

Introduction

In the last decades attention towards human health and the rise of life quality standards have lead to a higher interest in the quality of water flowing within pressurized flow systems, such as Water Supply Systems (*WSSs*) and urban Water Distribution Systems (*WDSs*). Indeed, it is even more necessary to guarantee high quality levels for drinkable water during the ordinary operation of the system, trying to avoid, for example, the formation of harmful elements such as disinfection by-products (*DBPs*). Another important issue is the intentional contamination, through the introduction of biological, chemical or radio-active contaminants, whose effects could have a strong repercussion on both public health and safety feeling. As a consequence, to adequately simulate contamination phenomena and individuate alternative intervention policies, such as optimum sites for chlorination booster stations (very important, in ordinary conditions, to decrease *DBPs*) and monitoring early warning stations (very important to deal with emergency conditions rising from intentional contamination), it is necessary to use appropriate analysis tools and therefore produce specific mathematical models in order to analyze space and time variability of the parameters that characterize the quality of water flowing within both *WDSs* and *WSSs*.

One of the most complete models quoted in literature for the analysis of changes of water quality characteristics along *WDSs*, is undeniably the one proposed by Rossman et al. [10], which allows to evaluate the variability of chlorine concentration in the water distribution systems. The model uses a Lagrangian approach and is based on the subdivision of the water volume contained in each pipe into a given number of segments (elementary cells), which have the same velocity inside the pipe as that of the flow and behave like completely stirred tanks. Because of its characteristics, last version of this model, denominated *EPANET 2* [10], is considered, at present, the world standard, even though it presents some problems, hereafter described. Starting from these considerations, the aim of this paper is to propose a new mathematical problem, denominated *QualSim_PFN* (*Quality Simulation in Pressurized Flow Networks*), which is able to overcome *EPANET*'s lacks. As a consequence, in this paper it will first described the *EPANET* model, then the approach used in the *QualSim_PFN* model and, finally, it will be synthesized the results of a few runs carried out in order to compare their features and performances. In particular, the contaminants

moving within *WDSs* are usually characterized by very low concentrations and small particle size. As a consequence, they can be considered completely dissolved in the water and, thus, unable to change the flow characteristics (such as velocity and pressure fields). For these reasons, the analysis of time and space changes of quality parameters of water flowing within *WDSs* is usually carried out in two steps. In the first step, using appropriate hydraulic simulator (*hydraulic module*), the main characteristics of flow (flow velocities in the pipes, pressure heads at nodes, water levels at reservoirs, etc.) are determined (eventually, for each operating conditions if a period of time characterized by different users' demands and/or different working conditions of pumps, valves, pipes, etc., have to be considered). In the second step, starting from the knowledge of hydraulic variables (in particular: i) the mean flow velocities along the *WDSs*' sides; ii) the water volume in the reservoirs; and iii) the discharge delivered at nodes or in-flowing/out-flowing in/from the reservoirs), assigned the boundary conditions concerning the contaminants input at nodes and/or reservoirs and, eventually, the coefficients of reaction kinetics, using appropriate quality changes simulator (*quality module*), the changes in time and space of contaminant(s) concentration(s) are evaluated, together with the mass of contaminant(s) delivered at each node in each time interval and the time spent from a given contaminant input to arrive at various *WDSs*' nodes (*Early Warning Time*). As a consequence, the changes of water quality characteristics within a *WDS* are strictly linked to the functioning of the distribution system itself. For this reason, before deepen into the 'quality' issue, it is important to focus on the *WDS* 'hydraulic'. Generally speaking, the module directed to the analysis of the hydraulic behaviour of the water system should be able to simulate different operating conditions that can occur in the system, such as steady and unsteady flows. In order to determine the flow parameters, assuming as certain the geometrical and hydraulic characteristics of the system, initial water levels in the tanks and reservoirs, and the users' water demand in each time interval in which it is possible to subdivide the whole operation period to examine, it is necessary to solve a set of non linear equations formed by the continuity equations at nodes, the loop equations for each closed circuit existing in the system and roughness formulas for each side. In its turn, the analysis of contaminants propagation should be based on a module directed to the resolutions of a set of continuity equations for contaminant(s),

written as for the *WDSs*' nodes, as for each of the cells in which every side will be subdivided, as for each tank and reservoirs. These conservation mass equations have to consider different aspects: the mass already present and/or introduced into the tanks and reservoirs, the mass of the substances out-flowing at the water consumption nodes, the mass of the substances that are present and pass in the each side of the *WDS* as well the kinetic reactions of chemical components, the decay, volatilization phenomena in the tanks/reservoirs, etc.

The Epanet Model

In order to evaluate the *WDS* hydraulic behaviour and the flow parameters, *EPANET*'s hydraulic module makes use of a node oriented algorithm, which is based on the solution of a set of non-linear equations deriving from the combination of the continuity equations for each node of the system and the roughness formulas related to each side in/out-flowing in/from the node itself. Special treatments are used to consider the cases in which at the node is present a reservoir or a tank not characterized by constant water surface elevation or a pumping system or a valve [11]. The solution of the final set of equations is based on the "gradient method" [12]. For the evaluation of changes, in time and space, of water quality characteristics, *EPANET* solves a set of equations that are based on the mass conservation principle together with kinetic reactions. To avoid the numerical dispersion introduced by numerical approximation of the advective term existing in the continuity equations for the pipes, and to solve much more easily the set of governing equations, the model uses a *Lagrangian approach* which is based on the subdivision of the water volume contained in each pipe into a given number of segments (*elementary cells*), which have the same velocity inside the pipe as that of the flow and behave like completely stirred tanks. However, since only advective transportation is taken into account whereas molecular and eddy diffusion phenomena are neglected, the modeling of the water quality changes could be considered quite accurate just for the cases in which the flow velocities are always sufficiently high.

The QualSim_PFN Model

Like *EPANET*, the *QualSim_PFN* model is essentially based on two modules. The first module evaluates the macroscopic characteristics of the water flows circulating in each pipe of the system. Since its main characteristics are diffusely reported in other papers [2], [3], [4], [5] e [10], it is simply described in the followings. In particular,

the hydraulic module allows the evaluation of: i) the water discharges flowing along the pipes and the mean flow velocities; ii) the piezometric heads at the WDS nodes and in all points of interest located in the network; iii) the water surface elevations in the tanks whose free-surface is variable and any water discharges flowing out from the spillways located in them; and iv) the water discharges out-flowing from the nodes, if emitters such as nozzles, sprinklers or orifices are present at those nodes. The above-mentioned variables can be evaluated both with reference to steady-state conditions and to conditions of timely slow variations ("pseudo-steady conditions", described through sequences of steady state conditions, used to evaluate the hydraulic behaviour of the WDS and the changes in quality parameters in the cases of extended period analysis), and also for unsteady incompressible flow conditions. The hydraulic model used for these evaluations is based on a node-oriented algorithm [9], which can be used for complex networks, meshed and/or branched, characterized by all those devices usually found in a WDS to enable its correct operation and management. In steady-state conditions, the solution is achieved using an approach substantially similar to that used in the EPANET model, but considering, instead of the gradient method proposed by Todini and Pilati [12], an iterative solution similar to that proposed by Lam and Wolla [7], coupled with appropriate algorithm, without node-reordering, for the treatment, by factorization of non-zero elements, of largely sparse matrix [6]. Similarly to the EPANET model, for extended period simulation, the factorization is only carried out once at the start of the analysis.

The second module aims at the identification of the space and time changes of the quality parameters and is based on a set of equations which describe the mass conservation of each of the substances examined. In particular, the quality module is able to evaluate the mass variations due to: i) water mixing; ii) advection; iii) dispersion (due to turbulence); iv) molecular diffusion; v) reactions occurring in the mixing with other substances dissolved in the water or present on the inner pipe walls (incrustations, biofilms, etc.); vi) volatilization phenomena developing inside the tanks/reservoirs; vii) self-decay, viii) Trihalomethanes formation because of the reactions between the organic substances always present in the water and the chlorine used for the disinfection [1] e [8].

In particular, the *QualSim_PFN* quality module consists of a set of mass conservation equations able to explain the changes of the substances present:

i) in the water contained in the tanks existing in the system

$$C_{t|V} = \frac{V_t C_{t-\Delta t|V} + \Delta t \sum_{n=1}^{N_j} Q_{n,j} C_{s=L} + \Delta t M_j - \Delta t K_v C_{t-\Delta t|V}}{V_t + \Delta t \sum_{z=1}^{N_j} Q_{j,z} + \Delta t Q_{wd}} \quad (1)$$

ii) in the water flowing through the nodes

$$C_j = \frac{\sum_{n=1}^{N_j} Q_{n,j} C_{n,j} + M_j}{\sum_{z=1}^{N_j} Q_{j,z} + Q_j} \quad (2)$$

iii) in each pipe of the network

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial s} + D \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} - KC \quad (3)$$

In these equations, the meaning of the symbols is the following: C = contaminant concentration at time t and abscissa s ; $C_{n,j}$ = contaminant concentration at the last cross-section of the pipe connecting the nodes n and j ; U = mean flow velocity; D = dispersion coefficient (which comprises also molecular and turbulent diffusion); K_v = contaminant decay constant in the tanks, related to bulk reaction phenomena, such as volatilization and reaction with other substances contained in the water; K = contaminant decay constant in the pipes, related to both bulk and wall reactions; M_j and M_v = mass rate of contaminant directly introduced into node j and the tank V ; Δt = time step used for the calculation of changes in water quality characteristics; V_v = mean water volume in the tank V during Δt ;

$C_{t|V}$ $C_{t-\Delta t|V}$ = contaminant concentration in the tank at t and $t-\Delta t$;

$C_{t-\Delta t|s=L}$ = contaminant concentration in the last node of the pipe whose flow enters the tank. In the applications hereafter described, only conservative substance was considered. The formation of trihalomethane was not considered, and the parameters D and K were constantly set equal to zero. In the third case-study, also the constant K_v was set equal to zero, since in that case the water distribution network are not supplied by reservoirs.

To avoid the introduction of numerical errors because of the discretization of the advective term present in the mass conservation equations concerning each side of the WDS, the quality module uses a Lagrangian approach apparently similar, though quite different in the way in the which it is applied, to that used in the *EPANET* model. Also in this case, for each of time period for which the working conditions of the WDS could be considered to be constant, water volumes contained in each pipe of the system are firstly subdivided in one or more finite volumes (cells). Then, the cells present in a given side are considered to move with the same velocity as the mean flow velocity in the pipe itself. To understand the approach used in the *QualSim_PFN* model for the evaluation of number of cells in each side of the WDS and the time interval Δt used by the quality module, is it possible to consider, at first, a very simple system, formed by a unique main, which length, mean flow velocity and number of cells are, respectively, L_i , U_i and P_i . If the positions that each cell reaches after a certain number of time intervals Δt have to be determined, it is possible to see that, if at a given time t the k cell was occupying the position s_0 , being s_0 the abscissa of the initial cross section delimiting the cell, after a time interval equal to $r \Delta t$ the cell will be moved of r positions, reaching the abscissa $s_r = s_0 + r \Delta s$. This movement is obviously possible only if the distance between the position that the cell occupy initially and the pipe downstream end is bigger than $r \Delta s$; in the

opposite case, the cell water volume leaves the main before the end of chosen time interval, leading towards the downstream node (N_v). Suppose that it is possible to subdivide the i^{th} side in P_i equal volume cells, which constant length is $\Delta s_i = L_i/P_i$, to be sure that, in each time step Δt , one cell, characterized by the velocity U_i , move at a distance just equal to Δs_i , should be:

$$\Delta t = \frac{\Delta s_i}{U_i} = \frac{L_i/P_i}{U_i} \quad \text{with } i = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

where T are the number of pipes in the WDS. As a consequence, $\forall i$, it should be

$$\Delta t - \frac{L_i/P_i}{U_i} = 0 \quad (5)$$

or

$$1 - \frac{L_i}{\Delta t \cdot P_i \cdot U_i} = 0 \quad (6)$$

Since it is practically impossible to have, contemporarily, just one value of time step Δt which is perfectly satisfying all the relationships (4), the choice of the time step Δt used in the quality module should be based on the following relationship:

$$\forall i, \left| \frac{L_i}{\Delta t \cdot P_i \cdot U_i} - 1 \right| \leq \varepsilon \quad (7)$$

with a sufficiently small ε . It should be observed that, proceeding in this way, it is possible to overcome a few lacks present in the *EPANET* model. In fact, it is always possible detect, by trials, the couple of values Δt e P_i for which, for every WDS' pipe, the (4) is always verified. Obviously, the maximum admissible error on the calculated side length and/or on the discharge flowing in each side can be rendered small to pleasure. However, in order to reduce elaboration times, it is suggested to adopt as value Δt the biggest value among which the condition is satisfied.

Models Application And Comparison

Cases of study considered for the comparisons

In this paragraph, a few examples of application of both the *EPANET* and *QualSim_PFN* models to distribution networks are presented, aiming at displaying their features and performances when they are applied to real world, and errors given by the first model. The examples considered are concerning as simple distribution networks, characterised by the possibility to carry out easy verifications, as a real and more complex WDS: the network in Grumo Nevano (near Naples, Italy), which has already been considered and accurately described in previous papers [2], [3] e [4].

LINKS	LENGTH		DIAMETER		
	[m]	[ft]	[mm]	[in]	[ft]
PI1	500	1640.415	300	0.515	0.683
PI2	675	2214.560	300	0.515	0.683
PI3	585	1919.286	200	0.352	0.456
PI4	755	2477.027	150	0.272	0.342
PI5	1555	5101.691	200	0.352	0.456
PI6	1555	5101.691	150	0.272	0.342
PI7	1555	5101.691	100	0.19	0.228
PI8	585	1919.286	100	0.19	0.228
PI9	755	2477.027	100	0.19	0.228
PI10	1065	3494.084	80	3.15	0.182
PI11	1065	3494.084	150	0.272	0.342
PI12	985	3231.618	100	0.19	0.228
PI13	1470	4822.820	100	0.19	0.228
PI14	585	1919.286	80	3.15	0.182
PI15	3000	9842.490	80	3.15	0.182
PI16	4500	14763.735	80	3.15	0.182
PI17	4000	13123.320	80	3.15	0.182
PI18	1250	4101.038	65	2.56	0.148
PI19	1875	6151.556	80	3.15	0.182
PI20	5085	16683.021	80	3.15	0.182

Tab. 1 - Geometrical characteristics of pipes.

immediately transported, with known concentration, at the upstream end of the pipe PI1. Then, starting from this node, it is transported within the WDS, arriving at various nodes in different times because of the different mean flow velocities and lengths characterizing the pipes. The results of quality simulations were then considered, making reference to the arrival times of the substance at various nodes. Because of the simplicity of the network, starting from the results of hydraulic computations (mean flow velocities in each side during each time step), was also possible to evaluate, very accurately, without using the quality modules inserted in the two models subject to comparison, actual arrival times at various nodes.

Note that, since the time step used for computations carried out by using the quality module of the EPANET could not be changed by the user, whereas the time step automatically selected by the *QualSim_PFN* model depends on the chosen maximum admissible error, the comparison concerning the EPANET model were carried out just in terms of maximum percent error made in the evaluation of the arrival time at nodes, which was equal to -13,02%. Vice versa, though considering, again, the maximum percent error made in the evaluation of the arrival time at nodes, the comparison concerning the *QualSim_PFN* model was carried out making reference to different values (Table 3 and Fig. 2). The percent error that the *QualSim_PFN* model commits when ϵ varies becomes smaller and smaller when ϵ decreases; Vice versa, EPANET's errors are not under any control at all.

Case-Study N.2

In this second example it was considered the same WDS as the case-study n.1 but with a pronounced time variability of users' water demands.

Users' water demand, $Q_{j,ref.}$	
Node	Discharge (m^3/s)
J1	0.000
J2	0.005
J3	0.000
J4	0.007
J5	0.003
J6	0.003
J7	0.012
J8	0.007
J9	0.000
J10	0.003
J11	0.001
J12	0.002
J13	0.004
J14	0.003
J15	0.002
J16	0.006

Tab. 2 - Reference values of users' water demands.

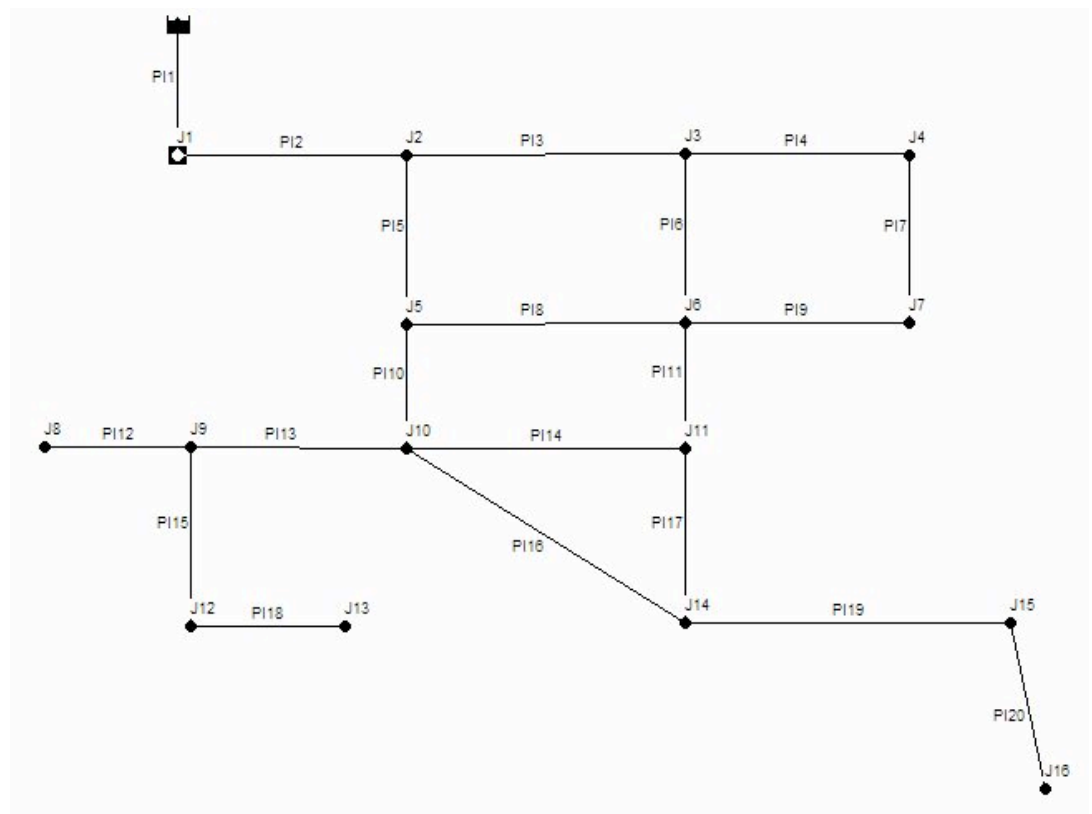
Case-Study N.1

The first example makes reference to a small-size distribution network (the layout is shown in the following Figure), supplied by an unique reservoir, whose fixed water level is $H_{res.} = 750,00$ m a.s.l., and formed by $T = 20$ sides, $M = 4$ closed mesh, $N = 16$ nodes. No control devices either pumping stations are present in the system. The geometrical and hydraulic characteristics of the WDS's sides are given in Table 1. The hydraulic computations were carried out by using the Hazen-Williams formula, with a roughness coefficient $C_{H-W} = 100$.

The discharges $Q_j^k = Q_{j,ref.} \cdot DC_j^k$ requested

from users at node j during the k^{th} time interval were evaluated by assuming, for each node, the reference values $Q_{j,ref.}$ reported in Table 2, and $DC_j^k = 1$.

The duration of the simulation was assumed to be 12 hours, from 6am to 6pm; in particular, 24 time intervals, each 30 minutes long, were considered. At time $t = 0$, a constant mass rate of conservative substance is added to the water in the reservoir. This mass is considered to be completely and instantaneously mixed in the reservoir, and



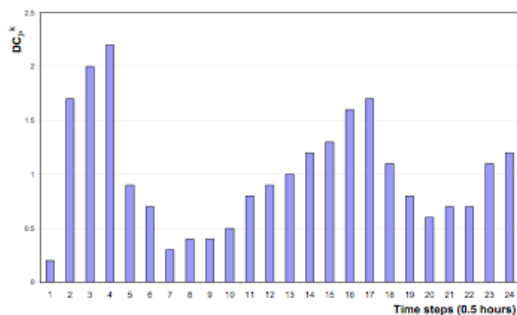


Fig. 1 - Reference values of users' water demands.

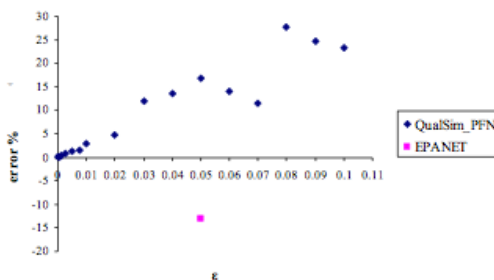


Fig. 2 - Trend of the maximum percent error made in the evaluation of arrival times, considering steady users' water demand.

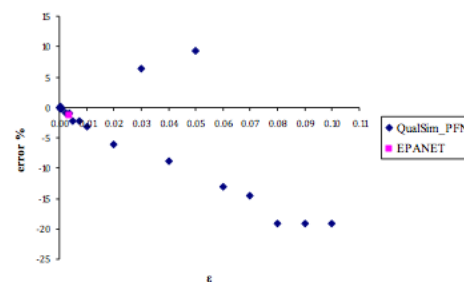


Fig. 3 - Trend of the maximum percent error made in the evaluation of arrival times, considering unsteady users' water demand.

MAX % ERROR	
ϵ	<i>QualSim_PFN</i>
0.1	23.402
0.09	24.736
0.08	27.702
0.07	11.549
0.06	13.972
0.05	16.717
0.04	13.465
0.03	12.019
0.02	4.7199
0.01	2.877
0.0075	1.4261
0.005	1.2003
0.0025	0.8173
0.001	0.2886
0.00065	0.1945
0.0005	0.1792
0.00025	0.1533
0.0001	0.146

Tab. 3 - Maximum errors given by *QualSim_PFN*.

because of the rule used by this model in the choice of the time step, it could not be reduced by users. Vice versa, the error committed by *QualSim_PFN* model changes when ϵ varies, and becomes smaller and smaller when ϵ decreases.

Case-Study N.3

The same procedure above described was applied also to the Grumo Nevano's distribution network (Fig. 4). The inhabitants served by the WDS are 19000. The daily mean discharge requested from users is $Q_{d,m} = 0.0546 \text{ m}^3/\text{s}$, whereas the peak

water demand during a typical day is $Q_p = 0.153 \text{ m}^3/\text{s}$; as a consequence, the global daily peak Demand Coefficient is $DC_p = 2.8$. The WDS is supplied by two feeders, starting from two Clayton-type valves, which guarantee fixed pressure heads ($H_{res.} = 110,00 \text{ m a.s.l.}$) at upstream end of the feeders, next to the derivations of water from main duct. The WDS is formed by $T = 36$ sides, $M = 7$ closed mesh, $N = 30$ nodes. The geometrical and hydraulic characteristics of the WDS's sides are reported elsewhere (Cozzolino et al., 2005; Cozzolino et al., 2006a; Cozzolino et al., 2006b), together with the reference values considered for each node. As a consequence, for sake of brevity, they not will be reported here. Differently from the approach utilised in the aforementioned papers, to allow an easy comparison with the results furnished by the *EPANET* model, in the example considered here, the hydraulic computations were carried out by using, also in the hydraulic module of the *QualSim_PFN* model, the Hazen-Williams formula, with a roughness coefficient $C_{H-W} = 130$. The trend of Demand Coefficients considered, formed by 48 time intervals, each 30 minutes long, is shown in the Fig. 5. In this third example, the maximum percent error given by the *EPANET* model in the evaluation of arrival times at nodes was, respectively, equal to 0.7337% if the input of the substance was at node 1, and equal to 0.0748% if the input of the substance was at node 4. Then, probably because of the complexity of the network and variability of hydraulic conditions, the errors seem to be smaller than the cases previously examined. However, also in this case, by changing the ϵ value chosen for simulation, the error committed by *QualSim_PFN* model could easily be maintained very low, and smaller than that committed by the *EPANET* model.

MAX % ERROR	
ϵ	<i>QualSim_PFN</i>
0.1	-19.080
0.09	-19.080
0.08	-19.080
0.07	-14.456
0.06	-13.112
0.05	9.400
0.04	-8.804
0.03	6.295
0.02	-6.070
0.01	-3.142
0.0075	-2.275
0.005	-2.250
0.0035	-1.046
0.0025	-0.920
0.001	-0.314
0.00075	-0.232
0.0005	-0.170
0.00025	0.125
0.0001	-0.088

Tab. 4 - Maximum errors given by *QualSim_PFN*.

In particular, the discharges $Q_j^k = Q_{j,ref.} \cdot DC_j^k$ requested from users at node j during the k^{th} of the 24 time intervals considered in the simulations were evaluated by assuming, for each node, the reference values $Q_{j,ref.}$ already reported in Table 2, and the trend DC_j^k .

of the demand coefficients shown in Fig. 1, independent from node but variable in time. In this case, the maximum percent error given by the *EPANET* model in the evaluation of arrival times was equal to -1.329%. Furthermore,

Conclusion

A mathematical model was described in order to simulate space and time changes of concentrations of substances inserted and/or present in the water flowing within pressurized water distribution systems: namely, the *QualSim_PFN* model. For its characteristics and abilities, the model described seems to work better than others, such as *EPANET*. From the direct comparison of the results obtained by applying the *QualSim_PFN* and the *EPANET* models at the same data-sets, it was actually possible to see that the second can give, in several circumstances, very relevant percent errors in the evaluation of arrival times of substances (also equal to 13%). These errors seem to be certainly remarkable when the working conditions considered in the simulations are steady, whereas

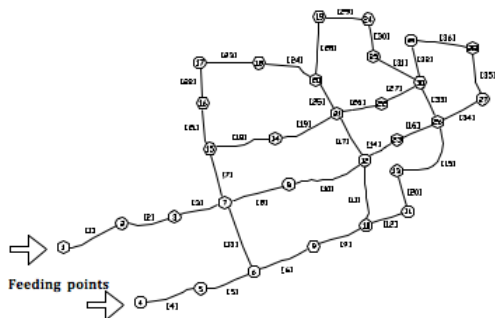


Fig. 4 - Layout of the Grumo Nevano's water distribution network.

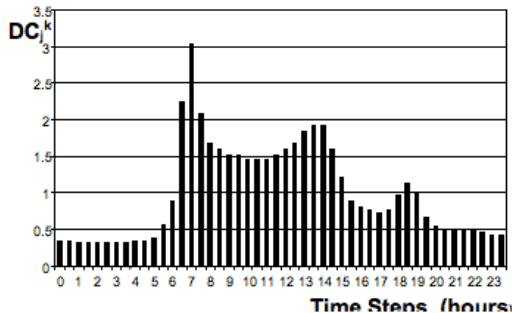


Fig. 5 - Water demand coefficients of the Grumo Nevano's WDS.

QualSim_PFN		EPANET
ϵ	Absolute percent error %	Absolute percent error %
0.05	2.83985	0.7337
0.01	1.39337	
0.005	0.75192	
0.001	0.16505	
0.0005	0.08709	
0.0001	0.02398	

Tab. 5 - Absolute maximum percent error made when the substance was input at node 1.

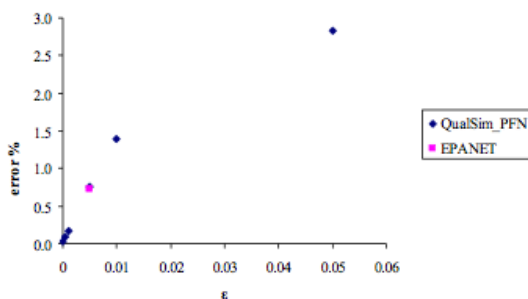


Fig. 6 - Trend of the maximum percent error made in the evaluation of arrival times, considering unsteady users' water demand and contaminant input at node 1.

QualSim_PFN		EPANET
ϵ	Absolute percent error %	Absolute percent error %
0.05	3.1602	0.0748
0.01	1.4477	
0.005	0.7792	
0.001	0.1717	
0.0005	0.0912	
0.0001	0.0261	

Tab. 6 - Absolute maximum percent error made when the substance was input at node 1.

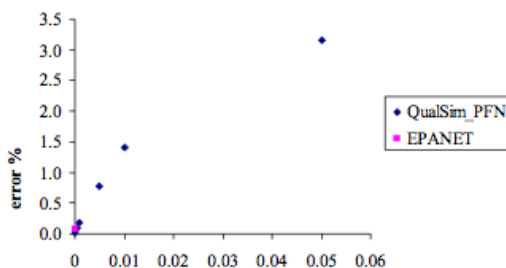


Fig. 7 - Trend of the maximum percent error made in the evaluation of arrival times, considering unsteady users' water demand and contaminant input at node 4.

they seem to decrease when a succession of different steady working conditions, originating different mean flow velocities in each side, are considered. This behaviour is probably due to a mechanism of compensation which is able to smooth the errors, avoiding the accumulation of the errors themselves. Unfortunately, because of the approach considered in the EPANET model for the choice of the time step used in the quality module, it is not possible to reduce this error. Vice versa, in the QualSim_PFN model it is easily possible to control the errors, setting opportunely the ϵ value in the (8). Furthermore, the QualSim_PFN model seems to be more general than others, since it takes into consideration different phenomena, such as chlorine decay, volatilization in the tanks and reservoirs, DBPs formation, turbulent dispersion and molecular diffusion; these last, even though are element considered to be of a secondary importance, could sometimes assume great relevance (for instance, in the cases where the flow velocities are reduced).

Since QualSim_PFN respond to all of this characteristics, it seems to be, at this time, the best tool for this kind of simulations. As a consequence, in order to preserve human health, QualSim_PFN model can be considered as a starting point for the resolution of problems concerning the sites optimization of booster chlorination stations, and the best positioning of early warning stations against intentional attacks.

REFERENCES

- [1] Clark, R.M., & M. Sivaganesan (1998), "Predicting Chlorine Residuals and Formation of TTHMs in Drinking Water", *Journal of Environmental Engineering*, Vol.124, No.12, pp. 1203-1210.
- [2] Cozzolino, L., Pianese, D., & F. Pirozzi (2005), "DBPs control in water distribution systems through optimal chlorine dosage and disinfection stations allocation", *Desalination*, Elsevier B.V., 176 (1-3), pp. 113-125.
- [3] Cozzolino, L., Mucherino, C., Pianese, D., & F. Pirozzi (2006), "Optimal Allocation of monitoring stations aiming at an early detection of intentional contamination of water-supply systems", in *Proceedings of the Eighth International Conference on Computing and Control in the Water Industry, CCWI2005 - Water Management for the 21st Century - Vol. 2*, Edited by D. Savic, et al., University of Exeter, UK, p.251-256.
- [4] Cozzolino, L., Mucherino, C., Pianese, D. & F. Pirozzi (2006), "Positioning, within water distribution networks, of monitoring stations aiming at an early detection of intentional contamination", *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 23, No. 3. (September 2006), Taylor and Francis Ltd, pp. 161-174 (14).
- [5] Cozzolino, L., Della Morte, R., Palumbo, A., & D. Pianese (2011), "Stochastic approaches for sensors placement against intentional contaminations in water

distribution systems", *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 28, No. 1. (march 2011), Taylor and Francis Ltd, pp. 75-98.

[6] Gupta, S.K., & K.K. Tanji (1977), "Computer program for solution of large, sparse, unsymmetric system of linear equations", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 11, pp. 1251-1259.

[7] Lam, C.F., & M.L. Wolla (1972), "Computer Analysis of Water Distribution Systems. Part II - Numerical Solution", *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 98, No. 3, 1972, pp. 447-460.

[8] Musella, C. (2006), "Sulla formazione di trihalometani all'interno delle reti di distribuzione idrica", *Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Civil Engineering*, University of Naples Federico II, 150 p. (in Italian)

[9] Pianese, D., & P. Masini (1994), "Sui Transitori che si Sviluppano nelle Reti Idrauliche in Pressione Munite di Luci di Efflusso Regolabili e di Dispositivi di Attenuazione dei Fenomeni di Moto Vario", in *Proceedings of the Seminar «Moto Vario nei Sistemi Acquedottistici»*, Bari (Italy), 30-31 Maggio, p. 159-183. (in Italian).

[10] Pirozzi, F., Pianese, D. & G. d'Antonio (2002), "Water quality decay modelling in hydraulic pressure systems", *Water Science and Technology: Water Supply*, IWA Publishing company, Vol. 2, No.4, pp. 111-118.

[11] Rossman, L.A. (2000), "EPANET 2 - Users Manual", *National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency*, Cincinnati, OH 45268, USA, EPA/600/R-00/057, September, 200 pp.

[12] Todini, E., & S. Pilati (1987), "A gradient method for the analysis of pipe networks", *Computer Applications for Water Supply and Distributions*, Volume 1 (System Analysis and Simulation), B. Coulbeck and C.H. Orr (Eds.), Research Studies Press, Letchworth, John Wiley & Sons, New York, pp.1-20.

IL PROBLEMA DELLA QUALITA' NEL SISTEMA DI DISTRIBUZIONE DELL'ACQUA

Introduzione

Negli ultimi anni, l'attenzione per la salute dell'uomo e l'aumento delle aspettative di vita hanno condotto ad aumentare l'attenzione per la qualità delle acque che fluiscono nei sistemi in pressione, e, quindi, nelle condotte di adduzione e nelle Reti di Distribuzione Idrica a uso civile. Difatti, è più che mai indispensabile garantire un buon livello qualitativo per le acque potabili durante le ordinarie operazioni del sistema, cercando di scongiurare, per esempio, la formazione di elementi nocivi mediante operazioni di disinfezione. Un altro importante problema è la contaminazione intenzionale, che può avvenire mediante l'introduzione di contaminanti biologici, chimici o radioattivi, i cui effetti potrebbero avere una forte ripercussione sia sulla salute pubblica che sulla percezione di sicurezza da parte della popolazione. Di conseguenza, per simulare in modo adeguato fenomeni di contaminazione e individuare opportune politiche d'intervento, come per esempio l'individuazione di punti ottimali in cui poter posizionare stazioni di clorazione (particolarmente importanti, nelle condizioni ordinarie, per diminuire l'infezione) e stazioni di monitoraggio di allertamento (molto importanti in condizioni di emergenza causate da attacchi intenzionali di contaminazione), è necessario utilizzare strumenti di analisi appropriate e quindi produrre specifici modelli matematici per analizzare nello spazio e nel tempo la variabilità dei parametri che caratterizzano la qualità delle acque che fluiscono nei sistemi di adduzione e nelle reti di distribuzione idrica. Uno dei modelli più importanti presenti in letteratura per le analisi dei cambiamenti delle caratteristiche della qualità dell'acqua nelle reti è, certamente, il modello proposto da Rossman et al., [10] che riesce a valutare come varia la concentrazione di cloro nei sistemi di distribuzione idrica. Il modello, in particolare, utilizza un

approccio lagrangiano e si basa sulla suddivisione del volume di acqua contenuto nei tubi in un dato numero di segmenti (celle elementari), in cui la velocità è costante così come all'interno dei serbatoi. È, però, importante sottolineare che, nonostante l'ultima versione del modello di Rossman et al., denominato EPANET 2 [10], è considerato, oggi, lo standard mondiale, esso presenta alcuni problemi, che verranno di seguito descritti. Partendo da queste considerazioni, lo scopo del paper è di proporre un nuovo modello matematico, denominato QualSim_PFN (Quality Simulation in Pressurised Flow Networks), che è in grado di superare le carenze del modello EPANET. Quindi, nel presente lavoro, sarà prima descritto il modello EPANET, poi l'approccio utilizzato nel modello QualSim_PFN e, infine, saranno sintetizzati i risultati delle simulazioni fatte per confrontare le loro caratteristiche e le loro performance. In particolare, i contaminanti muovendosi all'interno dei sistemi di distribuzione idrica sono solitamente caratterizzati da concentrazioni molto basse e particelle di piccolo dimensioni. Di conseguenza, i contaminanti possono essere considerati completamente disciolti nell'acqua e, quindi, incapaci di cambiare le caratteristiche del flusso (in termini di velocità e pressione). Per questi motivi, l'analisi dei cambiamenti, nel tempo e nello spazio, delle caratteristiche di qualità dell'acqua che fluisce all'interno delle reti Reti di Distribuzione Idrica viene fatta in due step. Prima di tutto, con l'ausilio di opportuni simulatori idraulici (modulo idraulico) vengono calcolate (eventualmente, per diverse condizioni operative se, per un fissato intervallo temporale, vengono considerate differenti caratteristiche di domanda e/o differenti condizioni di lavoro delle pompe, delle valvole, delle tubazioni, etc.). Successivamente, partendo dalla conoscenza delle variabili idrauliche (in particolare: i) le velocità medie del flusso lungo i lati della rete di distribuzione; ii) il volume d'acqua nel serbatoio; iii) la portata distribuita ai nodi o l'acqua che entra o esce dai serbatoi), assegnate le condizioni al contorno riguardo ai contaminanti nei nodi e/o al serbatoio come input e, eventualmente, i coefficienti cinetici, utilizzando uno specifico simulatore per cambiare le condizioni di qualità (modulo qualità), possono essere calcolati i cambiamenti nel tempo e nello spazio della concentrazione(i) del(i) contaminante(i) assieme alla massa del(i) contaminante(i) erogato(i) in ogni nodo per ogni singolo intervallo temporale e il tempo che occorre al contaminante per giungere nei vari nodi della rete di distribuzione (Early Warning Time). Successivamente, i cambiamenti delle caratteristiche di qualità dell'acqua nelle Reti di Distribuzione sono rigorosamente legati al funzionamento del sistema di distribuzione stesso. Per questo motivo, prima di valutare la 'qualità', bisogna focalizzare l'attenzione sulla 'idraulica' del sistema di distribuzione. In generale, il modulo idraulico deve essere in grado di simulare le differenti condizioni operative che possono avvenire nel sistema, sia in condizioni di moto permanente che non permanente. Per calcolare i parametri del flusso, assumendo note le caratteristiche geometriche e idrauliche del sistema, la quota dell'acqua nel serbatoio e la domanda degli utenti in ogni intervallo temporale in cui è possibile suddividere l'intero periodo di osservazione, è necessario risolvere il set di equazioni non lineari formato dalle equazioni di continuità ai nodi, dalle equazioni alle maglie per ogni singolo circuito chiuso presente nel sistema e dalle formule di perdita di carico scritte per ogni singolo lato. Nel calcolo, le analisi della propagazione dei contaminanti devono essere basate su un modulo diretto alla risoluzione di un set di equazioni di continuità per il contaminante(i), scritte per ogni nodo della rete, per ogni cella in cui è stato suddiviso ogni singolo lato e per ogni serbatoio. Queste equazioni di conservazione della massa debbono considerare differenti aspetti: la massa di fluido già presente e/o in ingresso al serbatoio, la massa delle sostanze uscenti dai nodi di distribuzione dell'acqua, la massa delle sostanze che sono presenti e transitano in ogni lato della rete come anche la

cinetica dei component chimici, il decadimento, I fenomeni di volatilità nei serbatoi, etc.

Il modello Epanet

Per valutare il comportamento idraulico delle Reti di Distribuzione Idrica e i parametri del fluido, il modulo idraulico fa uso di un algoritmo con i nodi orientati, che è basato sulla soluzione di un set di equazioni non lineari derivanti dalla combinazione delle equazioni di continuità per ogni nodo del sistema e le equazioni di perdita di carico per ogni lato. Speciali accorgimenti debbono essere utilizzati nel caso in cui nel nodo è presente un serbatoio a livello variabile o un sistema di pompaggio o una valvola [10]. La soluzione del set finale di equazioni è basato sul 'metodo del gradiente' [11]. Per il calcolo dei cambiamenti, nel tempo e nello spazio, delle caratteristiche della qualità dell'acqua, EPANET risolve un set di equazioni che sono basati sul principio della conservazione della massa assieme alle equazioni relative alla cinetica. Inoltre, per evitare la dispersione numerica causata dall'approssimazione dei termini convettivi presenti nelle equazioni di continuità delle tubazioni, e, quindi, risolvere molto più facilmente il sistema di equazioni, il software si basa su un approccio lagrangiano che suddivide il volume d'acqua contenuto all'interno di ogni tubo in un numero finito di elementi (celle elementari), con velocità uguale all'interno di ogni tubo e comportamento del fluido nei serbatoi completamente mescolato. Comunque, poiché è stato considerato il solo trasporto convettivo mentre i fenomeni di diffusione molecolare e vorticosi non sono stati portati in conto, la modellazione dei cambiamenti della qualità dell'acqua può essere considerata abbastanza accurata solo nei casi in cui le velocità del fluido sono sufficientemente elevate.

Il modello QualSim_PFN

Come EPANET, il modello QualSim_PFN è fondamentalmente basato su due moduli. Il primo modulo calcola le caratteristiche macroscopiche del flusso dell'acqua circolante in tutti le tubazione del sistema idrico. Dette caratteristiche sono ampiamente descritte in altri lavori [2], [3], [4] e [9], quindi di seguito si riprendono solo in modo semplificato. In particolare, il modulo idraulico è in grado di calcolare: i) la portata defluente lungo le tubazioni e le relative velocità medie; ii) i carichi piezometrici nei nodi della rete e in tutti gli altri punti di particolare interesse; iii) il livello dell'acqua nei serbatoi e le portate uscenti da essi; e iv) le portate uscenti dai nodi, se degli idranti, irrigatoi o orifizi sono presenti in essi. Le variabili su menzionate possono essere valutate sia in riferimento a condizioni di tipo permanente che in condizioni in cui i tempi di variazione sono molto lenti ('condizioni quasi-stazionarie'), attraverso la sequenza di condizioni di stato permanente, utilizzati per valutare il comportamento idraulico delle Reti di Distribuzione e il cambiamento dei parametri qualitativi nei casi di estesi periodi di analisi, e anche in condizioni di flussi incompressibili non permanenti. Il modello idraulico utilizzato per questi calcoli si basa su un algoritmo in cui i nodi sono univocamente orientate [8], utilizzabile per reti particolarmente complesse, magliate e/o ramificate, caratterizzate da tutti quei dispositivi solitamente presenti nei sistemi idrici per garantirne il buon funzionamento e la gestione ottimale. In condizioni di stato permanente, la soluzione viene trovata utilizzando un approccio praticamente simile a quello che utilizza EPANET, considerando però, invece del metodo del gradiente proposto da Todini e Pilati [11], un metodo iterativo simile a quello proposto da Lam e Wolla [6], accoppiato a uno specifico algoritmo che non ha bisogno di riordinare i nodi, per trattare, mediante la fattorizzazione degli elementi non nulli, matrici particolarmente sparse [5]. Inoltre, come EPANET, per simulazioni del tipo EPS (Extended Period Simulation), la fattorizzazione è fatta solo una volta all'inizio dei calcoli. Il secondo modulo ha come obiettivo il calcolo dei cambiamenti, nello spazio e nel tempo, dei parametri della qualità ed è basato, su un set di equazioni che descrivono la conservazione della massa di ognuna delle

sostanze esaminate. In particolare, il modulo della qualità è in grado di valutare la variazione della massa a causa di: i) miscelazione dell'acqua; ii) convettività; iii) dispersione (a causa della turbolenza); iv) diffusività; v) reazione che avviene nel miscuglio con altre sostanze disciolte nell'acqua o presenti sulle pareti interne dei tubi (incrostazioni, melma, etc.); vi) fenomeni di volatilizzazione che si sviluppano all'interno dei serbatoi; vii) autodecadimento; viii) formazione di triometani a causa della reazione tra sostanze organiche sempre presenti nell'acqua e il cloro utilizzato per la disinfezione [1] e [7].

In particolare, il modulo della qualità del programma QualSim_PFN è formato da un sistema di equazioni di conservazione della massa in grado di portare in conto i cambiamenti delle sostanze presenti:

i) nell'acqua contaminata presente all'interno dei serbatoi

$$C_t|_v = \frac{V_v C_{t-\Delta t}|_v + \Delta t \sum_{n=1}^{N_j} Q_{n,j} C_{t-\Delta t}|_{s=L} + \Delta t M_v - \Delta t K_v C_{t-\Delta t}|_v}{V_v + \Delta t \sum_{z=1}^{N_j} Q_{j,z} + \Delta t Q_{w,d}} \quad (1)$$

attraverso la seguente equazione:
ii) nell'acqua distribuita ai nodi:

$$C_j = \frac{\sum_{n=1}^{N_j} Q_{n,j} C_{n,j} + M_j}{\sum_{z=1}^{N_j} Q_{j,z} + Q_j} \quad (2)$$

iii) in ogni tubazione della rete:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial s} + D \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} - KC \quad (3)$$

In queste equazioni, il significato dei simboli è il seguente: C = concentrazione del contaminante al tempo t nel punto di ascissa s; C_{n,j} = concentrazione del contaminante nell'ultima sezione trasversale del tubo che congiunge il nodo n al nodo j; U = velocità media del flusso; D = coefficiente di dispersione (che comprende anche la diffusività e la turbolenza); K_v = costante di decadimento del contaminante nei serbatoi, relative a fenomeni di reazione di massa, come la volatilizzazione e la reazione di con altre sostanze contenute nell'acqua; K = costante di decadimento del contaminante nelle tubazioni, relativa alle reazioni sia con il fluido che con le pareti del tubo; M_j e M_v = il quantitativo di massa del contaminante direttamente introdotto nel nodo j e nel serbatoio V; Δt = l'intervallo di tempo utilizzato per il calcolo dei cambiamenti delle caratteristiche della qualità dell'acqua; V_v = il volume di acqua medio all'interno del serbatoio V nell'intervallo Δt;

C_{t|_v} C_{t-Δt|_v} = la concentrazione di contaminante nel serbatoio al tempo t e t-Δt;

t-Δt; C_{|_{s=L}} = la concentrazione di contaminante nell'ultimo nodo del tubo il cui flusso entra nel serbatoio. Nelle applicazioni di seguito descritte, è stata considerata solo una sostanza conservativa. Non è stata considerata la formazione di triometani e i parametri D e K sono sempre stati considerati nulli. Nel terzo caso studio, anche la costante K_v è stata considerata uguale a zero, poiché in questo caso, la rete di distribuzione idrica non viene alimentata dai serbatoi.

Per evitare l'introduzione di errori numerici a causa della discretizzazione dei termini convettivi presenti nelle equazioni di conservazione della quantità di massa scritte per ogni lato della rete, il modulo-qualità utilizza un approccio lagrangiano apparentemente simile a quello utilizzato da EPANET, seppur con delle differenze nel modo con cui viene applicato. Anche in questo caso, per

ogni intervallo di tempo e per ogni condizioni di funzionamento della rete in cui può essere considerata costante, i volumi di acqua contenuti in ogni tubazione del sistema sono suddivisi, per prima cosa, in uno o più volumi finiti (celle). Quindi, le celle presenti in un dato lato possono considerarsi muovere con la stessa velocità media con cui si muove il flusso all'interno del tubo stesso. Per meglio comprendere l'approccio utilizzato nel modello QualSim_PFN per calcolare il numero di celle per ogni lato della rete e l'intervallo temporale Δt utilizzato dal modulo-qualità, è possibile considerare, inizialmente, un sistema molto semplice, formato da un unico tubo, la cui lunghezza, velocità media del fluido e il numero di celle sono, rispettivamente, L_i , U_i e P_i . In particolare, dopo un determinato intervallo temporale Δt , la singola cella k , che in un certo istante iniziale t occupa la posizione s_0 , essendo s_0 l'ascissa della sezione trasversale iniziale delimitante la cella, dovrà essersi mossa della quantità r , raggiungendo l'ascissa $s_r = s_0 + r \Delta s$ dopo un intervallo temporale uguale a $r \Delta t$. Questo movimento è assolutamente possibile solo se la distanza tra la posizione che la cellula occupa inizialmente e il tubo a valle è più grande di $r \Delta s$; nel caso contrario, la cella del volume d'acqua lascia il tubo in esame prima della fine dell'intervallo temporale prescelto che porta verso il nodo di valle (N_v).

Supponendo che è possibile suddividere il lato i^{th} in P_i celle di volumi uguali, la cui lunghezza costante è pari a $\Delta s_i = L_i/P_i$, per essere sicuri che, in ogni intervallo temporale Δt , una cella, con velocità U_i , si muove a una distanza proprio uguale a Δs_i , dovrebbe essere:

$$\Delta t = \frac{\Delta s_i}{U_i} = \frac{L_i/P_i}{U_i} \quad \text{with } i = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

dove T è il numero dei tubi nella WDS. Di conseguenza, $\forall i$ deve essere:

$$\Delta t - \frac{L_i/P_i}{U_i} = 0 \quad (5)$$

oppure

$$1 - \frac{L_i}{\Delta t \cdot P_i \cdot U_i} = 0 \quad (6)$$

Poiché è praticamente impossibile avere, contemporaneamente, un intervallo temporale Δt in cui sono perfettamente soddisfatte tutte le equazioni (4), la scelta dell'intervallo temporale Δt utilizzato nel modulo-qualità deve rispettare la seguente relazione:

$$\forall i, \quad \left| \frac{L_i}{\Delta t \cdot P_i \cdot U_i} - 1 \right| \leq \varepsilon \quad (7)$$

con un valore della sufficientemente piccolo. Bisogna notare che, procedendo in questo modo, è possibile superare alcune lacune presenti nel programma EPANET. Infatti, è sempre possibile individuare, per tentativi, la coppia di valori Δt e P_i per cui, per ogni tubazione della rete di distribuzione, la (4) è sempre verificata. Ovviamente, l'errore massimo ammissibile sulla lunghezza del lato calcolato e/o sulle portate defluenti nei lati può essere considerato piccolo a piacere. Comunque, per ridurre i tempi di elaborazione è auspicabile considerare come valore Δt il più grande tra quelli in cui la condizione è soddisfatta.

Applicazioni dei Modelli e Confronti

Casi di studio considerati per i confronti

In questo paragrafo, vengono mostrati alcuni esempi applicativi di entrambi i modelli EPANET e QualSim_PFN, riportando le loro caratteristiche e le loro performance quando essi sono applicati al mondo reale, e gli errori dati dal primo modello. I calcoli sono stati fatti con una semplice rete di distribuzione, e poi su una rete di distribuzione reale e più complessa: la rete di Grumo Nevano (vicino Napoli, Italia), che è già stata considerata e opportunamente descritta in lavori precedent [2], [3] e [4].

Caso studio N.1

Il primo esempio fatto si riferisce a una piccola rete di distribuzione (the layout è mostrato nella seguente Figura), servita da un solo serbatoio, a quota nota pari a $H_{res.} = 750,00$ m a.s.l., e format da $T = 20$ lati, $M = 4$ maglie chiuse, $N = 16$ nodi. Nel sistema non è presente alcun dispositivo ne stazione di pompaggio. Le caratteristiche geometriche della rete sono riportate nella Tabella 1. I calcoli idraulici sono stati fatti utilizzando la formula di Hazen-Williams, con un coefficient di conducibilità idraulica pari a $C_{H-W} = 100$.

Per le portate $Q_j^k = Q_{j,ref} \cdot DC_j^k$ richieste dagli utenti al nodo j durante il k^{th} intervallo temporale sono stati assunti, per ogni nodo, i valori di riferimento

$$Q_{j,ref} \text{ riportati nella Tabella 2, e } DC_j^k = 1.$$

La durata della simulazione è stata assunta pari a 12 ore, dalle 6am alle 6pm; in particolare, sono stati considerati 24 intervalli temporali, ognuno pari a 30 minuti. Al tempo $t = 0$, nel serbatoio viene aggiunta una quantità costante di massa di sostanza conservativa. Questa massa è considerata essere completamente e istantaneamente miscelata nel serbatoio, e immediatamente trasportata, con concentrazione nota, a monte del tubo P11. Quindi, partendo da questo nodo, viene trasportata nella rete, arrivando ai vari nodi in tempi differenti a causa delle differenti velocità medie dei flussi e delle differenti lunghezze dei tubi. I risultati delle simulazioni sono, poi, considerati riferendosi ai tempi di arrivo delle sostanze ai vari nodi.

Per la semplicità della rete, partendo dai risultati dei calcoli idraulici (le velocità medie del fluido in ogni lato durante ogni intervallo temporale), è stato possibile anche calcolare, molto accuratamente, i reali tempi di arrivo a ogni nodo, senza l'ausilio dei moduli-qualità inseriti nei due modelli oggetto di confronto. Da notare che, poiché gli intervalli temporali utilizzati per fare i calcoli con il modulo-qualità di EPANET può non essere cambiato dall'utente, mentre l'intervallo temporale automaticamente selezionato da QualSim_PFN dipende dalla scelta dell'errore massimo ammissibile, il confronto con EPANET è stato fatto solo in termini di massimo errore percentuale fatto sulla valutazione del tempo di arrive nei nodi, che è stato uguale a -13,02%. Vice versa, anche se si considerasse, di nuovo, il massimo errore percentuale fatto nei calcoli del tempo di arrivo ai nodi, il confronto rispetto al modello QualSim_PFN è stato fatto riferendosi a differenti valori di (Tabella 3 e Fig. 2). L'errore percentuale che il modello QualSim_PFN commette quando varia diventa più piccolo quando diminuisce; vice versa, gli errori di EPANET non sono verificabili.

Caso Studio N.2

In questo secondo esempio è stata considerata la stessa Rete del caso precedente, ma con una domanda variabile da parte dell'utenza. In particolare, le portate $Q_j^k = Q_{j,ref} \cdot DC_j^k$ richieste dagli utenti al nodo j durante il k^{th} intervallo temporale dei 24 intervalli considerati nelle simulazioni, sono state calcolate assumendo che, per ogni nodo, i valori di

riferimento $Q_{j,ref}$ (cfr. Tab. 2), e il trend DC_j^k dei coefficienti di domanda mostrati in Fig. 1, fossero indipendenti dal nodo ma variabili nel tempo. In questo caso, utilizzando EPANET per il calcolo dei tempi di arrive, il massimo errore percentuale che si commette è pari a -1.329%. Inoltre, per il modo in cui questo modello sceglie l'intervallo temporale, ciò potrebbe non essere ridotto dagli utenti. Vice versa, l'errore commesso dal modello QualSim_PFN cambia al variare di ε , e diventa più piccolo al decrescere del valore di ε .

Caso Studio N.3

La stessa procedura descritta precedentemente, è stata applicata alla Rete di Distribuzione di Grumo Nevano (Fig. 4). Gli abitati serviti dalla Rete sono 19000. La portata media giornaliera è $Q_{d,m} = 0.0546$ m³/s, mentre la portata di punta durante una giornata tipo è $Q_p = 0.153$ m³/s; di conseguenza, il coefficiente giornaliero di domanda alla punta è $DC_p = 2.8$. La Rete di Distribuzione è alimentata in due punti, partendo da due valvole tipo Clayton, che garantiscono carichi noti ($H_{res.} = 110,00$ m a.s.l.) a monte dei punti di alimentazione, in prossimità della deviazione dell'acqua dalla condotta principale. La Rete è formata da $T = 36$ lati, $M = 7$ maglie, $N = 30$ nodi. Le caratteristiche geometriche e idrauliche sono riportate in precedenti lavori (Cozzolino et al., 2005; Cozzolino et al., 2006a; Cozzolino et al., 2006b), compreso i valori di per ogni nodo. Quindi, a beneficio di brevità, tali valori non saranno riportati in questo lavoro. Diversamente dall'approccio considerato nei paper summenzionati, per fare un semplice confronto con i risultati forniti da EPANET, per l'esempio qui considerato, i calcoli idraulici sono stati fatti utilizzando, anche nel modulo idraulico del modello QualSim_PFN, la formula di Hazen-Williams, con un coefficiente di conducibilità idraulica pari a $C_{H-W} = 130$. Il trend del Coefficiente di Domanda considerato, format da 48 intervalli temporali, ognuno della durata di 30 minuti, è mostrato nella Fig. 5. In questo terzo esempio, l'errore massimo percentuale commesso utilizzando EPANET per il calcolo dei tempi di arrivo ai nodi è stato, rispettivamente, uguale a 0.7337% se il contaminante viene immessa nel nodo 1, e uguale a 0.0748% se il contaminante viene immesso nel nodo 4. Quindi, probabilmente, a causa della complessità della rete e della variabilità delle condizioni idrauliche, gli errori che si commettono sembrano essere di quelli che si commettono nei casi precedentemente esaminati. Comunque, anche in questo caso, cambiando il valore della scelto per le simulazioni, l'errore commesso dal modello QualSim_PFN potrebbe facilmente essere contenuto, e, comunque, più piccolo di quello che si commette utilizzando EPANET.

Conclusioni

In questo lavoro è stato descritto un modello matematico in grado di calcolare, nello spazio e nel tempo, i cambiamenti della concentrazione di sostanze e/o contaminanti inseriti e/o presenti nell'acqua che fluisce all'interno di sistemi idrici in pressione: il modello denominato QualSim_PFN. Per le sue caratteristiche e capacità, il modello descritto sembra dare risultati migliori rispetto altri modelli presenti in letteratura, come a esempio EPANET. Dal confronto diretto dei risultati ottenuti utilizzando, sugli stessi esempi, sia il modello QualSim_PFN che il modello EPANET, è stato mostrato che EPANET restituisce, in diverse circostanze, errori percentuali rilevanti nel calcolo dei tempi di arrive del contaminante (anche uguale a 13%). Tali errori sembrano essere estremamente importanti quando le simulazioni vengono fatti in condizioni di moto permanente, mentre, tali errori sembrano decrescere quando viene fatta una simulazione come una successione di stati permanenti, derivanti dal considerare differenti valori delle velocità medie del flusso nei singoli nodi. Questo comportamento è, probabilmente, causato da un meccanismo di compensazione capace di smussare gli errori, evitando l'accumularsi degli errori stessi. Sfortunatamente, con l'approccio considerato nel modello EPANET per la scelta degli intervalli temporali utilizzati nel modulo-qualità, non è possibile ridurre questo errore.

Viceversa, nel modello QualSim_PFN è possibile controllare gli errori, in modo semplice, settando opportunamente i valori della presente nella (8). Inoltre, il modello QualSim_PFN sembra essere più generale degli altri modelli disponibili in letteratura, poiché esso può portare in conto diversi fenomeni come: il tempo di decadimento del cloro, la volatilizzazione nei serbatoi, la formazione di DBP, la dispersione turbolenta e la diffusività; questi ultimi, che molto spesso sono elementi considerati di secondaria importanza, talvolta potrebbero assumere grande rilevanza (per esempio, nei casi in cui le velocità del fluido sono ridotte). Poiché, il modello QualSim_PFN risponde a tutte queste possibilità, sembra essere, ad oggi, il migliore strumento per questo tipo di simulazioni. Di conseguenza, per difendere la salute dell'uomo, il modello QualSim_PFN può essere considerato un buon punto di partenza per la risoluzione di problemi come il posizionamento ottimale delle stazioni di clorazione, e il migliore posizionamento di stazioni di monitoraggio per individuare eventuali contaminazioni intenzionali.