

نمذجة انتشار العناصر غير المحافظة في شبكات توزيع مياه الشرب

الدكتور وانل جميل معلا

قسم الهندسة المائية

كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

المخلص

إنّ تأمين مصادر ذات نوعية مقبولة لتغذية المدينة بمياه الشرب لا يعني بالضرورة أنّ هذه المياه ستحافظ على نوعيتها الجيدة ضمن شبكة التوزيع إلى حين وصولها للمستهلك، حيث يمكن لنوعية مياه الشرب أن تتردّي خلال مرحلة التوزيع لأسباب عديدة كمكوث المياه في الشبكة لمدة طويلة قبل وصولها للمستهلك (ركود المياه)، أو وقوع حادثة تلوث بأحد العناصر الضارة في مكان ما من الشبكة، أو مجرد دخول مصادر جديدة في الخدمة (ذات نوعية أدنى) للمساعدة في تغذية الشبكة في أوقات الذروة.

تعتمد الإدارة المثلى لشبكات توزيع المياه في المدن على استخدام نماذج رياضية متطورة لمحاكاة أداء الشبكة ضمن مختلف ظروف العمل الاعتيادية والطارئة. ولا يقتصر أداء هذه النماذج على التنبؤ بالمتحولات الهيدروليكية للشبكة (كالضغط والغزارة) عند لحظة زمنية معينة وتحت حمل معين، وإنما يتعداه إلى محاكاة كامل المتغيرات الهيدروليكية والنوعية للمياه في الشبكة وعلى امتداد فترة زمنية طويلة قد تصل إلى عدة أيام أخذة بالحسبان تقلبات الاستهلاك في نقاط الشبكة مع الزمن وجميع الظروف التشغيلية الطارئة التي يمكن أن تطرأ خلال هذه الفترة كدخول مصدر تغذية جديد للشبكة، أو توقف أحد المصادر الخارجية التي تغذي خزانات الشبكة وغيرها.

قمنا في مرحلة سابقة بتطوير نموذج رياضي ديناميكي (هيدروليكي / نوعي) قادر على محاكاة التغيرات الهيدروليكية والنوعية جميعاً المشار إليها أعلاه والتي تتطلبها الإدارة المثلى لشبكات مياه الشرب في المدن (أنظر Mualla, 1999, 2000).

يتضمن هذا البحث تطويراً إضافياً للنموذج الرياضي المستنبت سابقاً بحيث أصبح قادراً على محاكاة انتشار العناصر غير المحافظة في الشبكة (أي التي يتغير تركيزها مع الزمن)، والتحويلات التي يمكن أن تطرأ عليها. كما يتضمن تطبيق هذا النموذج على إحدى الشبكات النموذجية بغية دراسة العوامل التي تؤدي إلى اضمحلال الكلور في أنابيب الشبكة وإيضاحها.

١. مقدمة:

إنّ تأمين مصادر ذات نوعية مقبولة لتغذية المدينة بمياه الشرب لا يعني بالضرورة أنّ هذه المياه ستحافظ على نوعيتها الجيدة ضمن شبكة التوزيع إلى حين وصولها للمستهلك، حيث يُمكن لنوعية مياه الشرب أن تتردى خلال مرحلة التوزيع لأسباب عديدة كمكوث المياه في الشبكة لمدة طويلة قبل وصولها للمستهلك (ركود المياه)، أو وقوع حادثة تلوث بأحد العناصر الضارة في مكان ما من الشبكة، أو مجرد دخول مصادر جديدة في الخدمة (ذات نوعية أدنى) للمساعدة في تغذية الشبكة في أوقات الذروة (Clark et al. 1988, Males et al. 1986).

كانت معظم الأنظمة والمعايير المتعلقة بنوعية مياه الشرب تركز اهتمامها سابقاً على نوعية المصدر المائي ذاته، أي نوعية المياه عند دخولها شبكة التوزيع، وتولي اهتماماً قليلاً للتحويلات التي يُمكن أن تطرأ على هذه النوعية داخل الشبكة، أي بين نقاط التغذية ونقاط الاستهلاك. غير أنّ إقرار قوانين أكثر صرامة تتعلق بنوعية مياه الشرب في العديد من الدول دفع بالقائمين على إدارة مؤسسات المياه أن يولوا التغييرات التي يُمكن أن تطرأ على نوعية المياه خلال مرحلة التوزيع اهتماماً أكبر. ففي الولايات المتحدة على سبيل المثال، كان لصدور قانون المياه الصالحة للشرب Safe Drinking Water Act عام ١٩٧٤ وتعديلاته عام ١٩٨٦، اللذين ينصان صراحة على أن تقوم وكالة حماية البيئة الأمريكية USEPA بتحديد قيم عظمى (لا يمكن تجاوزها) لتركيز جميع العناصر التي يمكن أن توجد في مياه الشرب والتي يمكن أن يكون لها تأثير ضار في صحة الإنسان، وأن يتم التحقق من توافق مياه الشرب مع هذه القيم عند نقاط الاستهلاك، كان لهما وقع كبير على مؤسسات المياه التي أخذت تضع في حساباتها نظام التوزيع بأكمله لتحقق المعايير المطلوبة (Clark et al. 1993).

تعتمد الإدارة المثلى لشبكات توزيع المياه في المدن على استخدام نماذج رياضية منطوية لمحاكاة أداء الشبكة ضمن مختلف ظروف العمل الاعتيادية والطارئة. ولا يقتصر أداء هذه النماذج على التنبؤ بالمتحوّلات الهيدروليكية للشبكة (كالضغط والغازارة) عند لحظة زمنية معينة وتحت حمل معين، وإنما يتعداه إلى محاكاة كامل المتغيرات الهيدروليكية والنوعية للمياه في الشبكة وعلى امتداد فترة زمنية طويلة قد تصل إلى عدة أيام أخذة بالحسبان تقلبات الاستهلاك في نقاط الشبكة مع الزمن وجميع الظروف التشغيلية الطارئة التي يمكن أن تطرأ خلال هذه الفترة كدخول مصدر تغذية جديد للشبكة، أو توقف أحد المصادر الخارجية التي تغذي خزانات الشبكة وغيرها. فعلى سبيل المثال، يُمكن باستخدام هذه النماذج تحديد تركيز كل عنصر من العناصر المنحلة في مياه الشرب في جميع أنحاء الشبكة وتغير هذا التركيز بدلالة الزمن، كما يُمكن بواسطتها تحديد مواقع الشبكة التي تتعدى من كل مصدر مائي من مصادر تغذية الشبكة ونسبة تغذيتها من هذا المصدر، كذلك تُفيد هذه النماذج في حساب عمر المياه في مختلف أنحاء الشبكة (يُقاس عمر المياه منذ لحظة خروج المياه من المصدر المائي ودخولها شبكة التوزيع)، ومن ثمّ التعرف على مناطق الشبكة التي يكون فيها عمر المياه كبيراً (مياه راكدة) والتي يُمكن أن تتردى فيها نوعية المياه.

قمنا في مرحلة سابقة بتطوير نموذج رياضي ديناميكي (هيدروليكي / نوعي) قادر على محاكاة التغيرات الهيدروليكية والنوعية جميعاً المشار إليها أعلاه والتي تتطلبها الإدارة المثلى لشبكات مياه الشرب في المدن (انظر (Mualla, 1999, 2000) و قد تم إثبات النموذج الرياضي والتأكد من دقة تمثيله للتغيرات الهيدروليكية والنوعية التي يمكن مصادفتها في شبكات الأنابيب عن طريق مقارنة مخرجاته مع الحلول الدقيقة لشبكات قابلة للحل اليدوي، ومع مخرجات النموذج العائد لوكالة حماية البيئة الأمريكية US

EPANET . وقد أظهرت هذه المقارنات دقة تمثيل النموذج الرياضي للتغيرات الهيدروليكية والنوعية التي تتعرض لها شبكات الأنابيب؛ مما يسمح باستخدام النموذج المطور في دراسة حالات واقعية. كذلك فقد تمّ في السابق (من خلال الإشراف على إحدى رسائل الماجستير في كلية الهندسة المدنية في جامعة دمشق [عبد المالك، 1996]) تطوير نموذج هيدروليكي نوعي شبه ديناميكي، غير أن الطبيعة الديناميكية التي تتميز بها شبكات المدن الكبيرة جعلت من العسير استخدام هذا النموذج في محاكاة الظواهر الديناميكية بدقة مثل ظاهرة انتشار أحد العناصر المنحلة في المياه خلال الشبكة بدلالة الزمن. يهدف هذا البحث إلى استخدام النموذج الرياضي المطور في دراسة بعض العوامل التي تؤدي إلى تغير نوعية المياه في شبكات الأنابيب خاصة، فيما يتعلق بتغير تركيز العناصر غير المحافظة مع الزمن؛ حيث نخص بالبحث دراسة العوامل التي تؤدي إلى تغير تركيز الكلور مع الزمن. نعرض فيما يأتي بإيجاز إلى المعادلات الأساسية للنموذج الهيدروليكي (الكمي/ النوعي) المستنبط، ثم نبحت في استخدام هذا النموذج في دراسة بعض العوامل التي تؤدي إلى تغير نوعية المياه في إحدى شبكات الأنابيب.

٢. النموذج الهيدروليكي المستقر:

تتكون شبكة الأنابيب من مجموعة من الأنابيب المتلاقية في عدد كبير من النقاط تدعى عقد nodes، ويمكن لهذه الأنابيب أن تشكل فيما بينها حلقات مغلقة loops. ومن وجهة نظر التحليل الهيدروليكي، يمكن أن نميز نوعين من العقد في شبكات الأنابيب: عقد التفرع Junction nodes وهي العقد التي يكون فيها منسوب خط الطاقة (أو خط الضاغط البيزومتري) مجهولاً، وعقد الطاقة الثابتة Fixed energy nodes وهي العقد التي يكون فيها منسوب خط الطاقة معلوماً بسبب وجود خزان مائي على سبيل المثال. اعتماداً على نظرية البيانيات Graph Theory، نتحقق في جميع شبكات الأنابيب العلاقة الآتية:

$$p = j + l + f - 1 \quad (1)$$

حيث: p عدد الأنابيب و j عدد عقد التفرع و l عدد الحلقات و f عدد عقد الطاقة الثابتة. بتطبيق معادلة انحفاظ الكتلة عند كل عقدة تفرع من عقد الشبكة يمكن الحصول على مجموعة من المعادلات الخطية (عددها بعدد عقد تفرع الشبكة j) لها الشكل الآتية:

$$\sum_{i=1}^m Q_i = Q_{ext} \quad (2)$$

حيث:

Q_i : الجريان في الأنبوب .

Q_{ext} : الاستهلاك عند العقدة .

m : عدد الأنابيب التي تلتقي عند العقدة .

بتطبيق مبدأ انحفاظ الطاقة في كل حلقة أساسية من حلقات الشبكة، يمكن الحصول على مجموعة من المعادلات غير الخطية (عددها l) لها الشكل الآتي:

$$\sum_{i=1}^N \pm K_i Q_i^n = 0 \quad (٣)$$

حيث K_i و n تابعان لنوع معادلة الاحتكاك المستخدمة (الجدول ١) و N عدد الأنابيب في الحلقة.

الجدول ١.

Formula	Resistance Coefficient K	Flow Exponent n
Darcy-Weisbach	$(8/\pi^2 g) \lambda L/D^5$	2
Hazen-Williams	$10.68L/(C^{1.852} D^{4.87})$	1.852

بتطبيق مبدأ انخفاض الطاقة أيضاً ما بين كل عقدتي طاقة ثابتة من عقد الشبكة، يمكن الحصول على مجموعة من المعادلات غير الخطية (عددها **f-1**) لها الشكل الآتي:

$$\sum_{i=1}^N \pm K_i Q_i^n = H_{s1} - H_{s2} = \Delta H \quad (٤)$$

حيث ΔH هو فرق الضغوط الكائن بين عقد الطاقة الثابتة ١ و ٢.

تشكل مجموعة المعادلات الناتجة p معادلة تتضمن p مجهولاً هي الغزرات في أنابيب الشبكة. لا يمكن حل مجموعة المعادلات هذه بشكل مباشر كون بعضها غير خطي، وإنما يجب حلها باستخدام طرائق عددية مناسبة تعتمد على التقريب المتتالي (Bhave, 1991, Jeppson, 1977). وقد اعتمدنا في النموذج الرياضي الطريقة الخطية المقترحة من قبل وود (Wood and Charles, 1972) لما تتميز به من خصائص جيدة تتعلق بسرعة تقاربها واستغنائها عن عملية الفرض البدائي للغزرات في أنابيب الشبكة (انظر معلا، ١٩٩٢).

٣. النموذج الهيدروليكي الديناميكي (غير المستقر):

تمثل نماذج الجريانات المستقرة العوامل الخارجية المؤثرة في الشبكة (الاستهلاك عند العقد ومناسيب المياه في الخزانات) على أنها ثابتة بدلالة الزمن. لكن في معظم شبكات الأنابيب يتأرجح الاستهلاك عند العقد وتتغير مناسيب المياه في الخزانات باستمرار ولا يتحقق الجريان المستقر أبداً. في هذه الحالة تكون نماذج الجريانات غير المستقرة أكثر ملاءمة للتنبؤ بالتغيرات الديناميكية بدقة.

اعتماداً على نظرية العمود الصلب Rigid Water Column Theory تعطى المعادلة الديناميكية التي تصف التغير البطيء للجريان في أنبوب ما (بدلالة الزمن) بالمعادلة الآتية (معلا، ١٩٩٢ و Islam and Chaudhry, 1998):

$$H_1 - H_2 = \frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} + K |Q|^{n-1} Q \quad (٥)$$

حيث:

H_1 : منسوب خط الضغوط البيزومتري في بداية الأنبوب.

H_2 : منسوب خط الضاغط البيزومتري في نهاية الأنبوب .

L : طول الأنبوب

A : مساحة مقطع الأنبوب (مقطع الجريان)

Q : الغزارة الجارية في الأنبوب

بتطبيق المعادلة (٥) على كل أنبوب في كل مسار من مسارات الشبكة نحصل على المعادلة الآتية:

$$\sum_{i=1}^N (H_{1_i} - H_{2_i}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{L_i}{gA_i} \frac{dQ}{dt} \right) + \sum_{i=1}^N (K_i |Q_i|^{n-1} Q_i) \quad (٦)$$

في حالة مسار مغلق (حلقة أساسية)، يساوي الحد الواقع في الطرف الأيسر من المعادلة الصفر حيث إن الضاغط في بداية الأنبوب $i+1$ يختصر مع الضاغط في نهاية الأنبوب i . أما في حالة مسار مفتوح (بين عقدتي طاقة ثابتة) فإن الطرف الأيسر من المعادلة (٦) يساوي ΔH . من أجل خطوة زمنية صغيرة Δt يمكن كتابة المشتق dQ/dt على النحو الآتي:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Q^{t+\Delta t} - Q^t}{\Delta t} \quad (٧)$$

حيث تشير $Q^{t+\Delta t}$ إلى قيمة Q عند الزمن $t+\Delta t$ ، و تشير Q^t إلى قيمة Q عند الزمن t . بالتعويض في المعادلة (٦) وفصل الكميات المعروفة والمجهولة، نحصل على المعادلة الآتية من أجل كل مسار في الشبكة.

$$\sum_{i=1}^N \frac{L_i}{gA_i} Q_i^{t+\Delta t} + \sum_{i=1}^N K_i Q_i^{t+\Delta t} (Q_i^t)^n \Delta t = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{gA_i} Q_i^t + \Delta H \cdot \Delta t \quad (٨)$$

لمّا كان التحليل الديناميكي للجريان في شبكة أنابيب هو عبارة عن مسألة قيمة أولية Initial value problem، فإن الحل الديناميكي ينطلق دوماً من حساب أولي للجريان المستقر في الشبكة (باستخدام النموذج الهيدروليكي المستقر) بغية تحديد الشروط البدائية Initial conditions للجريان في الشبكة التي سينطلق منها الحل الديناميكي.

ينتج عن تطبيق المعادلة (٨) في كل مسار من مسارات الشبكة مجموعة من المعادلات الخطية التي يمكن حلها مع معادلات الاستمرار عند عقد الشبكة (المعادلة ٢) للحصول على الجريان المتغير مع الزمن في أنابيب الشبكة (ومن ثمّ مناسب الضاغط البيزومتري عند العقد) وذلك بدلالة الشروط الحدية المطبقة والمتغيرة مع الزمن. ويمكن معالجة أنواع عديدة من الشروط الحدية المتغيرة مع الزمن بما في ذلك استهلاك متغير عند عقد الشبكة، وخرانات متغيرة المناسب، ومضخات تطلع وتتوقف عند أمانة محددة وغيرها من الشروط الحدية.

في حال وجود خزان متغير منسوب الماء عند إحدى عقد الشبكة، تكون معادلة الشرط الحدي الواجب حلها عند كل خطوة زمنية من التحليل الديناميكي كما يأتي:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \sum_{i=1}^m \pm Q_i \quad (٩)$$

حيث يمثل الحد $\Delta S/\Delta t$ تغير حجم المياه في الخزان بدلالة الزمن. ويمكن بعد تحديد حجم التخزين في

نهاية الخطوة Δt حساب منسوب المياه في الخزان في نهاية الخطوة الزمنية Δt أيضا بتقسيم حجم المياه في الخزان على مساحة مقطع الخزان A_s .

٤ - النموذج النوعي الديناميكي:

تعد نماذج نوعية المياه المستقرة مفيدة في التحري عن توزيع الملوثات contaminants ضمن شبكة توزيع ضمن ظروف عمل ثابتة (غير متغيرة مع الزمن). وتستطيع بذلك أن تؤمن تبصراً في التغيرات الإجمالية في نوعية المياه في شبكة الأنابيب. غير أن نماذج نوعية المياه المستقرة لا تستطيع تعقب حركة الملوثات والتحويلات التي تطرأ عليها ضمن ظروف جريان متغيرة مع الزمن نتيجة لتغير الاستهلاك في الشبكة ومناسيب المياه في الخزانات.

في نماذج نوعية المياه الديناميكية، تحل معادلة انتقال الكتلة mass transport equation خلال كل فترة زمنية Δt في كل أنبوب من أنابيب الشبكة، وذلك من أجل حساب حركة الملوث وتحولاته في جميع أنحاء نظام التوزيع.

عندما يجري الماء في أنبوب ما بسرعة وسطية u ، ينقل معه العناصر المنحلة كلها فيه على امتداد طول الأنبوب بالسرعة الوسطية نفسها للجريان. وفي الوقت نفسه، يمكن لهذه العناصر أن تتفاعل في أثناء انتقالها في الأنبوب وفق معدل ما مما ينقص من تركيزها في الماء الجاري، أو يزيده وذلك وفقاً لطبيعة العنصر.

يمكن نمذجة الانتقال أحادي البعد لأحد عناصر الجريان في أنبوب ما باستخدام العلاقة الآتية (Rossman, 1994):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{Q_i}{A_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \theta(C_i), i = 1 \dots P \quad (10)$$

حيث:

C_i : التركيز في الأنبوب i .

Q_i : الغزارة في الأنبوب i .

A_i : مساحة مقطع الأنبوب i .

$\theta(C_i)$: حد التفاعل.

تعطي هذه العلاقة تغير تركيز أحد العناصر نتيجة لانتقال الجريان في أنبوب ما، حيث ينتقل جسم السائل على امتداد الأنبوب بسرعة وسطية تساوي مقدار الغزارة الحجمية مقسمة على مساحة مقطع الأنبوب. تتضمن العلاقة أيضاً حد تفاعل $\theta(C_i)$ يمكن أن يعبر عن تناقص (اضمحلال Decay) أو تزايد (تشكل Formation) تركيز أحد العناصر خلال عملية الانتقال وذلك باستخدام علاقة مناسبة تصف ذلك. وتكون قيمة حد التفاعل موجبة من أجل العناصر التي يزداد تركيزها مع الزمن (كالترياهالوميثان THM)، وسالبة من أجل العناصر التي يتناقص تركيزها مع الزمن (كالكلور). أما بالنسبة للعناصر المحافضة Conservative substances (التي لا يتغير تركيزها مع الزمن كالفلور)، فتكون في هذه الحالة قيمة $\theta(C_i)$ تساوي الصفر وتختزل المعادلة (10) إلى ما يأتي:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{Q_i}{A_i} \frac{\partial C_i}{\partial x}, i = 1 \dots P \quad (11)$$

والتي تعبر عن تغير تركيز عنصر ما من عناصر الجريان في أنبوب ما نتيجة لانتقال الجريان على امتداد الأنبوب.

لا يتوافر حل عام للمعادلة (١٠) إلا في حالة وجود شروط حدية وظروف بدائية مبسطة. وتستخدم الطرائق العددية عادة من أجل تكامل هذه العلاقة. إن المعادلة (١٠) عبارة عن معادلة تفاضلية جزئية مكافئة يتطلب حلها في أنبوب ما شروطاً حدية معرفة في بداية ونهاية الأنبوب، وتوزيعاً بدائياً لتركيز العنصر المدروس في الأنبوب.

تحل عادة المعادلة (١٠) عن طريق تحويلها إلى معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى باستخدام طريقة الفروق المحدودة، وذلك بتقسيم الأنبوب إلى مجموعة من العقد تحصر كل عقدة منهن حسب طولها Δx :

$$\frac{C_{i,l}^{t+\Delta t} - C_{i,l}^t}{\Delta t} = -\frac{Q_i}{A_i \Delta x} (C_{i,l}^t - C_{i,l-1}^t) + \theta(C_{i,l}^t), \quad (12)$$

$$i = 1 \dots P, l = 1 \dots n_i$$

حيث:

$C_{i,l}$: التركيز في الأنبوب i عند عقدة الفروق المحددة l .

Δx_i : طول الحيس في الأنبوب i ، أي المسافة بين عقدتين متتاليتين من عقد الفروق المحدودة في الأنبوب i .

$\theta(C_{i,l})$: حد التفاعل.

n_i : عدد عقد الفروق المحدودة في الأنبوب i .

٥- الشروط الحدية

المزج عند العقد:

يفرض مزج كلي للجريان عند العقد، يعطى تركيز العنصر المدروس عند العقدة بالمعادلة الآتية (Walski et al., 2000):

$$C_{OUT_j} = \frac{\sum_{i \in IN_j} C_{i,n_j} Q_i}{\sum_{i \in OUT_j} Q_i} \quad (13)$$

حيث:

C_{OUT_j} : التركيز الخارج من عقدة التفرع j .

OUT_j : مجموعة الأنابيب التي تكون فيها الغزارة خارجة من العقدة j .

IN_j : مجموعة الأنابيب التي تكون فيها الغزارة داخلة إلى العقدة j .
 Q_i : الغزارة في الأنبوب i .
 $C_{i,ni}$: التركيز الداخل إلى عقدة التفرع من الأنبوب i .

المزج في الخزانات

تكون الأنابيب موصولة في بعض الحالات مع خزانات ثابتة المنسوب Reservoirs أو متغيرة المنسوب Tanks. ويمكن للجريان في هذه الحالة أن يدخل الخزان أو يخرج منه. في حالة خزانات متغيرة المنسوب ويفرض أنه يحدث مزج كلي للماء في الخزان تعطي معادلة انحفاظ الكتلة عبر الخزان المعادلة الآتية (Walski et al., 2000):

$$\frac{d(C_T V_T)}{dt} = Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_T + \theta(C_T) \quad (14)$$

حيث،

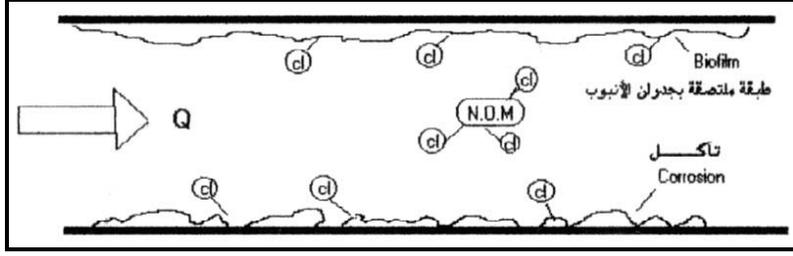
C_T : التركيز في الخزان
 V_T : حجم الماء في الخزان
 $\theta(C_T)$: حد التفاعل.

٦- نمذجة اضمحلال الكلور في شبكات الأنابيب:

يعد الكلور Chlorine أكثر المعقمات استخداماً في تعقيم مياه الشرب. وتكمن ميزاته الأساسية في كلفته الضئيلة ومجال تأثيره الواسع. وتحاول معظم مؤسسات مياه الشرب المحافظة على نسبة معينة من الكلور المتبقي في شبكات توزيع المياه لمنع أي نمو جرثومي. فعلى سبيل المثال، تنص معايير مياه الشرب المعتمدة في سورية على ألا تقل قيمة الكلور المتبقي الصغرى في جميع أنحاء شبكة التوزيع عن 0.2 mg/liter.

غير أن الكلور يعد عنصراً غير مستقر ويتفاعل بسهولة مع العديد من المركبات العضوية وغير العضوية مما يؤدي إلى تلاشيته تدريجياً في شبكة توزيع المياه. من جهة أخرى، فإن نسب الكلور العالية تساعد على تآكل الأنابيب، كما أنها تُحدث رائحة وطعماً غير مستساغين. لذا تعتمد مؤسسات المياه إلى استخدام جرعة الكلور الدنيا اللازمة لتوفير تعقيم مناسب في جميع أنحاء شبكة التوزيع.

عند انتقال الكلور في أنابيب شبكة التوزيع، يتفاعل مع المواد الموجودة ضمن جسم السائل الجاري ومع الطبقة الملتصقة بجدران الأنابيب، الشكل (١). ويمكن أن تحدث تفاعلات إضافية مشابهة في منشآت التخزين. تؤدي هذه التفاعلات إلى نقصان في مقدار الكلور الذي يحتويه أي حجم معين من الماء، وذلك اعتماداً على زمن مكوث هذا الحجم من الماء في الشبكة (أو في خزان التوزيع) والمسافة التي قطعها منذ دخوله الشبكة (Clark, 1994, Clark et al 1994, Rossman et al 1994, Vasconcelos et al 1996, 1997).



الشكل رقم ١ .

أظهرت البحوث التي أجريت لتقصي معدلات اضمحلال الكلور المتبقي في أنبوب وحيد يجري فيه الماء أن معدل الاضمحلال في الأنبوب قد يكون أكبر بعدة مرات من معدل الاضمحلال في وعاء يحوي الماء نفسه. يشير ذلك إلى أن جدران الأنبوب تؤثر بشكل ما في الطلب الكلي على الكلور في أنظمة التوزيع.

درس وابل (Wable et al 1991) فقدان الكلور في ثلاثة مواقع مختلفة من شبكة مياه باريس، وقاس استهلاك الكلور الحر في أنابيب الشبكة. كما أجرى أيضاً قياسات لاضمحلال الكلور في وعاء يحوي الماء نفسه. وبمقارنة النتائج التي حصل عليها في الوعاء مع تلك العائدة لأنابيب الشبكة تبين له بوضوح تأثير الطلب على الكلور من جدران الأنابيب. فقد وجد أن النسبة بين اضمحلال الكلور في الشبكة واضمحلاله في الوعاء تتراوح بين 2.37 و 7.13 .

وقد أعطت دراسات مماثلة أجراها كلارك (Clark et al 1993, 1994) نتائج مشابهة. وبمقارنة البيانات المتعلقة بفقدان الكلور المتبقي في الشبكة مع بيانات فقدان الكلور المتبقي في وعاء، حصل كلارك على نسب تتراوح بين 1.07 و 20.16 .

وصف هنت وكروون (Hunt and Kroon, 1991) نموذجاً رياضياً للكلور المتبقي في الشبكة يعتمد على استخدام تفاعل من الدرجة الأولى لاضمحلال الكلور. وقاما بإعطاء معامل معدل اضمحلال خاص لكل أنبوب في الشبكة ولكل منشأة تخزين فيها. وقد اضطررا عند معايرة نموذجهما إلى إعطاء معاملات اضمحلال أعلى للأنابيب الصغيرة المقطع بغية تحقيق مطابقة أفضل مع مناسيب الكلور المقاسة. وهذا يتوافق مع حقيقة أن الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة توفر مساحات جدران أكبر لوحدة الحجم من الجريان من أجل حدوث التفاعل.

قام روسمان وشركاؤه (Rossman et al 1994) بتطوير نموذج عام لاضمحلال الكلور يعتمد على انتقال الكتلة mass transfer. يوفر هذا النموذج آلية للتعبير عن فقدان عنصر ما نتيجة للتفاعل ضمن جسم الجريان bulk flow، ومع الطبقة الرقيقة biofilm الملتصقة بجدران الأنابيب، وذلك في أثناء انتقاله ضمن شبكة التوزيع. وقد افترض روسمان تفاعلاً من الدرجة الأولى للكلور ضمن جسم الجريان ومع جدران الأنابيب.

نعتمد في نموذجنا الرياضي في تمثيل اضمحلال الكلور المتبقي في أنابيب الشبكة على الطريقة التي اقترحها روسمان وشركاؤه (Rossman et al 1994, 2000) حيث يعطى حد تفاعل الكلور بالعلاقة الآتية:

$$\theta(C) = -KC \quad (10)$$

حيث:

K : معامل معدل الاضمحلال الكلي للكلور (day^{-1}) وهو تابع لمعامل اضمحلال الكلور (أي معامل التفاعل) في جسم السائل الجاري، ومعامل اضمحلال الكلور نتيجة للتفاعل مع جدران الأنابيب:

$$K = k_b + \frac{k_w k_f}{R_H (k_w + k_f)} \quad (16)$$

حيث:

k_b : معامل التفاعل في جسم الجريان (day^{-1}).
 k_w : معامل تفاعل جدران الأنابيب (m/day).
 k_f : معامل انتقال الكتلة من جسم الجريان إلى جدران الأنابيب (m/day).
 R_H : نصف القطر الهيدروليكي للأنبوب (m).

يعتمد معدل اضمحلال الكلور عند جدران الأنابيب على مدى سرعة انتقال الكلور من جسم الجريان إلى جدران الأنابيب وعلى سرعة التفاعل عند بلوغه جدران الأنابيب. يستخدم معامل انتقال الكتلة لتحديد معدل انتقال الكلور باستخدام عدد شيرودود Sherwood Number اللابعددي، ومعامل الانتشار الجزيئي Molecular Diffusivity Coefficient للكلور في الماء وقطر الأنابيب [Vasconcelos et al. 1994, Rossman et al. 1997]:

$$k_f = \frac{S_H d}{D} \quad (17)$$

حيث:

SH : عدد شيرودود
d : الانتشار الجزيئي للكلور في جسم الجريان (m^2/day).
D : قطر الأنابيب (m).
إن عدد شيرودود في حالة جريان راكد ($Re < 1$) يساوي 2.0 . أما في حالة الجريان المضطرب ($Re > 2300$) فيحسب عدد شيرودود باستخدام العلاقة الآتية:

$$S_H = 0.023 Re^{0.83} \left(\frac{v}{d}\right)^{0.333} \quad (18)$$

حيث:

Re : عدد رينولدز.
v : اللزوجة الحركية للماء (m^2/s).
في حالة الجريان الصفحي ($1 < Re < 2300$) يمكن استخدام عدد شيرودود الوسطي للأنبوب:

$$S_H = 3.65 + \frac{0.0668 \left(\frac{D}{L}\right) \left(\text{Re}\right) \left(\frac{V}{d}\right)}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{D}{L}\right) \text{Re}\left(\frac{V}{d}\right)\right]^{2/3}} \quad (19)$$

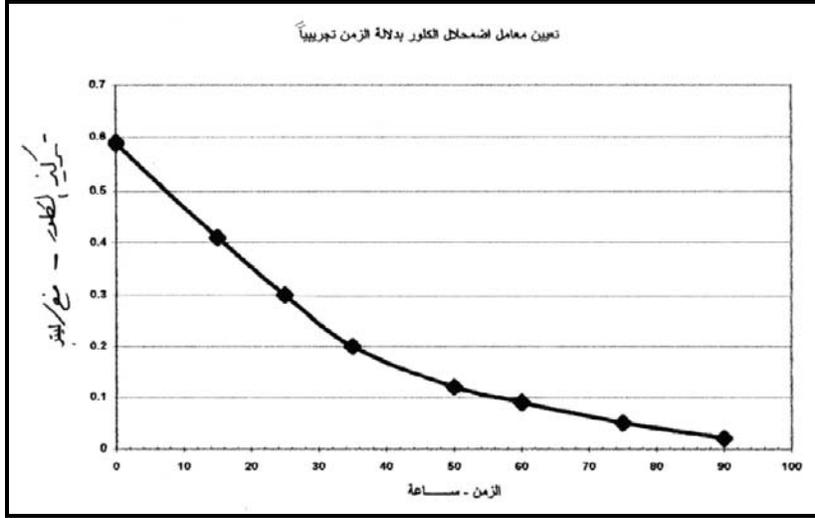
حيث L طول الأنبوب (m).

يحدد عادة معامل تفاعل الكلور في جسم الجريان k_b عن طريق قياس معدل تلاشي الكلور المتبقي في عينة من المياه المأخوذة من الشبكة مع الزمن والموضوعة في وعاء زجاجي. يبين الشكل (٢) منحنى اضمحلال الكلور بتابعية الزمن لعينة من المياه مأخوذة من شبكة مياه مدينة دمشق. يلاحظ من الشكل أن القيمة الوسطية لمعامل الاضمحلال في هذه الحالة تساوي $(-0.0366 \text{ sec}^{-1})$ أو $(-0.8784 \text{ day}^{-1})$.

أما بالنسبة لمعامل تفاعل جدران الأنبوب k_w فإن تحديده أكثر صعوبة. فمعاملات تفاعل جدران الأنابيب شأنها في ذلك شأن معاملات الخشونة قد تتغير من أنبوب إلى آخر في الشبكة. وعلى عكس ما هي الحال بالنسبة إلى قياسات الفواقد في الأنابيب التي يمكن بواسطتها تحديد معاملات خشونة الأنابيب بسهولة، فإن قياس معاملات تفاعل جدران الأنابيب صعب جداً. ويتم تقديرها عادة في أثناء معايرة النموذج الرياضي بمقارنة مخرجات النموذج الرياضي مع قياسات حقلية. وتكون قيم معاملات جدران الأنابيب المعتمدة في شبكة ما هي تلك القيم التي تعطي أكبر توافق ما بين القيم المقاسة حقلياً والقيم المحاكاة باستخدام النموذج الرياضي. تتراوح القيم التي تم الحصول عليها تجريبياً لمعاملات تفاعل جدران الأنابيب ما بين (0-1.524 m/day) (انظر Vasconcelos, Greyman, Rossman, Boulos and Clark, 1997). وقد افترض فاسكونسيلوس وشركاؤه أن معامل تفاعل جدران الأنابيب يرتبط بمعامل خشونة الأنبوب عبر المعادلة الآتية:

$$k_w = \psi / C$$

حيث C معامل هيزن-وليامز و ψ معامل يتم تحديده بطريقة التجربة والخطأ في أثناء معايرة النموذج الرياضي، وذلك بمقارنة نتائج المحاكاة بقياسات حقلية.



الشكل رقم ٢.

٧- إجراء الحل:

بناءً على ما سبق، تأخذ المعادلة (١٢) الشكل الآتي:

$$\frac{C_{i,l}^{t+\Delta t} - C_{i,l}^t}{\Delta t} = -\frac{Q_i}{A_i \Delta x} (C_{i,l}^t - C_{i,l-1}^t) + KC_{i,l}^t, \quad (20)$$

$$i = 1 \dots P, l = 1 \dots n_i$$

حيث K معامل الاضمحلال الكلي للكلور (day^{-1}).

والتي يمكن كتابتها على النحو الآتي:

$$C_{i,l}^{t+\Delta t} = (1 - \alpha - K\Delta t)C_{i,l}^t + \alpha C_{i,l-1}^t \quad (21)$$

حيث α عدد كوران $\alpha = (Q\Delta t)/(A\Delta x)$ (Courant Number).

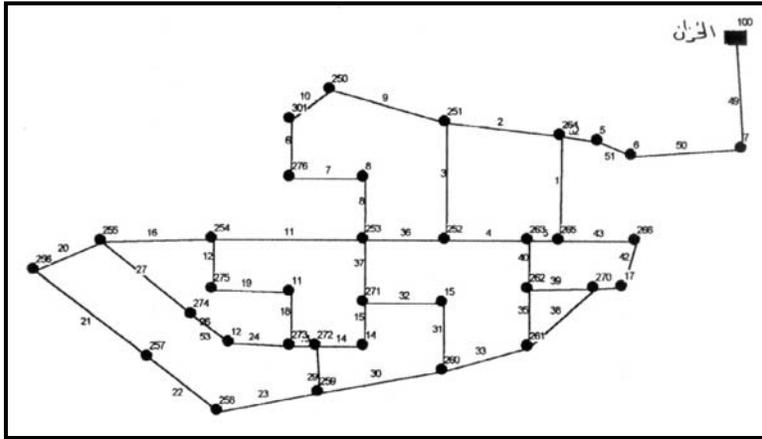
تمثل المعادلات (١٢) إلى (٢١) مجموعة من المعادلات التفاضلية الجبرية المرتبطة فيما بينها والتي يجب حلها من أجل كل أنبوب من أنابيب الشبكة عند كل خطوة زمنية من خطوات الحل الديناميكي، وذلك لحساب انتقال العنصر المدروس في أنابيب الشبكة. يمكن حل هذه المعادلات ضمن مجموعة من الظروف الهيدروليكية المعروفة والمتغيرة مع الزمن، وذلك باستخدام تقانة تجزيء رياضي صريحة

explicit discretization technique مناسبة. خلال كل خطوة زمنية من خطوات الحساب الهيدروليكي الديناميكي hydraulic time step حيث تكون الظروف الهيدروليكية في الشبكة ثابتة، وبعد تحديد الغزارات والسرع في جميع أنابيب الشبكة باستخدام النموذج الهيدروليكي الديناميكي، يبدأ حساب انتقال عنصر الجريان المدروس (الكلور) في كل أنبوب من أنابيب الشبكة بحل المعادلة (٢١) على خطوات زمنية أصغر تعرف بخطوة نوعية المياه water-quality time step. يقسم كل أنبوب من أنابيب الشبكة إلى مجموعة من العقد الجزئية تحصر كل عقدين منها حسباً طوله Δx . وقد راعينا عند اختيار عدد الأحباس أن تكون قيمة عدد كوران أقرب ما يمكن إلى الواحد منعاً للتشتيت العددي numerical dispersion. تطبق المعادلة (٢١) عند كل عقدة من عقد الأنابيب الجزئية لحساب تغير تركيز العنصر المدروس في أثناء انتقاله على امتداد الأنبوب. وعند الانتهاء من حساب انتقال العنصر المدروس على امتداد الأنبوب، يراعى الشرط الحدي الموجود في نهاية الأنبوب (سواء أكان ذلك عقدة تفرع أم عقدة طاقة ثابتة)، بتطبيق معادلة الشرط الحدي المناسبة من المعادلتين (١٣) و (١٤).

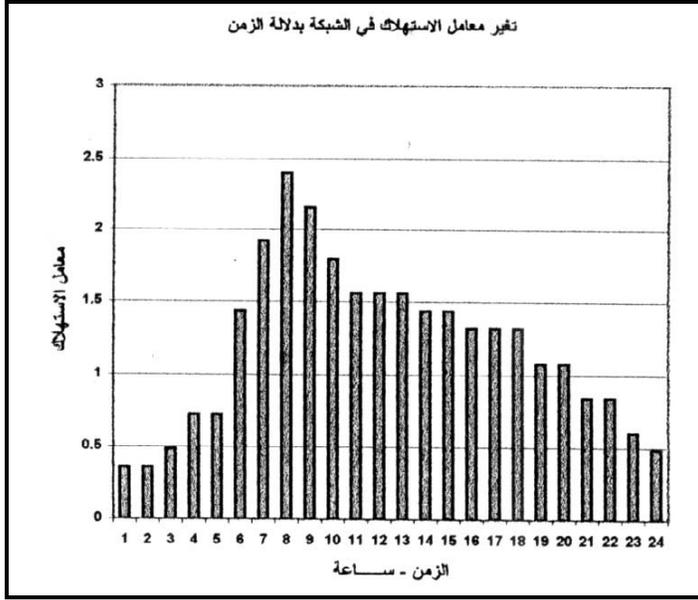
٨- تطبيق:

على الرغم من أن الهدف النهائي من تطوير النموذج الرياضي (الهيدروليكي/النوعي) هو استخدامه في دراسة العوامل التي تؤدي إلى تغير نوعية المياه في شبكة مياه دمشق المنخفضة التي تتغذى من مصادر مياه مختلفة النوعية (مياه عين الفيحة ومياه الآبار)، إلا أننا نورد فيما يأتي تطبيقاً للنموذج الرياضي على إحدى الشبكات المقتبسة من أطراف مدينة دمشق مع بعض التعديلات عليها، وذلك بغية دراسة بعض العوامل التي تؤدي إلى تغير نوعية المياه في الشبكة وإيضاحها، علماً بأن التطبيق على شبكة مياه دمشق المنخفضة قيد الإنجاز حالياً.

تتألف الشبكة المدروسة من 34 عقدة تفرع و 44 أنبوباً تتراوح أقطارها ما بين 600 mm و 150 mm ، الشكل (٣). تتغذى الشبكة بالمياه من خزان واسع منسوب مانه 783.25 m عن سطح البحر ويقع عند العقدة 100. يبين الجدولان (٢) و (٣) الخصائص الفيزيائية للشبكة بما في ذلك الاستهلاك الوسطي عند العقد. وبغرض التحليل الهيدروليكي الديناميكي للشبكة اعتمد منحني تغيرات الاستهلاك المبين في الشكل (٤) للتعبير عن التقلبات اليومية في الاستهلاك عند عقد الشبكة.



الشكل رقم ٣.

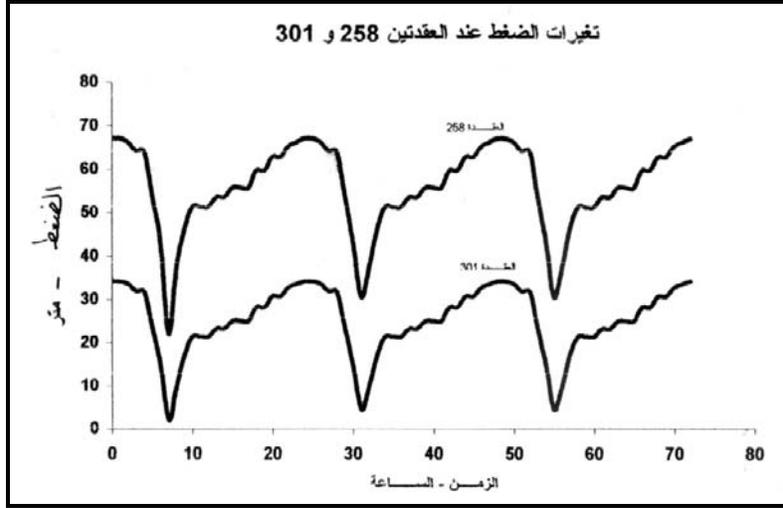


الشكل رقم ٤ .

وقد أجري التحليل الديناميكي للشبكة لمدة ٧٢ ساعة (ثلاثة أيام) واستخدمت خطوة زمنية مقدارها ساعة واحدة ($\Delta t=1 \text{ hour}$) للحسابات الهيدروليكية.

يبين الشكل (٥) تغيرات الضغط في الشبكة عند العقدة 301 (الواقعة في أعالي الشبكة) والعقدة 258 (الواقعة في المنطقة المنخفضة من الشبكة) على امتداد الأيام الثلاثة، حيث يلاحظ بوضوح أن قيمة الضغط تنخفض عند العقدة 301 في أوقات الذروة (الساعة ٨ صباحاً) إلى قيم غير مقبولة.

وبغرض التحليل النوعي فقد افترضنا أن عملية الكلورة تحدث في الخزان بحيث تحتوي المياه الخارجة منه والداخلية إلى الشبكة على نسبة من الكلور المتبقي مقدارها 0.6 mg/liter ، وأن المياه في الشبكة لا تتضمن أية نسبة من الكلور المتبقي في الحالة البدائية (أي في اللحظة الزمنية $t=0 \text{ hour}$). كذلك فقد افترضنا أن معامل اضمحلال الكلور في جسم الجريان يساوي $k_d=0.875 \text{ day}^{-1}$ ومعامل اضمحلال الكلور العائد لجدران الأنابيب $k_{11}=1.0 \text{ m/day}$. وهذه القيم الافتراضية معقولة وفق ما أشار إليه العديد من الباحثين (Rossman et al 1994, Vasconcelos et al 1997). يبين الشكل (٦) تغيرات تركيز الكلور المتبقي في الشبكة عند العقتين 258 و 301 على امتداد مدة التحليل البالغة ثلاثة أيام.



الشكل رقم ٥.

يلاحظ من الشكل (٦) أنه نتيجة للجريان في أنابيب الشبكة ينتقل الكلور من الخزان حيث يبلغ تركيزه 0.6 mg/liter ليصل إلى العقدة 301 في اللحظة الزمنية (t=4 hours). يرتفع بعد ذلك تركيز الكلور المتبقي عند هذه العقدة ليبلغ قيمة عظمى مقدارها 0.48 mg/liter عند الساعة 8 hours (وذلك بسبب اضمحلال جزء من الكلور نتيجة للتفاعلات التي تمت على الطريق في جسم الجريان ومع جدران الأنابيب)، ثم ينخفض إلى قيمة صغرى مقدارها 0.32 mg/liter عند الساعة 27 hours. تتأرجح بعد ذلك قيم تركيز الكلور عند العقدة 301 ما بين هاتين القيمتين العظمى والصغرى.

يلاحظ كذلك من الشكل (٦) أن قيم تركيز الكلور المتبقي عند العقدة 258 تتراوح ما بين قيمة عظمى مقدارها 0.24 mg/liter، وقيمة صغرى مقدارها 0.09 mg/liter. وهذه القيم أقل من القيم الموافقة للعقدة 301 بسبب بعد العقدة 258 عن الخزان.

الجدول رقم ٣.

الجدول رقم ٢.

نمذجة انتشار العناصر غير المحافظة في شبكات توزيع مياه الشرب

الأبوب	الطول (م)	القطر (مم)	الخشونة
1	670	600	125
2	740	600	125
3	760	600	125
4	530	500	125
5	200	500	125
6	370	600	125
7	470	600	125
8	400	600	125
9	770	600	125
10	320	600	125
11	970	500	125
12	320	300	125
13	160	250	125
14	310	250	125
15	285	250	125
16	680	500	125
18	350	250	125
19	500	250	125
20	470	250	125
21	915	200	125
22	560	200	125
23	650	200	125
24	300	250	125
26	395	250	125
27	710	250	125
29	300	250	125
30	810	200	125
31	440	250	125
32	500	250	125
33	580	200	125
35	375	150	125
36	520	500	125
37	400	400	125
38	570	200	125
39	420	200	125
40	310	150	125
41	180	200	125
42	90	200	125
43	400	600	125
49	725	600	125
50	710	600	125
51	233	600	125
52	242	600	125
53	300	250	125

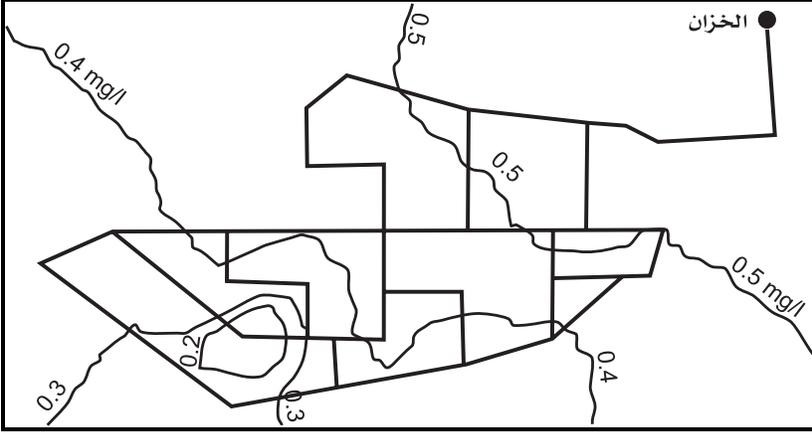
رقم الخطوة	المستوى متر	الاستهلاك ليتر/ثانية
250	738	6.99
251	733	24.16
252	715	23.58
253	725	31.51
254	735	14.83
255	735	14.83
256	735	8.74
257	723	7.08
258	715	5
259	714	8.17
260	710	17.12
261	706	10.67
262	710	9.34
263	714	11.62
264	730	16.36
265	714	17.77
266	720	43.7
270	712	13.82
271	720	22.1
272	719	9.62
273	721	19.39
274	725	15.98
275	728	12.58
276	732	12.61
301	748	
5	735	
6	740	
7	745	
8	729	
11	723	
12	723	
14	720	
15	715	
17	715	
100	783.25	



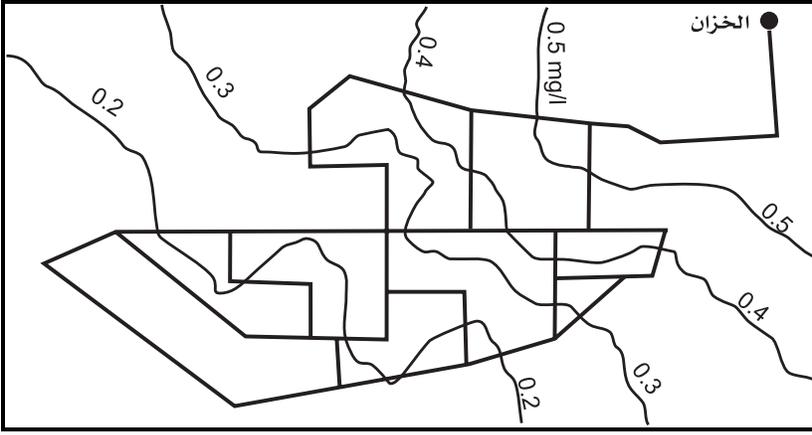
الشكل رقم ٦.

تجدر الإشارة هنا إلى أن قيم التركيز العظمى للكلور المتبقي عند العقدتين تحدث في ساعات الذروة حيث يكون الحمل المطبق على الشبكة (أي الاستهلاك) أعظمية، ومن ثمَّ ينتشر الكلور بسرعة أكبر موفراً بذلك زمناً أقل لحدوث التفاعل. في حين أن القيم الصغرى تحدث في ساعات الاستهلاك الدنيا حيث تجري المياه بسرعاتٍ ضئيلة نسبياً موفرةً بذلك زمناً أكبر لحدوث التفاعل. ويمكن استنتاج ذلك بوضوح من الشكلين (٧) و(٨) اللذين يعرضان خطوط تساوي تركيز الكلور في الشبكة في أوقات الاستهلاك العظمى والصغرى.

يستنتج من التحليل السابق أنه من وجهة نظر التحليل الهيدروليكي لا تتحقق متطلبات الضغط في الشبكة دوماً، حيث تنخفض قيم الضغط في المناطق المرتفعة من الشبكة (كالعقدة 301) في فترة استهلاك الذروة إلى ما دون القيم المسموح بها بكثير، الشكل (٥). أما من وجهة نظر التحليل النوعي، وعلى الرغم من أن تركيز الكلور المتبقي لا يقل في أوقات الاستهلاك العظمى عن القيمة الدنيا المسموح بها (0.2mg/liter) (باستثناء منطقة صغيرة من الشبكة تقع بالقرب من العقدة ١٢، الشكل ٧)، فإن مناطق كبيرة من الشبكة تصلها في أوقات الاستهلاك الصغرى مياه يقل تركيز الكلور فيها عن 0.2mg/liter، الشكل (٨).



الشكل رقم ٧. خطوط تساوي تركيز الكلور في الشبكة في زمن الاستهلاك الأعظمي

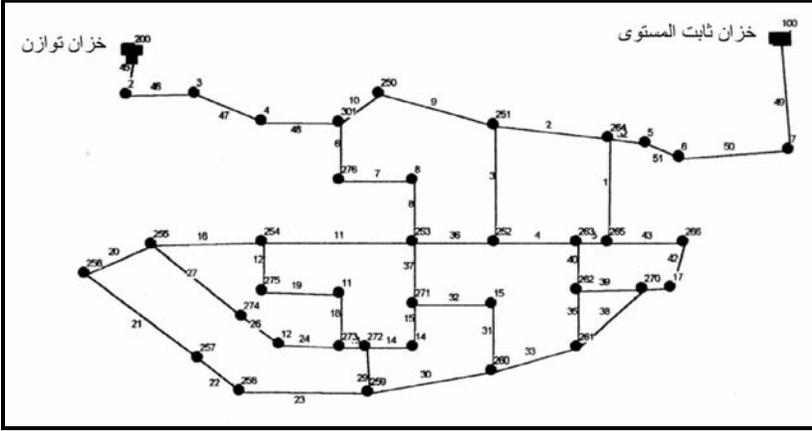


الشكل رقم ٨. خطوط تساوي تركيز الكلور في الشبكة في زمن الاستهلاك الأصغري

٩- أثر استخدام خزان توازن في نوعية المياه:

بغية تحسين شروط الضغط في الشبكة، يلجأ عادة إلى استخدام خزان توازن متغير المنسوب Tank. يقوم هذا الخزان بإمداد الشبكة بالمياه في أوقات استهلاك الذروة، في حين أنه يملأ الخزان بالمياه من المصدر المائي ذاته وعبر الشبكة في أوقات الاستهلاك الدنيا. ومن المفيد جدا عند اختيار خزان ما دراسة أثر

الخران ليس فقط في الظروف الهيدروليكية في الشبكة، وإنما أيضاً في الظروف النوعية. استخدم خزان توازن دائري المقطع يتصل بالشبكة عند العقدة 301، الشكل (٩). يبلغ منسوب قاعدة الخزان 773 m عن سطح البحر، وارتفاع الماء البدائي فيه 2 m، وارتفاع الماء الأعظمي 4 m، وارتفاع الماء الأصغري 0.5 m. وقد جرت محاكاة الشبكة ضمن الظروف الهيدروليكية والنوعية السابقة نفسها ولمدة ٧٢ ساعة أيضاً.



الشكل رقم ٩.

بلاحظ من الشكل (١٠) الذي يظهر تغيرات الضغط عند العقدتين 258 و 301 أن وجود خزان التوازن قد أدى إلى ارتفاع قيمة الضغط عند العقدة 301 بسبب مشاركة الخزان في تغذية الشبكة في أوقات الذروة، غير أن ذلك كان على حساب نوعية المياه في المنطقة المجاورة للخزان من الشبكة، حيث يلاحظ من الشكل (١١) الذي يظهر تغيرات تركيز الكلور عند العقدتين 258 و 301 بدلالة الزمن، أن تركيز الكلور عند العقدة 301 قد انخفض إلى قيمة صغرى مقدارها 0.17 mg/liter في ساعات الذروة وهي أقل من الحد الأدنى المسموح به، على عكس ما كان عليه الحال قبل استخدام الخزان، الشكل (٦). ويعود سبب انخفاض تركيز الكلور في المنطقة المجاورة للخزان إلى أن عمر المياه في الخزان يزداد في أثناء عملية امتلاء الخزان حيث تمتزج المياه الداخلة إليه عبر الشبكة مع المياه التي كانت موجودة أصلاً في الخزان (الحجم الاحتياطي) ذات العمر المرتفع. وفي ساعات الذروة، عندما يساعد الخزان في تغذية المناطق المجاورة له من الشبكة، يكون عمر المياه الخارجة منه مرتفعاً نسبياً وتحتوي على نسبة أقل من الكلور مما يؤثر في نوعية المياه في هذه المناطق.

ويمكن ملاحظة ذلك أيضاً من الشكل (١٢) الذي يظهر تغير عمر المياه بدلالة الزمن عند العقدة 301 (التي يتصل عندها خزان التوازن بالشبكة) قبل إضافة الخزان وبعده، حيث يلاحظ بوضوح ارتفاع كبير في عمر المياه عند العقدة في أوقات الذروة نتيجة إضافة خزان التوازن على عكس ما كان عليه الحال قبل إضافة الخزان. يلاحظ كذلك من مقارنة الشكل (١٣) الذي يظهر خطوط تساوي تركيز الكلور في الشبكة في زمن الاستهلاك الأعظمي مع الشكل (٧)، تأثر المنطقة المجاورة للخزان بنوعية المياه فيه مقارنة بما

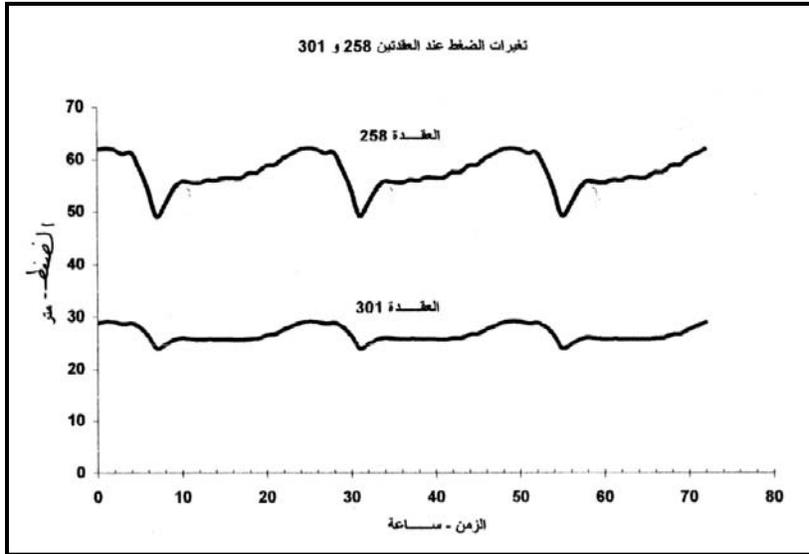
كانت عليه الحال قبل استخدام الخزان.

١٠- الحلول الممكنة:

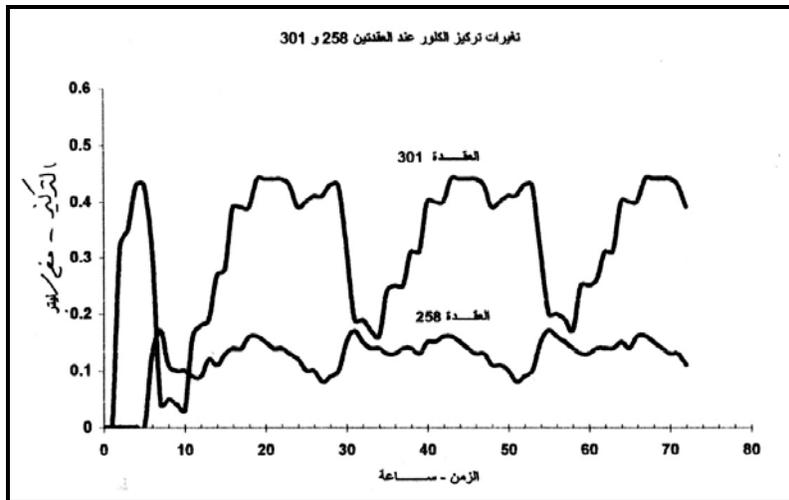
يلاحظ من الأشكال (١٠) إلى (١٣) أن تحقيق المتطلبات الهيدروليكية في الشبكة قد يتناقض مع تحقيق المتطلبات المتعلقة بنوعية المياه.

يمكن من حيث المبدأ زيادة تركيز جرعة الكلور المحقونة في المياه الداخلة إلى الشبكة من المصدر المائي (أي الخزان الثابت منسوب الماء) بحيث تصبح 1.0 mg/liter (عوضاً عن 0.6 mg liter) مما يؤدي إلى رفع قيمة تركيز الكلور المتبقي في جميع أرجاء الشبكة إلى ما فوق الحد الأدنى المطلوب، إلا أن ذلك سيؤدي أيضاً إلى ارتفاع نسبة تركيز الكلور المتبقي في مناطق الشبكة القريبة من الخزان إلى مناسيب عالية جداً؛ مما يجعل للمياه طعماً ورائحة غير مستساغين وقد يشكل خطراً على صحة المستهلكين. لذا تسعى مؤسسات المياه عادة إلى توفير نسبة من الكلور المتبقي في الشبكة تتراوح ما بين 0.2 mg/liter و 0.5 mg/liter .

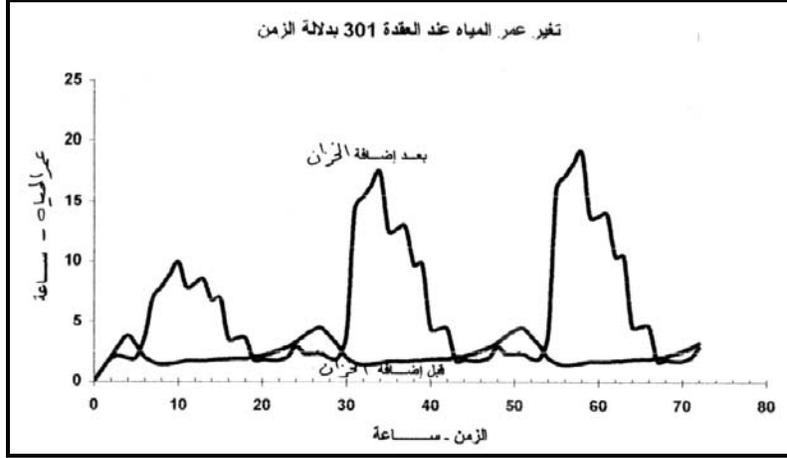
يمكن تحقيق نسب الكلور المتبقي المطلوبة في الشبكة المدروسة عن طريق استخدام محطات كلورة إضافية Booster Chlorination في خزان التوازن وفي مناطق الشبكة النائية. يبين الشكل (١٤) خطوط تساوي تركيز الكلور في الشبكة في أوقات الذروة وذلك في حال استخدام محطة حقن كلور في خزان التوازن بتركيز 0.3 mg/liter ، وعند العقد 12 و 256 و 257 و 259 بتركيز 0.4 mg/liter . يلاحظ بوضوح من الشكل (١٤) أن استخدام محطات الكلورة الإضافية قد أدى إلى رفع تركيز الكلور في جميع أرجاء الشبكة إلى ما فوق القيمة الصغرى المطلوبة واللازمة لتوفير شروط التعقيم.



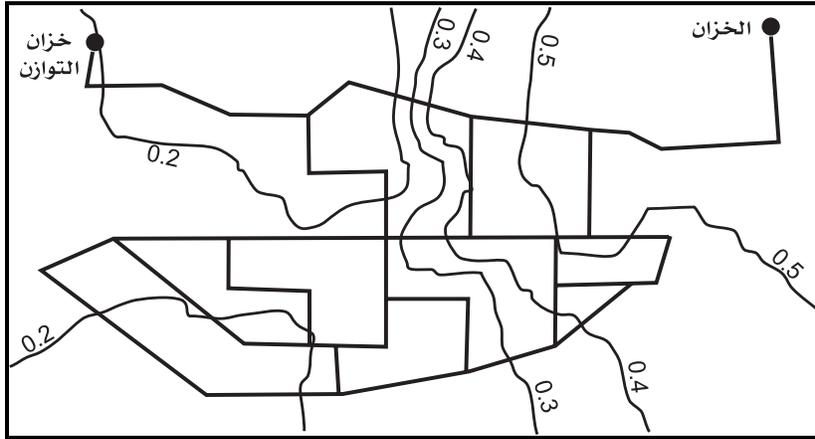
الشكل رقم ١٠.



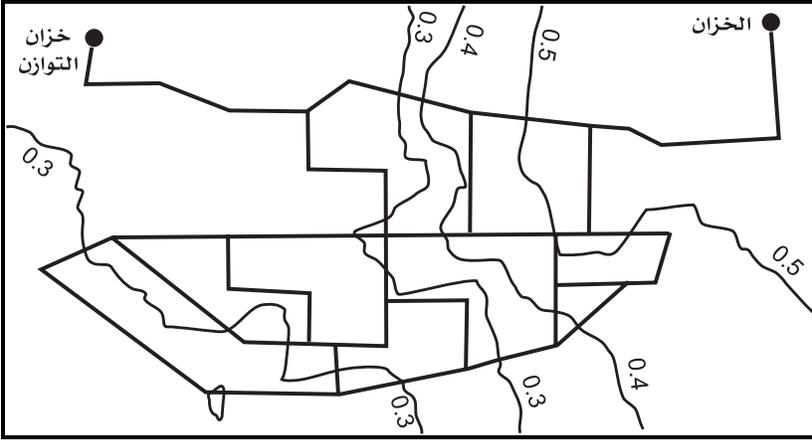
الشكل رقم ١١.



الشكل رقم ١٢.



الشكل رقم ١٣. خطوط تساوي تركيز الكلور في الشبكة في زمن الاستهلاك الأعظمي



الشكل رقم ١٤. خطوط تساوي تركيز الكلور في الشبكة بعد استخدام محطات كلورة إضافية

١١ - الخلاصة والنتائج:

قمنا بتطوير نموذج رياضي ديناميكي هيدروليكي نوعي قادر على محاكاة انتشار العناصر المنحلة في شبكات أنابيب مياه الشرب ضمن ظروف جريان متغيرة مع الزمن. يعتمد النموذج المستنبط على حل معادلة الجريان غير المستقر في الأنابيب وذلك لحساب ظروف الجريان المتغيرة بدلالة الزمن في الشبكة. وعلى عكس نماذج نوعية المياه المستقرة أو الشبه ديناميكية، يستطيع النموذج المستنبط محاكاة ظروف الجريان الديناميكية في الشبكة بشكل أدق، حيث وضعت عطالة السائل الجاري في أنابيب الشبكة في الحساب ضمن المعادلات الرياضية.

ينطلق الحل الديناميكي دوماً من حساب الحالة المستقرة للجريان في الشبكة لتحديد الشروط البدائية للجريان. يتم بعد ذلك حل المعادلات الديناميكية لمسارات الشبكة مع معادلات الاستمرار عند جميع عقد تفرع الشبكة في كل خطوة زمنية من خطوات التحليل الديناميكي وذلك لتحديد ظروف الجريان المتغيرة مع الزمن في الشبكة.

يعتمد حساب انتقال عناصر الجريان في النموذج المستنبط على حل معادلة الانتقال أحادية البعد في الأنابيب مع مراعاة الشروط الحدية المفروضة عند العقد وعند الخزانات.

وقد استخدم النموذج الرياضي في دراسة انتشار وتحول الكلور في شبكة أنابيب مقبسة من أطراف مدينة دمشق. ويستخدم الكلور بشكل واسع في عمليات تعقيم مياه الشرب في شبكات الأنابيب، حيث تلجأ مؤسسات المياه إلى المحافظة على مناسيب مناسبة من الكلور المتبقي في مياه الشبكة لمنع أي نمو جرثومي ولضمان إيصال مياه عالية الجودة إلى المستهلكين. وقد تم وصف تحولات الكلور في شبكة المياه كمجموعة مركبة من تفاعلين، الأول في جسم الجريان، والثاني عند جدران الأنابيب، وذلك وفق الطريقة التي اقترحها روسمان وشركاؤه.

وقد تبين أنه يمكن استخدام النموذج الرياضي في التعرف على مناطق الشبكة التي ينخفض فيها تركيز الكلور المتبقي عن 0.2 mg/liter وهو الحد الأدنى المسموح به وفقاً لمعايير مياه الشرب السورية، ومن ثمّ يمكن تحديد مواقع الشبكة التي تحتاج إلى محطات كلورة Booster Chlorination إضافية.

يجب، عند إضافة خزانات توازن للشبكة بغية تحسين أدائها في أوقات الاستهلاك العظمى، دراسة أثر هذا الخزانات في نوعية المياه في الشبكة، حيث تبين أن الاعتبارات الهيدروليكية في الشبكة (من ضغط وغزارة) قد تتضارب مع الاعتبارات النوعية مما قد يستدعي استخدام محطات كلورة إضافية في هذه الخزانات.

إن نمذجة نوعية المياه في شبكات التوزيع لا توفر فهماً أفضل لخصائص نظام التوزيع فحسب، وإنما يمكن أن تساعد في تطوير خطط وإجراءات لمراقبة نوعية المياه وتحسينها؛ كاقتراح مواضع مناسبة في الشبكة لمحطات إعادة الكلورة، ووضع برامج غسل الشبكة، واقتراح أماكن أخذ عينات المياه من الشبكة، وتحديد خصائص المياه الممزوجة من مصادر مختلفة النوعية، وغيرها من الإجراءات.

المراجع

- 1- Bhave, P.R., (1991), Analysis of Flow in Water Distribution Networks, Technomic Publishing Company, Inc., 1991
- 2- Clark, R. M., and Males, R. M., (1985), 'Simulating Cost and Quality in Water Distribution', Journal of Water Resources, Planning and Management, ASCE, Vol 111(4), 454-466.
- 3- Clark, R. M., Grayman, W. M., Males, R. M., and Coyle J. A. (1988), 'Modeling Contaminant Propagation in Drinking-Water Distribution Systems', Aqua No. 3, pp 137 to 151.
- 4- Clark, R. M. , Grayman, W. M., and Males, R. M., (1988), 'Contaminant Propagation in Distribution Systems', Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol 114(4), 929- 943
- 5- Clark, R. M., Grayman W. M, Goodrich J. A., Deninger R. A., and Hess, A. F. (1991), 'Field-Testing Distribution Water Quality Models, Journal of American Water Works Association, July (1991), 67- 75.
- 6- Clark, R. M., Grayman, W. M., Males, R. M., and Hess, A. F. (1993), 'Modeling Contaminant Propagation in Drinking-Water Distribution Systems', Journal of Environmental Engineering, ASCE, 119(2), 349-364
- 7- Clark, R. M. , Goodrich J. A., and Wymer, L. J. (1993), 'Effect of The Distribution System on Drinking-Water Quality ', Journal of Water SRT-Aqua, Vol 42, No. 1, pp 30-38, 1993.
- 8- Clark, R. M., Grayman W. M, Goodrich J. A., Deninger R. A., and Skov, K. (1994), 'Measuring and Modelling Chlorine Propagation in Water Distribution Systems', Journal of Water Resources, Planning and Management, ASCE, 120(6), 871-887.
- 9- Clark, R. M. , Smalley, G., Goodrich J. A., Tull, R., Rossman, L. A., Vasconcelos, J. J., and Boulos, P. F. (1994), 'Managing Water Quality in Distribution Systems : Simulating TTHM and Chlorine residual propagation ', Journal of Water SRT-Aqua, Vol 43, No. 4, pp182-191, 1994.
- 10- Clark, R. M. ,Lykins, B.W., Block, J. C., Wymer, L. J., and Reasoner, D. J. (1994), 'Managing Water Quality in Distribution Systems : Simulating TTHM and Chlorine residual propagation ', Journal of Water SRT-Aqua, Vol 43, No.6, pp 263-277, 1994.

- 11- Clark, R. M. , (1994), 'Modeling Water Quality Changes and Contaminant Propagation in Drinking-Water Distribution Systems : a US Perspective ' , Journal of Water SRT-Aqua, Vol 43, No.3, pp 133-143, 1994.
- 12- Grayman, W. M., Clark, R. M and Males, R. M.,(1988), 'Modeling Distribution Systems Water Quality : Dynamic Approach', Journal of Water Resources, Planning and Management, ASCE, 114(3), 295-312.
- 13- Grayman, W. M., and Clark, R. M., (1990), 'An Overview of Water Quality Modeling in a Distribution System', Proceeding of American Water Works Association Annual Conference, Cincinnati, Ohio, 1990.
- 14- Grayman, W. M., and Clark, R. M., (1991), 'Water Quality Modeling in a Distribution System', Symposium on Dynamics of Water Quality in Distribution Systems, American Water Works Association Annual Conference, Philadelphia Pa, 1991..
- 15- Islam, M. R., and Chaudhry, M. H., (1998) , 'Modeling of Constituent Transport in Unsteady Flows in Pipe Networks', Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 124(11), 1105-1124.
- 16- Jeppson, R.W. (1977), Analysis of Flow in Pipe Networks, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, 1977.
- 17- Liou, C. P., and Kroon J. R. (1987), 'Modeling the Propagation of Waterborne Substances in Distribution Networks', Journal of American Water works Association. November 1987, 54-58.
- 18- Males, R. M., Grayman, W. M., and Clark, R. M., (1988), 'Modeling Water Quality in Distribution Systems', Journal of Water Resources, Planning and Management, ASCE, 114(2), 197-209
- 19- Males, R. M., Clark, R. M., Wehrman, P. J., and Gates W. E. (1985), 'Algorithms for Mixing Problems in Water Systems' Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 112(2), 206- 219.
- 20- Mualla, W. (1999), 'Water Quality Modeling in Distribution Systems', Research report conducted at Strathclyde University, Glasgow, UK.
- 21- Mualla, W. (2000), 'Water Quality Modeling in Unsteady Flow in Pipe Networks', 40th Science Week, Latakia, Syria.
- 22- Rossman, L. A. (2000), 'EPANET2 User Manual, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, USEPA.
- 23- Rossman, L. A. (1994), 'EPANET User Manual, Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, USEPA.
- 24- Rossman, L. A., Clark, R. M., and Grayman, W. M.,. (1994) 'Modeling

- Chlorine Residuals In Drinking-Water Distribution Systems', Journal of Environmental Engineering, ASCE, 120(4), 803-820.
- 25- Vasconcelos, J.J, Rossman, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F. and Clark, R. M., (1997) 'Kinetics of Chlorine Decay', Journal of American Water works Association. July 1997, 54-65.
- 26- Vasconcelos, J.J, and Boulos, P. F., (1996) 'Kinetic models of Chlorine Decay in Drinking Water Distribution Systems', Computer Methods and Water Resources III, Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., 1996.
- 27- Vasconcelos, J.J, Grayman, W. M., Rossman, L. A., Clark, R. M., Boulos, P. F., Goodrich, J. A. and Clapp, J. W. (1994) 'Characterizing And Modeling Chlorine Decay in Distribution Systems', Proceeding of the American Water works Association Annual Conference on Water Research, New York, June 19-23, 1994.
- 28- Walski, T, Chase, D.V. & Savic, D.A. (2000), Water Distribution Modeling, Haestad Press, Waterbury CT, USA,
- 29- Wood, D. J., and Charles, C.O.A., (1972), 'Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory', Journal of Hydraulic Division, ASCE. 98(HY7), 1157-1170.
- 30- Wood, D. J., Funk, J. E. and Boulos, P. F. (1989) 'Pipe Networks Transients- Distributed and Lumped Parameter Modeling', Proceeding of the 6th International Conference on Pressure Surges, B.H.R.A., Cambridge, England, 1989, 131-142.
- ٣١- عبد المالك، علي (١٩٩٦)، "نمذجة نوعية المياه في شبكات الأنابيب"، أطروحة ماجستير أعدت في كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، بإشراف الدكتور وائل معلا.
- ٣٢- معلا، وائل (١٩٩٢)، الجريان غير المستقر في الأنابيب، منشورات جامعة دمشق.
- ٣٣- معلا، وائل (١٩٩٠)، "دراسة عن الطرق المستخدمة في حساب شبكات الأنابيب بمعونة الحاسب"، مجلة جامعة دمشق، المجلد ٦، العدد ٢١.

Modelling the Propagation of Non Conservative Substances in Distribution Systems

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: ٢٤/٧/٢٠٠١.

Wael Mualla
Department of Water Engineering
Faculty of Civil Engineering
Damascus University

Abstract

Drinking water although acceptable in quality when it leaves the treatment plant or the supply source, it may undergo changes in quality during the distribution phase before it reaches the consumer. Changes in quality may be caused by chemical or biological transformation, by a loss of system integrity, or by blending of water from different sources.

Optimum management of Urban Water Distribution Systems require the use of advanced mathematical models to simulate the network performance under normal and emergency working conditions. These models should not merely be able to predict the network hydraulic variables such as pressures at nodes & flows in pipes, at a particular instant of time and under a specific load. They should also be able to simulate all hydraulic and water quality parameters in the network throughout a period of time that may reach several days taking into consideration demand variation in this period and all operational changes that may take place such as the introduction of new water sources, closure of valves, etc.

An unsteady flow water quality model that simulate hydraulic and water quality parameters in distribution systems has already been developed by the author and reported in a previous work (Mualla, W., 1999, 2000). This current work includes a further development of the model so that it may be able to simulate the propagation of non conservative substances (such as chlorine) in distribution systems. The work also includes application of the model on a typical network to study and illustrate the parameters that may contribute to chlorine decay in the system.