفاض الشديد في الغزارات الخارجة من العقد الطرفية مقارنة مع الغزارات الخارجة من العقد قرب مصدر المياه، أما سرعة جريان المياه في الأنابيب فتراوحت بين $2.63m/s$ في الأنبوب P5 قرب مصدر المياه و $0.01m/s$ في الأنبوب P36 عند طرف الشبكة البعيد عنه.

ثم تم حساب الشبكة لزمان تغذية ثلاث ساعات ف لوحظ تراوح قيم الضاغط بين $27.01m$ في العقدة الطرفية J25 و $43.04m$ في العقدة J1 أما سرعة الجريان فتراوحت بين $0.03m/s$ في الأنبوب P36 و $2.39m/s$ في الأنبوب P5، ويظهر (الشكل 3-A) في ملحق البحث توزع الغزارات الخارجة من العقد (l/sec) وسرعة الجريان (m/s) في أنابيب الشبكة.

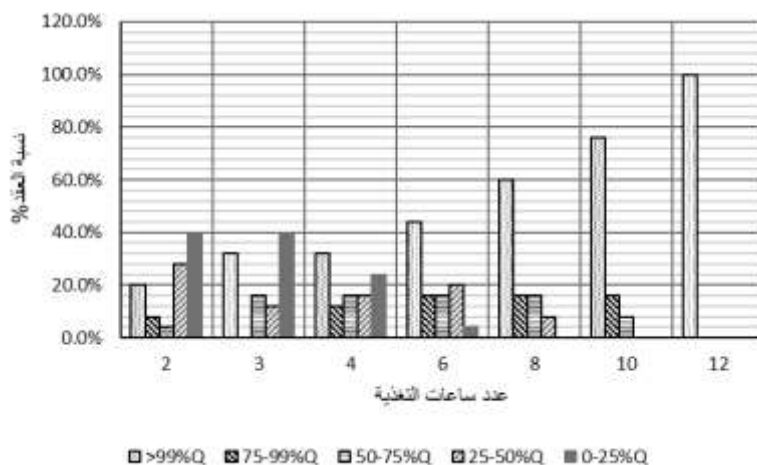
وأعيد الحساب لعدد ساعات تغذية 4 و 6 و 8 و 10 و 12 ساعة ولخصت الغزارات الكلية الخارجة من العقد (m^3/d) حسب عدد ساعات التغذية في (الجدول A) في ملحق البحث.

واحتوى العمود الثاني (24h) في (الجدول A) في ملحق البحث على الاحتياج اليومي الواجب توفره للسكان من أجل المقارنة، كما احتوى السطر الأخير في نفس الجدول على كمية المياه الكلية الواصلة فعلاً للسكان من أجل ساعات التغذية المختلفة.

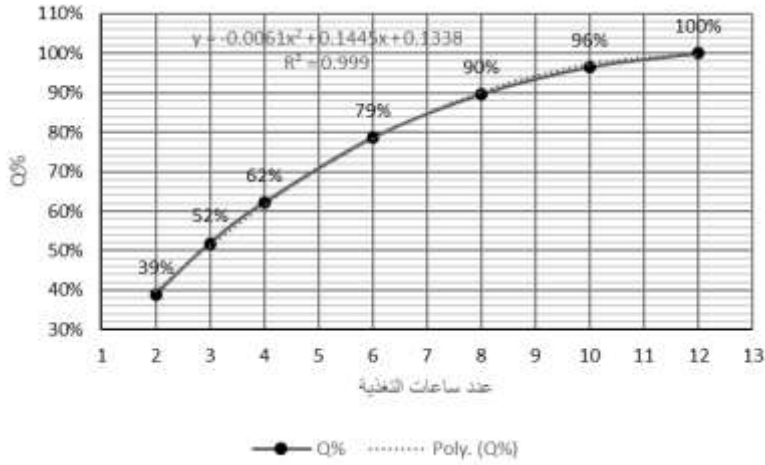
ويوضح (الشكل 5) توزع الغزارات الواصلة فعلاً إلى عقد الشبكة كنسبة مئوية من الاحتياج اليومي الفعلي حسب عدد ساعات التغذية، وقد قسمت العقد ضمن خمس مجالات حسب نسبة الغزارة الواصلة إليها، ويتضح من الشكل أن السكان يحصلون على احتياجهم الفعلي بنسبة 100% عند التغذية لمدة 12 ساعة، أما عند التغذية لساعتين فإن 20% فقط من عقد الشبكة تصل إليها هذه النسبة، وبحدود 40% من العقد يصل إليها أقل من 25% من الاحتياج الفعلي.

ويوضح (الشكل-6) الغزارة الفعلية الواصلة للشبكة كاملة كنسبة مئوية من الاحتياج الكلي حسب عدد ساعات التغذية. ويلاحظ من الشكل أنه يمكن التحكم بالغزارة الواصلة للشبكة عن طريق تحديد عدد ساعات الضخ ضمن حدود كبيرة.

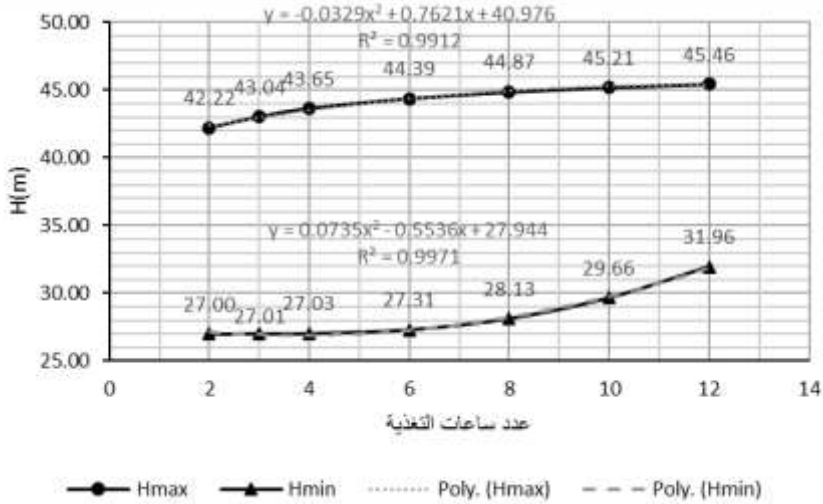
أما (الشكل-7) فيوضح الضاغطين الأعظمي والأدنى في عقد الشبكة من أجل عدد ساعات التغذية المختلفة، ويلاحظ من الشكل تحقيق كل العقد لشرط الضاغط الأدنى المطلوب. ويظهر (الشكل-8) توزيع الضواغط على عقد الشبكة من أجل عدد ساعات التغذية المختلفة، وقد صنفت العقد ضمن مجموعتين: المجموعة الأولى هي التي تحقق الضاغط الأعظمي المطلوب $H_{max}=32m$ ، والمجموعة الثانية هي التي تحقق اشتراطات الضاغط الأدنى $H_{min}=27m$ ، وقد عرض (الشكل-8) النسبة المئوية للعقد المحققة للشرط كنسبة مئوية من عدد العقد الكلي للشبكة.



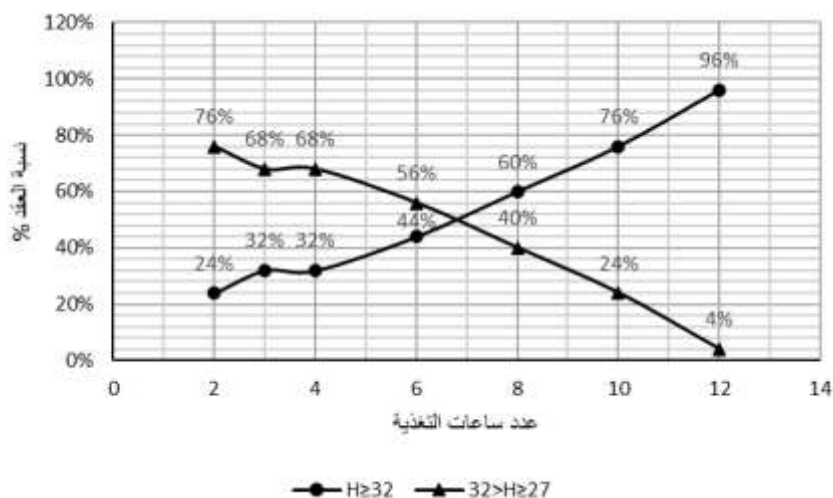
الشكل-5: توزيع الغزارات على عقد الشبكة كنسبة مئوية من الاحتياج الواجب توفره حسب عدد ساعات التغذية



الشكل-6: الغزارة الفعلية الواصلة للشبكة كنسبة مئوية من الاحتياج الكلي الواجب توفره حسب عدد ساعات التغذية



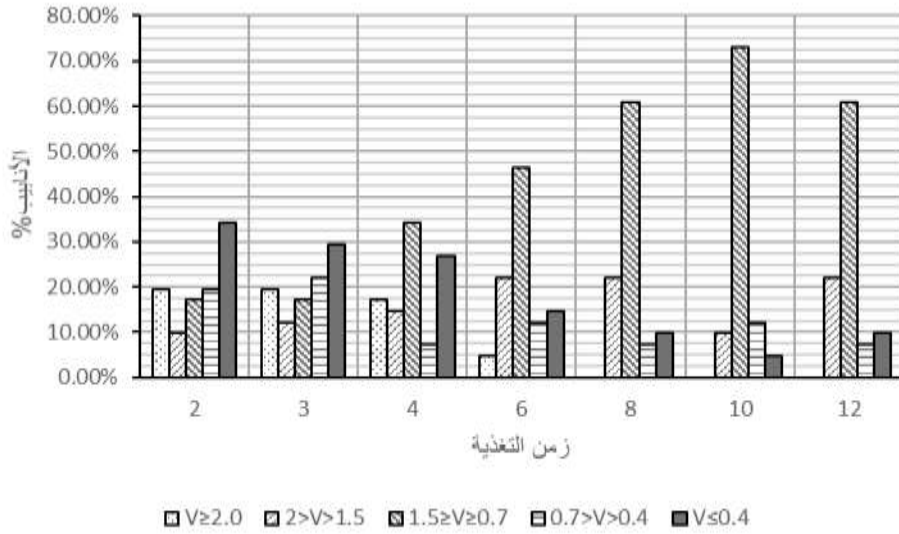
الشكل-7: الضاغطين الأعظمي والأدنى في عقد الشبكة من أجل عدد ساعات التغذية المختلفة



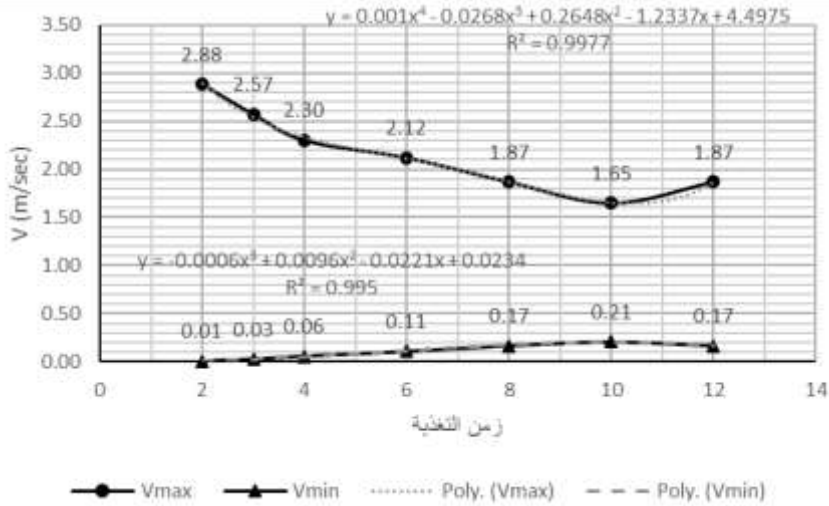
الشكل-8: توزيع الضوابط على عقد الشبكة من أجل عدد ساعات التغذية المختلفة

يبين (الشكل-9) توزيع سرعة الجريان ضمن أنابيب الشبكة حسب عدد ساعات التغذية، حيث قسمت الأنابيب ضمن خمس مجالات حسب سرعة الجريان، وعرضت كنسبة مئوية لعدد الأنابيب التي تحقق مجال السرعة من عدد الأنابيب الكلي. ويلاحظ من (الشكل-9) وجود نسبة لا يستهان بها من الأنابيب التي لا تتجاوز سرعة الجريان فيها 0.4 m/s مهما اختلف عدد ساعات التغذية، وتصل إلى ما يقارب 30% من عدد الأنابيب الكلي عندما لا يتجاوز عدد ساعات التغذية الأربع ساعات. كما يلاحظ عدم وجود أية أنابيب تتجاوز فيها سرعة الجريان 2.0 m/s عند عدد ساعات تغذية 8h أو أكثر.

أما (الشكل-10) فيعطي سرعتي الجريان العظمى والدنيا ضمن أنابيب الشبكة حسب عدد ساعات التغذية، ويلاحظ من (الشكل-10) تشكل سرعة جريان أقل من 0.21 m/s في أنابيب الشبكة عند مختلف عدد ساعات التغذية، أما السرعة العظمى فكانت 2.88 m/s .



الشكل-9: توزيع سرعة الجريان ضمن أنابيب الشبكة حسب عدد ساعات التغذية

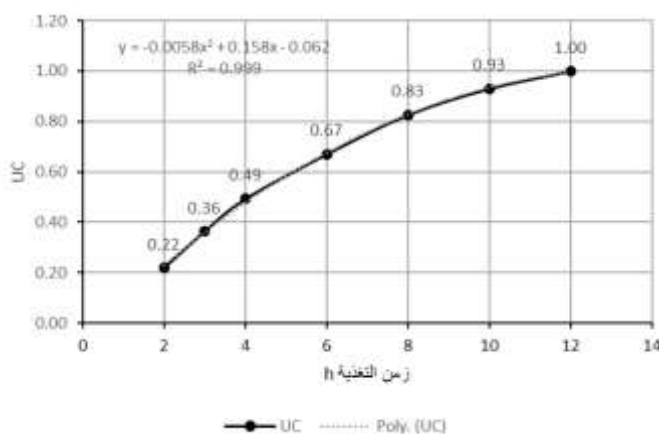


الشكل 10- سرعة الجريان العظمى والدنيا ضمن أنابيب الشبكة حسب عدد ساعات التغذية

5. الاستنتاجات والتوصيات:

إن وجود قيم للضاغط $-10m < p$ كما يظهر في (الشكل-3) و(الشكل-1-A) في الملحق مستحيل فيزيائياً، ويظهر ذلك بوضوح عدم صلاحية التحليل المعتمد على الطلب DDA لمحاكاة شبكات التغذية المتقطعة، يضاف لذلك توزع السرعة في أنابيب الشبكة (الشكل-4) وظهور سرعة جريان $V > 6m/s$ (الشكل-1-A) في الملحق ليشكل دليلاً إضافياً يؤكد هذا الاستنتاج.

بالعودة إلى (الشكل-6) يلاحظ أنه يمكن التحكم بكمية المياه الكلية الموزعة على الشبكة عن طريق التحكم بعدد ساعات التغذية، لكن بالعودة إلى (الشكل-5) يلاحظ وصول كميات مياه متفاوتة للعقد المختلفة وبالتالي وجود عدم عدالة في توزيع المياه على المشتركين، حيث أن التقنين وقع على حساب جزء فقط من المشتركين بتغيير نسبته حسب عدد ساعات التغذية، وكمعيار محتمل لتحديد عدم عدالة التوزيع تم حساب معامل انتظام التوزيع UC للشبكة من أجل عدد ساعات التغذية المختلفة (الشكل-11).



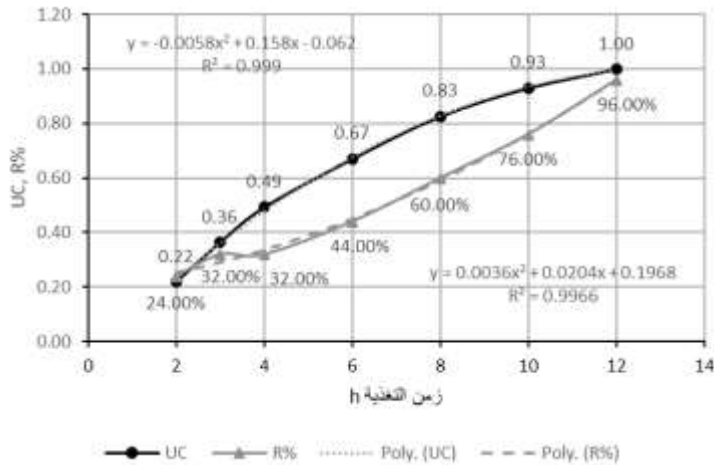
الشكل-11: معامل انتظام توزيع المياه في الشبكة UC حسب عدد ساعات التغذية

يلاحظ من (الشكل-11) أن معامل الانتظام عند التغذية لمدة ساعتين $UC=0.22$ ، وبالعودة إلى (الشكل-5) نجد أن 80% من العقد لا تتلقى كامل احتياجها المائي، أما عند زمن تغذية 3h فإن $UC=0.36$ ، ومن (الشكل-5) فإن 74% من العقد لا تتلقى

احتياجها المائي الكامل عند زمن التغذية هذا، وبمقارنة بقية أزمنا التغذية بطريقة مشابهة نلاحظ أن معامل الانتظام يمثل بشكل جيد توزيع الغزارات بين العقد، مما يؤكد أهمية استخدامه كمعيار لتقييم أداء شبكات المياه من حيث عدالة توزيع المياه بين السكان.

ويلاحظ من (الشكل-6) أن استخدام زمن التغذية عشر ساعات أو أكثر يؤثر بشكل محدود جداً على كمية المياه الكلية الموزعة، وبالتالي ليس هناك جدوى من استخدام عدد ساعات التغذية ضمن هذا المجال كوسيلة لتقنين المياه، ولو أن عدد ساعات تغذية 10h يسبب عدم وصول كمية المياه الكافية ولو بنسب متفاوتة (المياه الواصلة أكثر من 50% من الاحتياج الكلي) لما يقارب 22% من العقد (الشكل-6)، ويسبب قيم $UC=0.93$ (الشكل-11) وهذا لا يبرر التوفير المحدود المحقق للمياه.

وكعامل إضافي للحكم على أداء الشبكة تم استخدام الموثوقية الهيدروليكية للشبكة $R(\%)$ ، حيث أنها تعطي صورة واضحة عن توزيع الضغوط ضمن عقد الشبكة، وقد تم حساب موثوقية الشبكة من أجل عدد ساعات التغذية المختلفة، وذلك خلال فترة التغذية فقط، أي لم تدخل الضوابط ضمن العقد خلال فترة انقطاع التغذية بالحساب (تساوي الصفر)، ولخصت النتائج في (الشكل-12).



الشكل-12: معامل الانتظام والموثوقية الهيدروليكية حسب عدد ساعات التغذية

وقد تم رسم كل من عامل الانتظام UC والموثوقية الهيدروليكية R على نفس المخطط. ويلاحظ من (الشكل-12) زيادة الموثوقية الهيدروليكية مع زيادة عدد ساعات التغذية، حيث أنها تحقق قيمة أعظمية $R=96\%$ عند زمن تغذية 12h، وهذا يعني أنه حتى عند عدد ساعات تغذية مرتفع يوجد عدم توازن في ضغوط الشبكة، وتوجد ضغوط أقل من الضغط الأعظمي المطلوب، وهذا ما يؤكد (الشكل-8). كما يلاحظ من (الشكل-12) عدم تشابه منحنيي عامل الانتظام والموثوقية الهيدروليكية، ولو أنهما يتزايدان مع زيادة عدد ساعات التغذية، والسبب في ذلك ثبات التغذية عند زيادة الضاغط عن قيمة H_{max} المحددة في الحساب، لذا ينصح دوماً بحساب المعاملين معاً من أجل إعطاء صورة واضحة عن أداء الشبكة.

بالعودة إلى (الشكل-10) يلاحظ عدم وجود سرعة كبيرة تؤدي إلى تآكل الأنابيب وتهدد سلامتها عند مختلف ساعات التغذية، ولو أن السرعة العظمى كبيرة نسبياً عند زمن التغذية ساعتين، لكن يمكن من نفس الشكل يلاحظ وجود سرعات دنيا منخفضة جداً، ومن (الشكل-9) يمكن ملاحظة أن سرعة جريان $v < 0.4 \text{ m/s}$ تغطي جزءاً لا يستهان به من أنابيب الشبكة عند مختلف ساعات التغذية، وبالمقارنة مع الشكلين (B, C) في الملحق يلاحظ تركيز هذه السرعة في الأنابيب البعيدة عن مصدر التغذية بالمياه، إن وجود سرعة جريان منخفضة يسبب تراكم الرواسب على أنابيب الشبكة، وبالتالي زيادة خشونتها، وزيادة مدة مكث المياه في الأنابيب، وبالتالي فقدان الكلور المتبقي، ونشوء الظروف المناسبة لإعادة تنشيط البكتريا في المياه، يضاف إلى ذلك ركود المياه الكامل في الشبكة خلال فترة الانقطاع، مما يؤدي في المحصلة إلى تراجع نوعية المياه في الشبكة، وزيادة الحاجة لعمليات تنظيف الأنابيب كجزء أساس من نشاطات الصيانة الدورية للشبكة، مما يزيد من كلفة الاستثمار.

من الدراسة السابقة يلاحظ بشكل واضح مناسبة التحليل المتعلق بالضاغط (PDA) لدراسة الشبكات في حالة التغذية المتقطعة، حيث أنه يعطي صورة واضحة عن أداء الشبكة، ويحدد نقاط الضعف التي يجب مراعاتها خلال تصميم أو تشغيل شبكات مياه الشرب.

لم يتم في هذا البحث أخذ كمية المياه اللازمة لملاء الشبكة عند بداية فترة التغذية بالحسبان، كون البرنامج المستخدم يعتبر أن أنابيب الشبكة ممثلة تماماً بالمياه عند بداية فترة المحاكاة، كما لم يؤخذ بالاعتبار وجود خزانات أرضية أو مضخات تضخ المياه مباشرة من الشبكة لإيصال المياه إلى خزانات المستهلكين في مناطق الضغط المنخفض، لذا ينصح بالقيام بذلك في أبحاث مستقبلية بمساعدة النماذج المناسبة.

Bibliography

- [1] Sanjeeb Mohapatra & Aabha Sargaonkar & Pawan Kumar Labhassetwar, "Distribution Network Assessment using EPANET for Intermittent and Continuous Water Supply," *Water Resour Manage*, vol. 28, p. 3745–3759, June 2014.
- [2] J. Pickford, "Water and sanitation for underprivileged rural and urban communities," in *Asia–Pacific Conf. on Water Engrg.*, 1987.
- [3] A. C. McIntosh, *Asian Water Supplies Reaching the Urban Poor*, London: Asian Development Bank and International Water Association, IWA Publishing, 2003.
- [4] Kalanithy Vairavamoorthy, Ebenezer Akinpelu, Zhuhai Lin, Mohammed Ali, "Design of Sustainable Water Distribution Systems in Developing Countries," in *World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida, 2001.
- [5] UN–HABITAT, *Water And Sanitation in the World's Cities*,

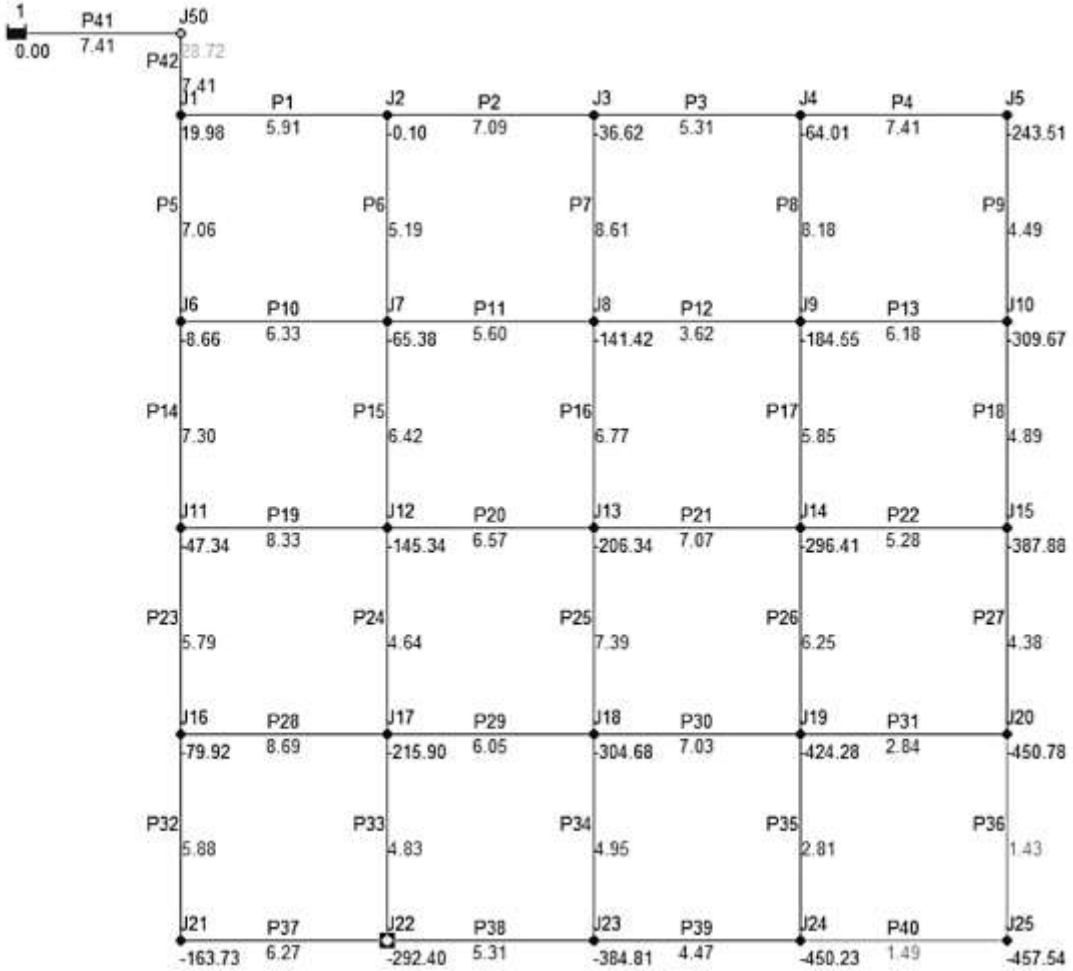
Local Action for Global Goals, U. N. H. S. e. Programme, Ed.,
Nairobi, Kenya: Earthscan Publications Ltd, 2003.

- [6] C. M. Fontanazza, G. Freni & 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, Vol 103*, pp. 635–644, 2007.
- [7] N. Totsuka, N. Trifunovic, K.Vairavamoorthy, "Intermittent urban water supply under water starving situations," in *30th WEDC International Conference*, Vientiane, 2004.
- [8] Prasad V. K. S. V. Gottipati, Umamahesh V. Nanduri, "Equity in water supply in intermittent water distribution networks," *Water and Environment Journal*, vol. 28, no. 4, pp. 509–515, December 2014.
- [9] K. Vairavamoorthy, Sunil D. Gorantiwar, S. Mohan, "Intermittent Water Supply under Water Scarcity Situations," *Water International*, vol. 32:1, pp. 121–132, March 2007.
- [10] Rossman, L., H. Woo, M. Tryby, F. Shang, R. Janke, AND T. Haxton., *EPANET 2.2 User Manual*, Cincinnati, Ohio: U.S. EPA, 2020.
- [11] Petr Ingeduld, Ajay Pradhan, Zdenek Svitak, Ashok Terrai, "Modelling Intermittent Water Supply Systems with EPANET,"

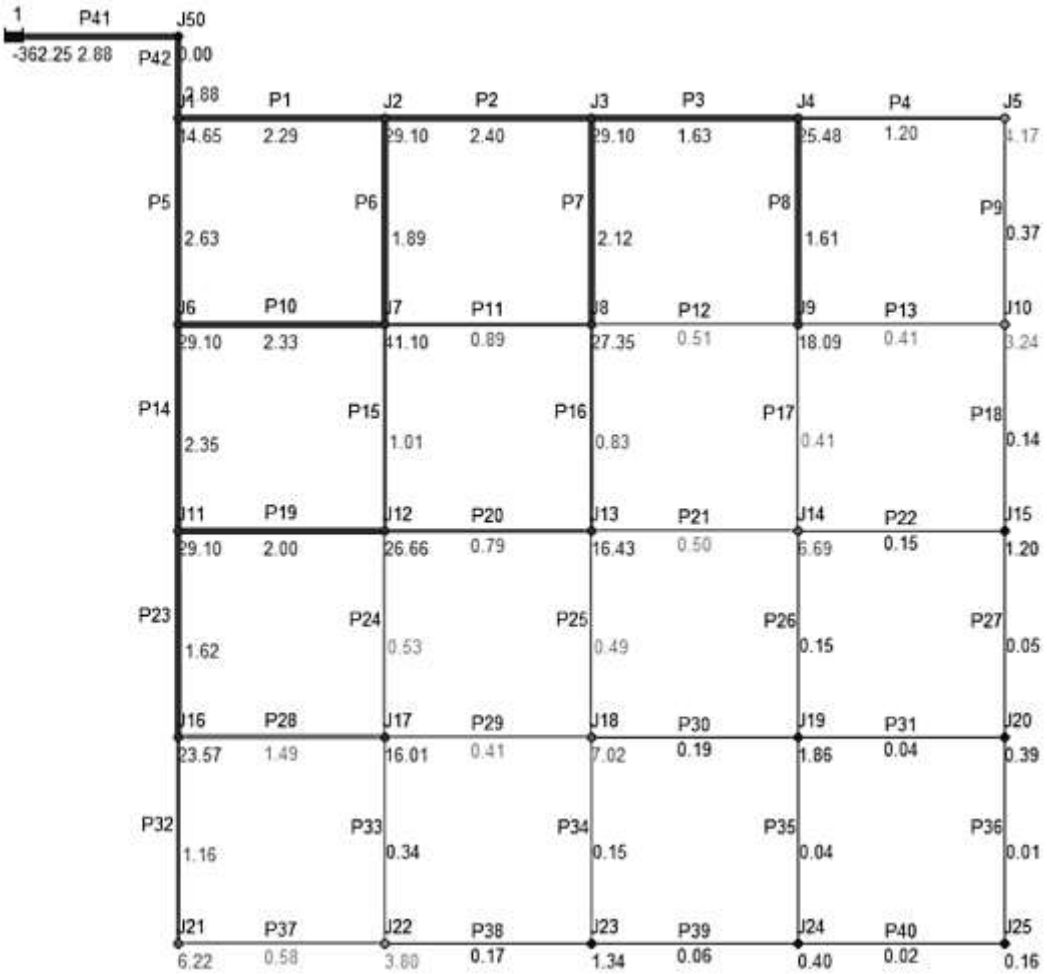
in *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA)*, Ohio, USA, 2006.

- [12] N. TRIFUNOVIĆ, Introduction to Urban Water Distribution, UNESCO–IHE, Ed., London: Taylor & Francis, 2006.
- [13] *British Standard: BS EN 805, Water supply Requirements for systems and components*, British Standard, 2000.
- [14] *British Standard: BS EN 806–2, Specification for installations inside buildings conveying water for human consumption, Part 2: Design*, British Standard, 2005.
- [15] A. Baur, P. Fritsch, W. Hoch, G. Merkl, J. Rautenberg, M. Weiß, B. Wricke, Mutschmann/ Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung, 17 ed., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [16] R. Batish, "A New Approach to the Design of Intermittent Water Supply Networks," in *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 2004.
- [17] CPHEEO, Manual on Water Supply and Treatment, 3rd Edition ed., G. o. I. Ministry of Urban Development, Ed., 1991.

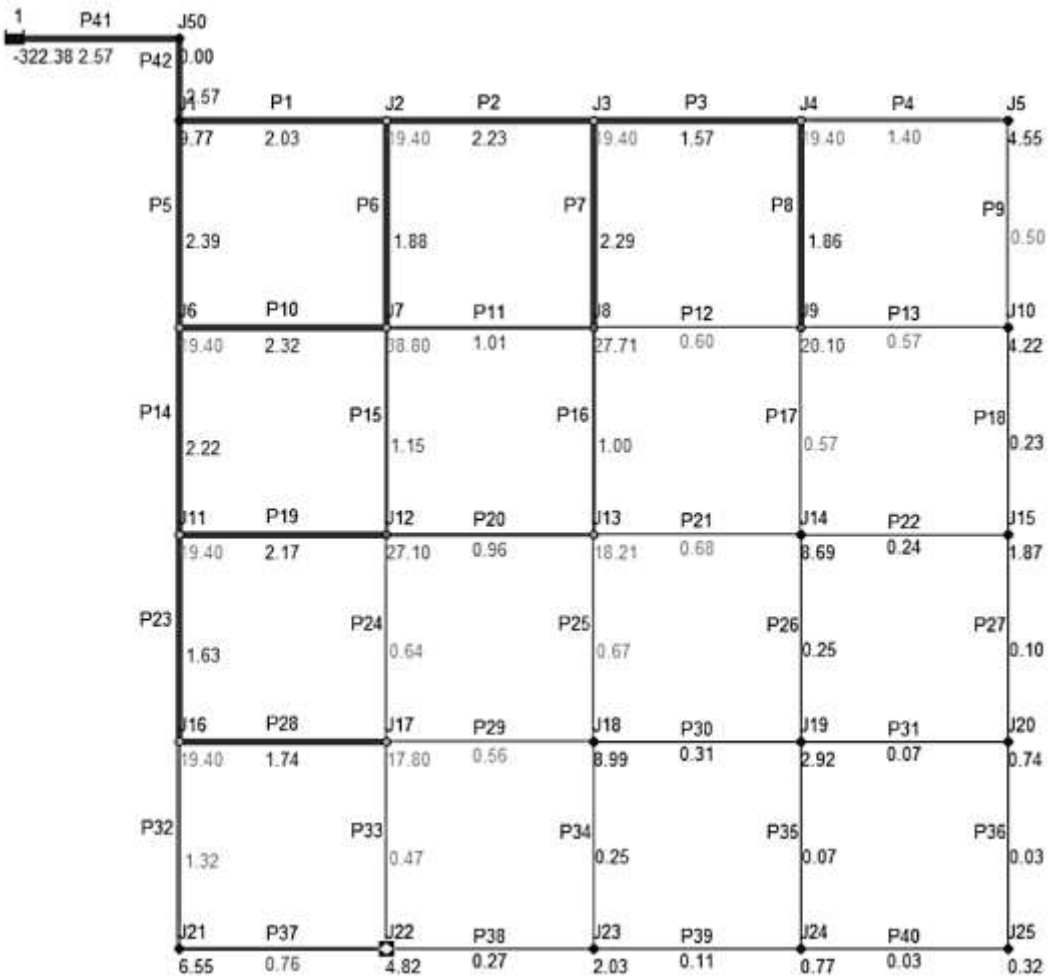
ملحق البحث:



الشكل 1-A: قيم الضاغط (m) في العقد وسرع الجريان (m/s) في الأنابيب عند زمن تغذية 2h



الشكل 2-A: توزيع الغزرات الخارجة من العقد (l/sec) وسرع الجريان في الأنابيب (m/s) من أجل سعتي تغذية في اليوم



الشكل 3-A: توزيع الغزارات الخارجة من العقد (l/sec) وسرع الجريان في الأنابيب (m/s) من أجل ثلاث ساعات تغذية في اليوم

الجدول-A: الغزارات الخارجة من العقد (m^3/d) حسب عدد ساعات التغذية

	24h	2h	3h	4h	6h	8h	10h	12h
Node ID	m^3/d	m^3/d	m^3/d	m^3/d	m^3/d	m^3/d	m^3/d	m^3/d
Junc J1	105.51	105.48	105.52	105.55	105.41	105.41	105.48	105.41
Junc J2	209.54	209.52	209.52	209.52	209.52	209.66	209.52	209.52
Junc J3	209.54	209.52	209.52	209.52	209.52	209.66	209.52	209.52
Junc J4	209.54	183.46	209.52	209.52	209.52	209.66	209.52	209.52
Junc J5	105.51	30.02	49.14	64.80	90.29	105.41	105.48	105.41
Junc J6	209.54	209.52	209.52	209.52	209.52	209.66	209.52	209.52
Junc J7	419.07	295.92	419.04	419.04	419.04	419.04	419.04	419.04
Junc J8	419.07	196.92	299.27	377.71	419.04	419.04	419.04	419.04
Junc J9	419.07	130.25	217.08	292.18	411.48	419.04	419.04	419.04
Junc J10	209.54	23.33	45.58	72.58	125.71	181.15	209.52	209.52
Junc J11	209.54	209.52	209.52	209.52	209.52	209.66	209.52	209.52
Junc J12	419.07	191.95	292.68	372.53	419.04	419.04	419.04	419.04
Junc J13	419.07	118.30	196.67	272.30	400.90	419.04	419.04	419.04
Junc J14	419.07	48.17	93.85	152.78	270.00	383.90	419.04	419.04
Junc J15	209.54	8.64	20.20	39.02	84.89	137.38	191.52	209.52
Junc J16	209.54	169.70	209.52	209.52	209.52	209.66	209.52	209.52
Junc J17	419.07	115.27	192.24	263.66	381.02	419.04	419.04	419.04
Junc J18	419.07	50.54	97.09	155.52	270.00	380.45	419.04	419.04
Junc J19	419.07	13.39	31.54	63.22	145.58	244.22	348.84	419.04
Junc J20	209.54	2.81	7.99	19.73	56.16	103.97	156.96	209.52
Junc J21	105.51	44.78	70.74	90.29	105.41	105.41	105.48	105.41
Junc J22	209.54	27.36	52.06	81.65	138.89	192.96	209.52	209.52
Junc J23	209.54	9.65	21.92	41.76	88.78	140.54	194.04	209.52
Junc J24	209.54	2.88	8.32	20.30	57.02	104.83	157.68	209.52
Junc J25	105.51	1.15	3.46	8.50	26.14	50.11	77.04	104.98
Resvr 1	6708.17	2608.06	3481.49	4170.24	5271.91	6007.97	6471.00	6706.80