MIRE LEHET MÉG HASZNÁLNI EGY IVÓVÍZHÁLÓZAT HIDRAULIKAI MODELLJÉT?

WÉBER RICHÁRD, HUZSVÁR TAMÁS, DR. HŐS CSABA
BME GPK, HIDRODINAMIKAI RENDSZEREK TANSZÉK

Kivonat: *Még napjaink rendszeresen karbantartott ivóvízhálózatai esetén is előfordulhatnak véletlenszerűnek tekinthető csőtörések, melynek helyreállítását a felelős közmű cégnek kell elvégeznie. Az érintett területeket első lepésben szakaszoló tolózárakkal szegregálni szükséges, ezáltal jelentős kiesés is előfordulhat mind a lakossági mind az ipari fogyasztók esetén. Amennyiben a víziközmű vállalat nem képes biztosítani a megfelelő mennyiségű és minőségű ivóvizet, az egyfelől komoly kiesést okozhat az anyagi bevétel oldalán, másfelől növeli a fogyasztói panaszok számát. Ebben a cikkben bemutatjuk, hogy egy hidraulikai modell segítségével miként lehet az említett probléma megoldását támogatni, annak hatását előre jelezni, esetleges megelőző intézkedéséket hogyan lehet meghozni. A bemutatás során egy valódi ivóvízhálózati modellt használunk fel, pusztán demonstrációs célból, a módszerek általánosan használhatók bármely hálózat esetén.*

BEVEZETÉS

Az ivóvízellátó hálózatok minden település (a kis falvaktól a nagyvárosokig) stratégiailag fontos infrastrukturális részei. A mai ivóvíz rendszerek több évtized (vagy akár egy évszázad) folyamatos fejlesztésének eredményeképpen jöttek létre újabb és újabb területek hozzákapcsolásával, ezért általában igen heterogén kialakítású, bonyolult hálózatok [2]. Ezen rendszer rendeltetésszerű üzeme kritikus az ipari hatékonyság és a lakosság életszínvonala szempontjából. Napjaink modern számítástechnikai eszközeit használva azonban előre jelezhetők nem csak a hálózat alapvető működési körülményei, de havária esetben is támaszkodhatunk rájuk. Ilyenek lehetnek például véletlenszerű csőtörések vagy hirtelen nagy mennyiségű vízkivételek, pl. tűzivíz kivétel. Egy jól felépített és karbantartott ivóvízhálózati modell segítségével lehetőségünk van akár megelőző lépéseket is tenni pl. váratlan csőtörésekkel szemben.

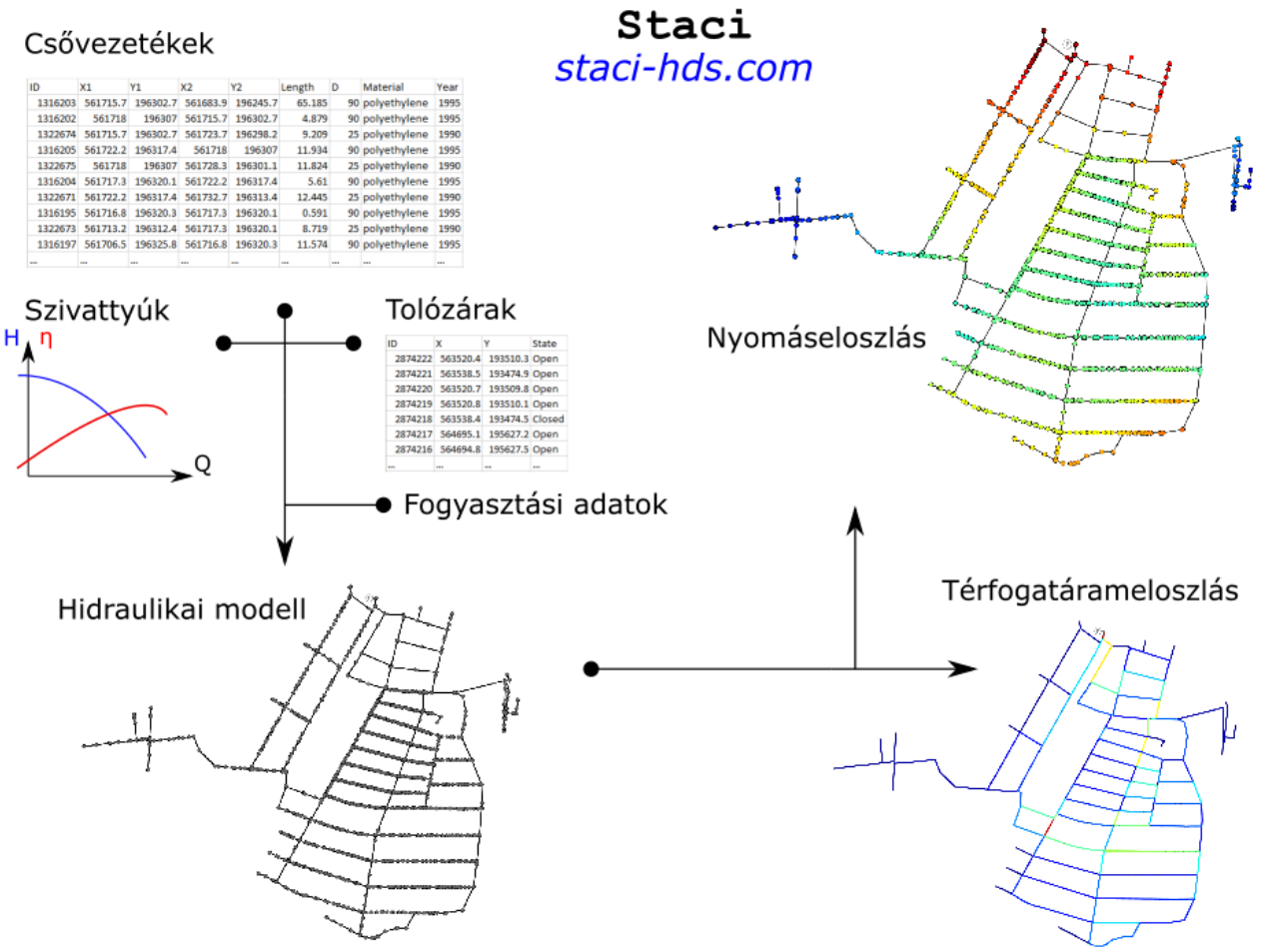
IVÓVÍZHÁLÓZATOK MODELLEZÉSE

Napjainkban az informatikai rendszerek széleskörű elterjedésének köszönhetően lehetőség van arra, hogy az ivóvízhálózatokban található minden egyes hidraulikai elemet (csőszakaszt, tolózárat, szivattyút) virtuálisan tároljunk és kezeljünk. A hálózatok e módú leképezése lehetővé teszi olyan hidraulikai modell építését, melynek köszönhetően a modellezett hálózat viselkedése feltérképezhető a valóságot közelítő módon [1]. Egy ilyen hidraulikai modell számtalan lehetőséget rejt magában: a beszakadt tolózárak detektálásától kezdődően; az esetleges hálózatbővítések hidraulikára gyakorolt hatásának koncepcióterv szintű vizsgálatain keresztül, a kis vízigényváltozásra nagy nyomásváltozásokkal reagáló (magas nyomásváltozás érzékenységű) hálózati helyek azonosításáig.

A matematikai modellről dióhéjban a következőket érdemes ismerni. Egydimenziós áramlást, összenyomhatatlan közeget feltételezünk, továbbá időben szakaszosan állandósult állapotot vizsgálunk. Ilyen feltételek mellet írjuk fel minden csomópontra az anyagmegmaradás, illetve minden ágelemre (pl. csőszakasz, szivattyú) az energiamegmaradás egyenletét [3]. Ezen egyenletek egy nagyméterű, egyértelműen megoldható, algebrai, nemlineáris egyenletrendszert alkotnak. Ezt a Newton-Rhapson-módszerre épülő megoldóval oldjuk meg, a Dr. Hős Csaba által fejlesztett Staci programcsomag segítségével [4]. Ez a hidraulikai megoldó bemenetén kap egy hálózatot (topológiával, csomóponti és csőszakasz adatokkal, hálózati vízigénnyel stb.), majd a matematikai számítások után a kimeneten megkapjuk a hálózatban található csomópontok nyomását valamint az ágelemeken átfolyó térfogatáramot.

Modellezés szempontjából az eddig leírtak általánosan elterjedtek és általában alkalmasak a rendeletésszerű működésüket leírni az ivóvízhálózatoknak, azonban a szélsőséges esetek számításához szükséges van kiegészítésre. Csőtörés vagy hirtelen nagy mennyiségű víz kivétele esetén előfordulhat, hogy a hálózati nyomás oly nagymértékben lecsökken, hogy az már nem képes kielégíteni a fogyasztói igényeket. Ennek modellezésére természetesen lehetőség van az úgynevezett nyomásfüggő fogyasztási modell definiálásával. E modell dióhéjban alkalmas arra, hogy ha a nyomás egy adott küszöb alá esik, csak részlegesen szolgálja ki a definiált névleges vízigényt, így biztosítva lehetőséget az egyes havária esetek közvetlen fogyasztói manifesztációjának feltérképezésére. A következőkben bemutatott vizsgálatainkhoz ezzel a modellel egészítettük ki a Staci programcsomagunkat.

Hidraulikai modell építését és használatát mutatja be vázlatosan az 1. ábra. Hasonló célokra alkalmas eszközök napjainkban számos kereskedelmi forgalomban kapható szoftverben elérhetőek. A továbbiakban azon módszereket mutatjuk be, melyeket csak a Staci-ban állnak rendelkezésre.



ID	X1	Y1	X2	Y2	Length	D	Material	Year
1316203	561715.7	196302.7	561683.9	196245.7	65.185	90	polyethylene	1995
1316202	561718	196307	561715.7	196302.7	4.879	90	polyethylene	1995
1322674	561715.7	196302.7	561723.7	196298.2	9.209	25	polyethylene	1990
1316205	561722.2	196317.4	561718	196307	11.934	90	polyethylene	1995
1322675	561718	196307	561728.3	196301.1	11.824	25	polyethylene	1990
1316204	561717.3	196320.1	561722.2	196317.4	5.61	90	polyethylene	1995
1322671	561722.2	196317.4	561732.7	196313.4	12.445	25	polyethylene	1990
1316195	561716.8	196320.3	561717.3	196320.1	0.591	90	polyethylene	1995
1322673	561713.2	196312.4	561717.3	196320.1	8.719	25	polyethylene	1990
1316197	561706.5	196325.8	561716.8	196320.3	11.574	90	polyethylene	1995
...	...	...	...	...	...	...	...	...

ID	X	Y	State
2874222	563520.4	193510.3	Open
2874221	563538.5	193474.9	Open
2874220	563520.7	193509.8	Open
2874219	563520.8	193510.1	Open
2874218	563538.4	193474.5	Closed
2874217	564695.1	195627.2	Open
2874216	564694.8	195627.5	Open
...	...	...	...

1.ábra *Hidraulikai modell építése a Staci segítségével*

SZEGMENSGRÁF FELÉPÍTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA

A gráfelmélet és hálózatelmélet eszköztára az utóbbi két évtizedben jelentős fejlődésen ment keresztül [5], mely komoly hatást gyakorolta a víziközmű ágazatra is. Számos publikáció jelent meg, melyek fő törekvése a hálózat topológiai, felépítésbéli sajátosságok hidraulikai jellemzőkre gyakorolt hatásának azonosítása [6]. Az irányvonalhoz igazodva a Staci programcsomagba is beépítésre került számos eszköz, mely például alkalmas két pont között a legrövidebb utat meghatározni vagy egy ivóvízhálózat különböző strukturális tulajdonságai számszerűsíteni.

Általános esetben, amikor a hálózat rendeltetésszerűén üzemel, egy teljesen összefüggő hálózatot alkot. Előfordulhatnak azonban különböző üzemviteli kényszerű leállások, pl. csőtörés vagy a vezetékek mosatása esetén, hogy egyes szakaszokat a hálózati főtestről le kell hidraulikailag választani. Erre a célra a rendszer számos pontján találhatóak tolózárak, melyek lehetőséget adnak különböző szigetek kiszakaszolására, biztosítva ezzel az adott rekonstrukciós művelet zavartalan elvégzését. Az ilyen esetek modellezési szempontból történő kényelmesebb kezelésére vezettük be az úgynevezett

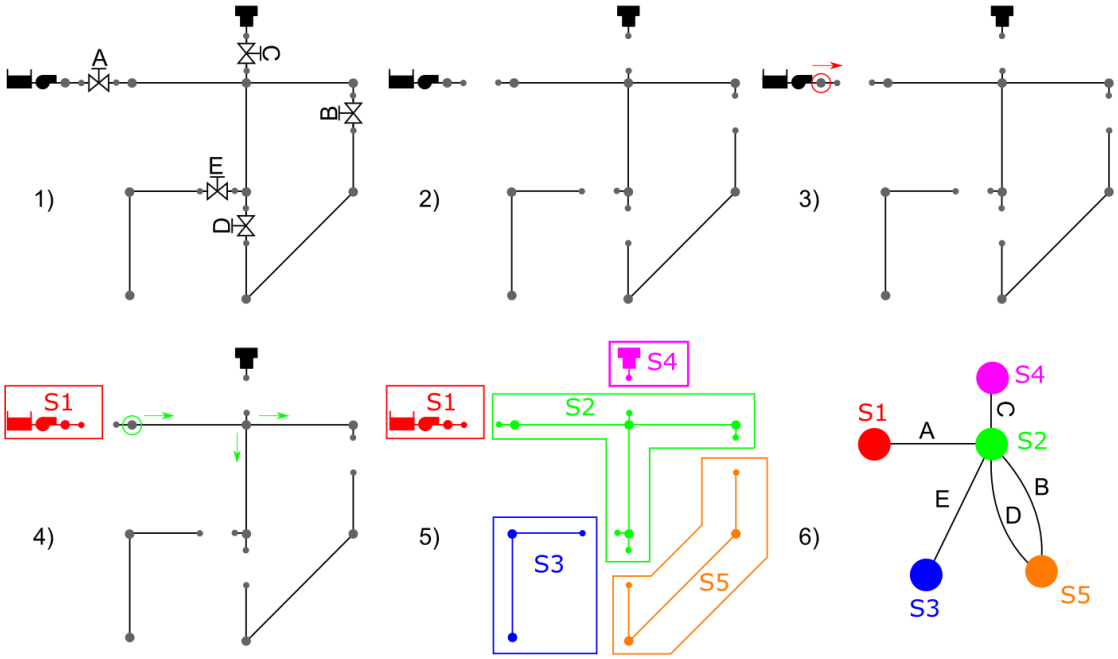
szegmensgráfot, melyet a következőképp értelmezünk.
A szegmensgráf bemutatását egy egyszerű, szintetikus példahálózat segítségével tesszük meg, mely a 2. ábrán látható. Az első részábrán láthatjuk az eredeti hálózatot egy szivattyúval, mely egy tározóból emeli a vizet a hálózatba és tölt egy medencét, továbbá található rajta öt tolózár, melyeket betűkkel azonosítottunk. Első lépésben el kell távolítanunk a tolózárakat a modellből, ezáltal a hálózat szétesik különböző egymással nem érintkező, egyelőre ismeretlen számú szigetre. Az első csomóponttól indulva (lásd 3) lépés) feltérképezzük, melyek a hálózat azon elemei (csövei, csomópontjai, esetleg egyéb hidraulikai elemei), melyek továbbra is közvetlenül csatlakoznak. Amikor sikerült az összes elemet elérni, az algoritmus tovább ugrik a következő csomópontra, mely nem csatlakozott ehhez a szigethez, lásd 4) lépés. Amennyiben sikerült minden elemet valamelyik csoporthoz sorolni, képesek vagyunk felépíteni a szegmensgráfot, melyben az elkülönült szigetek, vagyis szegmensek lesznek a csomópontok és az őket összekötő élek pedig a tolózárak, lásd 6) lépés a 2. ábrán. Ugyanezeket a lépéseket alkalmazhatjuk valódi ivóvízhálózat esetén is, ahogy az látható a 3. ábrán.

Már pusztán a szegmensgráf meghatározásával és strukturális vizsgálatával számos információhoz juthatunk az adott ivóvízhálózattal kapcsolatban; például azáltal, hogy a szegmensgráf alapértelmezetten tartalmazza minden szegmens esetére azon tolózárak csoportját, melyek e szegmenst a lehető leghatékonyabban szakaszolják ki a hálózatból. Az az a szegmensgráf alapú megközelítés lehetővé teszi az ivóvízhálózat kizárási tervének létrehozását bármely csőszakasz esetére. Másfelől ez a megközelítés lehetővé teszi ideális mosatási tervek elkészítését; vagyis könnyedén meghatározhatjuk, hogyan lehet a leghatékonyabban, leggazdaságosabban a hálózat egy adott területén elvégezni a tisztítást.

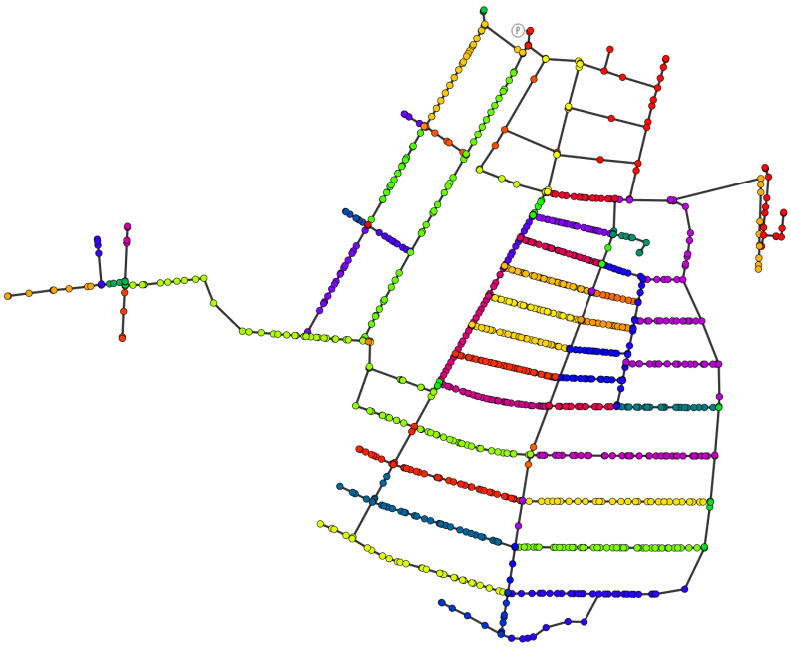
SZEGMENSGRÁFOK FOKSZÁMELOSZLÁSA

A komplex hálózat elmélet egyik jelentős eszköze az úgynevezett fokszámeloszlás vizsgálata. A fokszám azt jelenti, hogy egy csomópont hány éllel kapcsolódik a hálózathoz. Az eloszlás alatt pedig egy olyan grafikont értünk, mely megmutatja, hogy adott fokszámú csomópontból az egész hálózatban összesen hány fordul elő. Ivóvízhálózatok szegmensgráfja esetén a fokszám azt takarja, hogy egy szegmens hány tolózárral szakaszolható ki; illetve a fokszámeloszlás megmutatja, hogy pontosan hány darab 1, 2, stb. szakaszolható szegmens található a hálózatban összesen. A már korábban is alkalmazott valódi ivóvízhálózat szegmensgráfjának fokszámeloszlása látható a 4. ábrán.

Az ábráról leolvasható, hogy a hálózat jelentős része olyan területen található, melyet 6 vagy annál kevesebb tolózárral lehet a hálózatról leválasztani. Mindazonáltal található a hálózatban 1 szegmens, melyez összesen 7, illetve egy másik esetén 10 tolózárat is el kell zárnunk, hogy az esetleges hibákat zavartalanul



2. ábra *Szegmensgráf felépítése lépésről lépésre.*



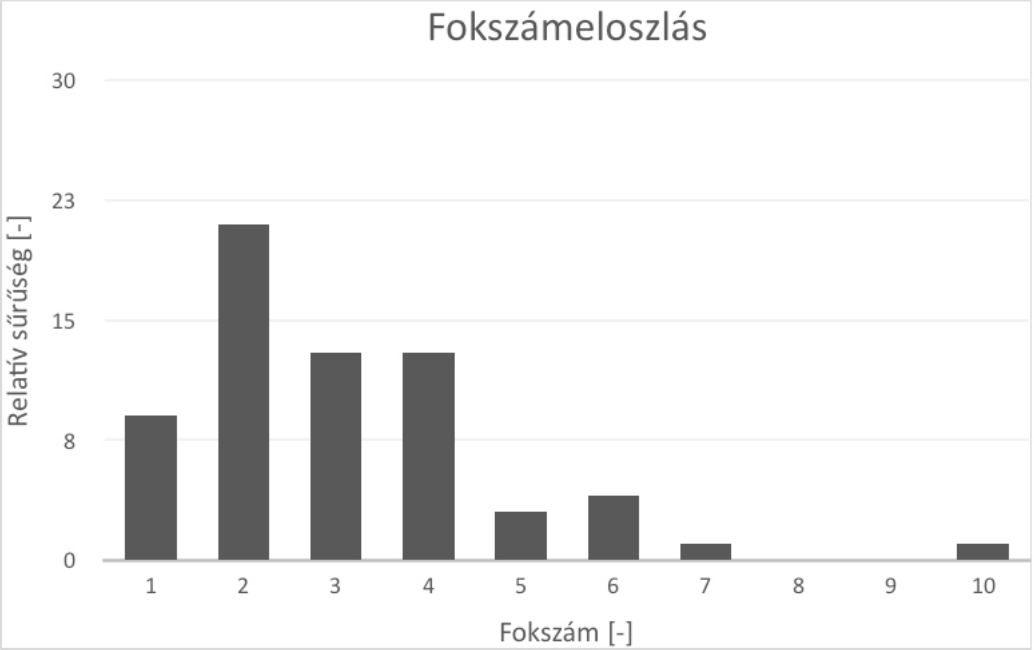
3. ábra *Egy valódi ivóvízhálózat szegmensgráfja.*

elháríthassuk. Ezen eseteket mindenképpen egyénileg szükséges megvizsgálni, hogy itt valójában ez-e a helyzet, vagy esetleg az adatbázis tartalmaz valamilyen hibát vagy hiányosságot. További hálózatok vizsgálata során pusztán néhány esetben találkoztunk hasonlóval.

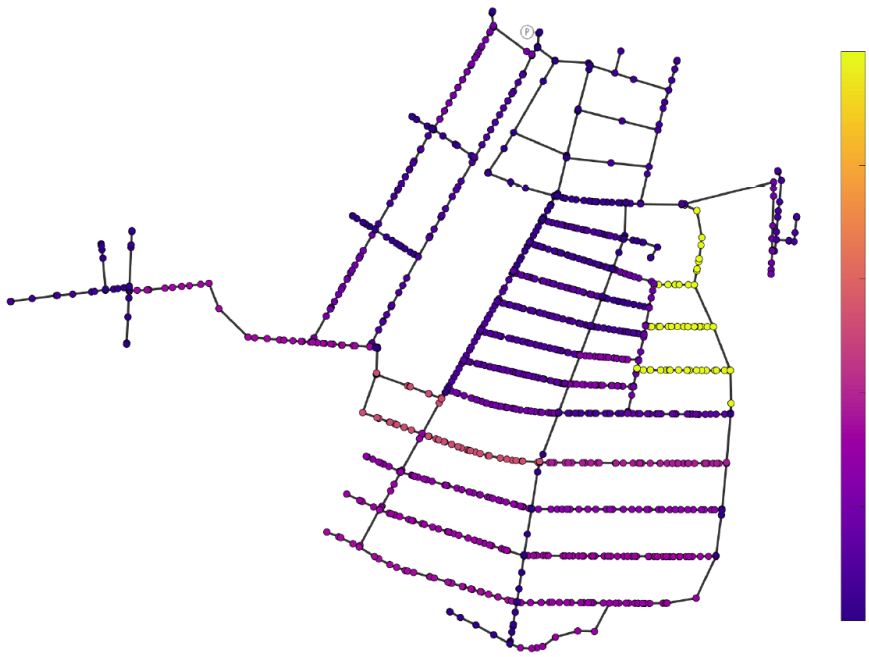
Mindemellett, amit még fontos kiemelnünk, hogy számos egyéb típusú hálózat esetén (pl. internet, szociális hálózat, fehérje kapcsolatok gráfja, elektromos hálózat) megfigyeltek egy különös jelenséget, mégpedig az úgynevezett skálafüggetlen eloszlást. Ez azt jelenti, hogy ezekben a gráfokban szinte kivétel nélkül találhatóak a hálózat méretéhez képest kifejezetten magas fokszámú csomópontok. Ez strukturális ellenállóképesség szempontjából rendkívül kedvezőtlen tulajdonság, ugyanis ezen pontok „eltávolításával" a kapcsolati háló kritikusan sérül. Egy ehhez hasonló jellemzőkkel bíró elosztóközpont kiesése vezetett az 1977-es nagy New York-i áramszünethez. Ivóvízhálózati szempontból viszont, több mint 30 valódi hálózat megvizsgálása után, kijelenthetjük, hogy néhány eltérő esetet leszámítva, nem találtunk hasonló tulajdonságot. Ezek a hálózatok leírhatók hagyományos véletlen gráfként, néhány eltéréssel. A különbségek abból adódnak, hogy egy ivóvízhálózat síkban kiteríthetők, vagyis úgynevezett síkgráfok, továbbá nem találhatóak bennük 0 fokszámmal rendelkező pontok, illetve minden esetben összefüggő gráfot alkotnak. Összességében kijelenthető, hogy a megvizsgálat hálózatok mind leírhatók összefüggő, véletlen síkgráfként.

IVÓVÍZHÁLÓZATOK SEBEZHETŐSÉGE

Napjainkban számos kutatás célja a hálózatelmélet területén, hogy számszerűleg definiálják egy rendszernek az ellenállóképességét különböző meghibásodásokkal szemben [6]. Ebben a vizsgálatban mi azzal foglalkoztunk, hogyan adható meg egy jól meghatározott számmal, hogy egy adott hálózat a különböző szegmenseken keresztül mennyire sebezhető. A célunk meghatározni a rendszer azon részeit, melyekben egy csőtörés a lehető legnagyobb kiesést képes okozni a hálózatban. Mindezt mi a fogyasztók szempontjából közelítettük meg, a korábban már említett nyomásfüggő fogyasztás modell segítségével.
Röviden ennek a mennyiségnek, úgynevezett sebezhetőségnek, a definíciója a következő. Egyfelől megszámoljuk, hogy egy adott szegmensben az összes folyóméter cső hányada található meg, mely egy nulla és egy közötti számot eredményez. Másik oldalról pedig, a hidraulikai modell alapján kiszámítható, hogy amennyiben egy szegmenst tolózárakkal kiszakaszolunk a hálózat a teljes vízigény mekkora részét nem tudja kiszolgálni. Tehát utóbbi változó számszerűleg megadja minden egyes szigetre, hogy azok kiesése esetén a teljes vízigény hányadát nem lesz képes várhatólag teljesíteni az ivóvízhálózat egy az azokban bekövetkezett csőtörés esetén. Ezen két mennyiség szorzatát (csőhossz hányad és vízkiesés hányad) nevezzük sebezhetőségnek. Összességében így egy olyan változót kaptunk, mely akkor vesz fel magas értéket egy szegmens esetén, ha abban jelentős mennyiségű folyóméter cső található és



4. ábra *Valódi ivóvízhálózat szegmensgráfjának fokszámeloszlása.*



5. ábra *Egy valódi ivóvízhálózat sebezhetőségi térképe.*

komoly kiesést okoz az abban bekövetkezett csőtörés a vízigények kiszolgálásában.
A sebezhetőség ábrázolása a hálózat térképén egy komoly fegyvertény a közmű cégek számára a veszélyes területek feltárásában. Ezen területek sebezhetőségének csökkentése érdekében lehetőség van akár új tolózár beépítésére vagy egyéb vízkormányzási módszerek alkalmazására. Az 5. ábra mutat be egy példát egy már korábban is demonstrációra használt ivóvízhálózat esetére. Ahogy ott látható, van egy kiemelten sebezhető területe a rendszernek, továbbá néhány közepesen veszélyes szegmens. Érdekesség, hogy ezen kitett szegmens nem egyezik meg a korábban említett magas fokszámú esetekkel, ez a terület mindösszesen öt tolózárral kiszakaszolható. Számos hálózaton vizsgáltuk ezt a típusú térképet és azt figyeltük meg, hogy szinte minden hálózatra ez a trend jellemző. Vagyis minden esetben előfordul néhány különösen sebezhető szigete a hálózatnak, míg a hálózat nagy része elhanyagolható ebből a szempontból.

ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a cikk bemutatott néhány új megközelítést, hogy napjainkban mire lehet még használni, a szokásos áramlástani jellemzők (pl. nyomás, térfogatáram) számítása mellett, egy jól felépített hidraulikai modellt ivóvízhálózatok esetén. Először is definiáltuk a szegmensgráfot, mely leírja hogyan esik szét a hálózat különböző izolált szigetekre egy-egy tolózárakkal történő kizárás esetén. Egyfelől ez a megközelítés már önmagában alkalmas feltérképezni a hálózat azon részeit, mely szegregálásához esetlegesen túl sok tolózár elzárása szükséges, megnövelve ezzel a kiszakaszoláshoz szükséges időtartamot. Másfelől megemlítettük, hogy a szegmensgráf segítségével könnyedén kijelölhetők a hálózat mosatási pontja. Továbbá bemutattunk egy jellemzőt, mely alkalmas feltárni a hálózat azon részeit melyen egy véletlen csőtörés jelentős kiesést okozhat a hálózat fogyasztói számára. Ezen változó térképes megjelenítése egy kényelmesen használható eszközt ad a víziközmű cégek kezébe a hálózataik sebezhető területeik feltárására.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet szeretnénk mondani a Soproni Vízmű Zrt-nek, hogy a rendelkezésünkre bocsájtották a hálózatok adatait kutatási célokra.

HIVATKOZÁSOK

SZERZŐ:

Wéber Richárd, 1992-ben született Pécsett. 2015-ben szerezte BSc diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Karán, míg ugyanitt 2017-ben az MSc-t. Ezután kezdte kutatását a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszéken PhD hallgatóként, témája címe „Csőhálózatok minőségi vizsgálata gráfelméleti módszerek segítségével", témavezetője Dr. Hős Csaba, egyetemi docens. A tanszéken már évtizedes múltra tekint vissza a különböző csőhálózatok vizsgálata, elsősorban ivóvízhálózatok állnak a fókuszban. A vizsgálatok során a cél az utóbbi évtizedek komplex hálózatelmélet eszközök alkalmazása ivóvízhálózatok esetén. Eddig 4 nemzetközi folyóirat cikket (köztük 2 impakt faktorral rendelkezőt) és 7 nemzetközi konferenciakiadványt jegyezhet magáénak.