



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

HIDRODINAMIKAI RENDSZEREK TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

Ivóvízhálózatok szivárgás-csökkentő optimalizációja és szivárgási paraméter kalibrációja

Szerző:

Szabó Marcell,

Gépészmérnöki BSc III. év

Konzulens:

HUZSVÁR TAMÁS

2021. november 7.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. Kivonat	4
1.2. Motiváció	5
1.3. Szakirodalmi áttekintés és előzmények	7
1.4. A dolgozat felépítése	11
2. Az ivóvízhálózatok hidraulikai modellezése	13
2.1. A hálózatot felépítő ágelemek	13
2.1.1. Csővezetékek	13
2.1.2. Medencék	14
2.1.3. Áramlási ellenállások	15
2.1.4. Szivattyúk	16
2.2. A hálózatot felépítő csomópontok	17
2.2.1. A csomóponti fogyasztás hagyományos értelmezése	17
2.2.2. A csomóponti fogyasztás nyomásfüggő értelmezése	17
2.3. A hálózati modell eredményeinek kiértékelése	19
3. A szivárgás csökkentése topológia optimalizáción keresztül	22
3.1. A szivárgási modellezéshez szükséges együtthatók bevezetése és optimalizációja	22
3.1.1. A kiömlési konstans hálózathatár által felvetett problémák	23
3.1.2. A veszteségindex bevezetése és a célfüggvény meghatározása	24
3.1.3. A kiömlési együttható kalibrációja	25
3.1.4. Eredmények	26
3.2. A szivárgás topológia alapú optimalizációjának módja	27
3.3. Szivárgáscsökkentés genetikusan	27
3.3.1. A genetikusan algoritmus használata és eredményei	28
3.3.2. A genetikusan algoritmus eredményei	32
3.4. Szivárgáscsökkentés klaszteranalízissel	34
3.4.1. A klaszterezés előnyei és felvetett problémái	35
3.4.2. A nyomáscsökkentő szelepek beállításai	36
3.5. A szivárgás optimalizációjára kidolgozott módszer összefoglalása	37

4. Kiértékelés és eredmények	39
4.1. A klaszterezés eredményei	39
4.2. Kiegészítő programrész a szelepek pontos lehelyezéséhez	42
4.3. A PRV-k nyomásbeállításainak optimalizációs eredményei	43
4.4. Esettanulmányok	43
4.4.1. Balf hálózata	45
4.4.2. Tómalom hálózata	48
4.4.3. Villa-sor hálózata	51
5. Összefoglalás	56
A. Mellékletek	61
A.1. Nelder-Mead algoritmus	61
A.2. Genetikus algoritmus	63
A.3. Nyomáscsökkentő szelepek	66
A.4. Leiden-algoritmus	68
A.5. Differenciális evolúció	73

1. Bevezetés

1.1. Kivonat

Mint ahogyan a víz az emberi szervezet élethez szükséges, alapvető igénye, úgy az ivóvíz hozzáférhetősége a magasabb társadalmi csoportosulások alapvető feltétele. Legyenek azok az ókor városállamai, vagy napjaink szinte állam méretű metropoliszai. Ahogyan azonban Földünk lakossága egyre gyorsuló ütemben növekszik, úgy válik egyre lényegesebbé minden liter fogyasztható ivóvíz. Bolygónk ivóvízhálózataiból azonban évről évre egyre több és több víz tűnik el nyomtalanul: ennek oka pedig a szivárgás. Ez a jelenség minden csatlakozási ponton, csőszakaszon jelen lehet, lokalizálása fáradságos és költséges folyamat, amely a hálózatok bővülésével egyre nagyobb és nagyobb erőforrásokat igényel. Jelen dolgozat az ivóvízvesztesség csökkentését tűzte ki célul a szivárgási vízvesztesség minimalizálásának útján, mindezt a felhasználói igénykielégítés mindenkori szem előtt tartása mellett.

A módszerfejlesztés első lépését a releváns irodalom megismerése jelentette, amely alapján világossá vált, hogy a szivárgáscsökkentés legmegfelelőbb eszköze a nyomáscsökkentő szelepek alkalmazása. Ezt követte azon eszközök feltárása, amelyek lehetővé tehetik ezen szelepek optimalizált elhelyezését és beállítását. A vizsgálatot azonban csak akkor lehetett elkezdni, ha a hálózat modellezése szakirodalmilag és empirikus úton is megalapozott irányértékekkel megtörténik. Ehhez tartozik a hálózatspecifikus kiömlési együttható meghatározása, illetve a modellezéshez megfelelő szoftver használata. Szerencsére az irodalomkutatás során sikerült olyan adatokat fellelnem, amelyek a vizsgált Nyugat-magyarországi régió ivóvízhálózataihoz tartalmaztak szivárgási értékeket. Ezt követte a már említett kiömlési együttható beállítása, amelyet a Nelder-Mead optimumkereső módszer végzett a Python programozási nyelvben, Ubuntu környezetben. A hálózati modellezésre pedig a tanszéki Staci hidraulikai megoldó szoftver volt a legalkalmasabb, amelyet Dr. Hős Csaba [7] készített.

A következő lépést a nyomáscsökkentő szelepek elhelyezésének optimalizációja jelentette. Mintául három, Sopron környéki kisebb ivóvízhálózat szolgált, amelyeknek minden szükséges paramétere ismert volt. A szakirodalommal konzekvensen magát a szivárgáscsökkentést először egy genetikusan algoritmus topológia optimalizációja adta, amelynek célfüggvényeként a szivárgási érték és az elhelyezett szelepek miatt kieső fogyasztói há-

nyad lineáris kombinációja volt használatos. Egy hosszas tesztelés és paramétervizsgálat megmutatta, hogy a módszert nagyobb hálózatokon futtatva, vagy sok szelep elhelyezése esetén a hidraulikai megoldó instabillá válik, illetve a genetikus algoritmus futási ideje exponenciálisan nő. Ennek okán sajnos a szivárgási érték sem konvergál megfelelően.

Az első próbálkozás eredményei ugyan biztatóak voltak a kisebb hálózatokon, de a sorozatos kiértékelések után egy direkt módszer szükségessége vált nyilvánvalóvá, hiszen már falvak hálózatai is több órás futásidőket eredményeztek. A célja egy olyan technika kifejlesztése vált, amely nagyobb hálózatokra is hatékonyan működik, de nem ad jelentősen rosszabb szivárgási értékeket a genetikus algoritmusnál. Ezt egy súlyozható klaszter azonosító algoritmus alkalmazásával sikerült elérni, amelynek több előnye is van az előző megoldáshoz képest. Egyrészt futási ideje nagyon alacsony maradt nagyobb hálózatokon is, hiszen a keresési tér nem nőtt hatvány vagy exponenciális függvény szerint a hálózat méretével, lévén közvetlen módszerről van szó. Másrészt a módszer lehetővé tette az ivóvízhálózat gráf reprezentációjának súlyozását. Ezt kihasználva pedig, a módszer által azonosított nyomáscsökkentő szelep elhelyezési scenáriók minden esetben tükrözték a hálózati súlyként használt paraméter fizikai hatását. Ezen vizsgált hálózati súlyok közül, az egy élre vetített kezdő- és végpontbéli nyomások különbsége jelentette azon súlyozási formát, amellyel a módszer leghatékonyabban azonosított a genetikus algoritmussal vetekedően megfelelő szelep kiosztást. Ezen felül, lévén nem csupán a szivárgás, de a fogyasztás is nyomásfüggő módon került modellezésre, lehetőség nyílt minimalizálni a kieső fogyasztói hányadot is, amelyet a genetikus algoritmussal sajnos nem lehetett megtenni a célfüggvény keresési tér "robbanása" miatt. A vizsgáló programot Python nyelven írtam, a kapott eredményeket pedig MatLab környezetben értékeltem ki.

1.2. Motiváció

A Föld lakosságának és városainak folyamatos növekedése, az ivóvíz kitermelési helyek lokalizáltsága, az elsivatagosodás problémája mind azt vetíti elő, hogy a 21-22. század egyik legfőbb problémája az ivóvíz hiánya lesz. Mi sem utal érzékletesebben a tiszta ivóvíz stratégiai szerepére, mint az, hogy az olyan hagyományos termékek mellett, mint amilyen az arany, az olaj, a földgáz, a szójabab vagy akár a bitcoin, 2020. decembere óta ivóvízzel is lehet kereskedni a chicagói tőzsdén (Chicago Mercantile Exchange, CME), így akár spekulánsok is beleavatkozhatnak az ár alakításába.

Magyarországon az ivóvíz nagyjából 30 százaléka tűnik el a földben szivárgások és csőtörések következtében, ami közepes eredménynek számít az OECD országok rangsorában. Svájcban és Németországban szigorú intézkedésekkel, Angliában pedig a szabad verseny elvén vitték le ezt a számot 8-9 százalékra. Kína rossz és korszerűtlen hálózataival 2030-ra azt a célt tűzte ki, hogy a szivárgási veszteséget 10 százalék alá csökkentse és ennek megfelelően támogatja az ilyen irányú törekvéseket. Gondoljunk csak bele, hogy a földből kitermelt vizünk egyharmada nem érkezik meg a fogyasztókhoz, miközben a víz Földünk egyik legfontosabb és a század végére talán legkeresettebbé váló természeti kincse. Az Unicef adatai szerint napjainkban 4,4 milliárd ember nem él megfelelő higiéniai körülmények között, 2,1 milliárd embernek pedig nincs biztonságos, fogyasztható ivóvize.

A csapból folyó ivóvíz hosszú és kanyargós utat tesz meg a fogyasztókig. Budapestnek például 5360, de még Debrecennek is 1391 kilométer hosszú vízhálózata van. Ezeknek a hálózatoknak egykor jól strukturált és átlátható rendszer volt az alapja, azonban főként a 20. századi extrém városnövekedéseknek köszönhetően kisebb részhálózatok összekapcsolásából, struktúráltan rendszertelen módon vagy idő- és helyszűkében bővültek. E mellett pedig a hálózatok elöregedése is jelentős problémát jelent. Egy 2012-es [23] tanulmány szerint a magyar városokban átlagosan 1,2 kilométerenként van a csővezetékekben hiba. Ez egy Budapest-szintű városban nagyjából 4500 hibát jelent, amelyek jelentős hányada pontos helyszíni feltárás nélkül nem is azonosítható. Ezeket a szaknyelv rejtőzködő hibáknak nevezi, ilyenek például a kis átmérőjű csövek törései, a rosszul tömítő elágazások, vagy csőösszeroppások. E hibák jelentős mértékben növelik a hálózatok szivárgási veszteségeit, viszont felderítésük roppant költséges, lévén legtöbb esetben csak és kizárólag akusztikai technikával, helyszíni letapogatással azonosíthatóak. Egy 2018-as MaVíz kimutatás alapján a ki nem számlázott víz nagyjából 144 millió köbmétert tesz ki évente. Ez - átlagos, 300Ft-os köbméterenkénti vízárral számolva - évente 43 milliárd forint veszteség. Nem beszélve arról, hogy a víz a globális felmelegedés miatt egyre inkább stratégiai szerepet tölt be. Drágulásával egy új nemzetgazdasági szegmens nyílhat, amelyet Magyarországnak érdemes lesz kihasználnia a következő évtizedekben.

Jelen dolgozat a fentiekben leírtak miatt a vízszivárgás csökkentésének lehetőségeit vizsgálja, valódi Nyugat-magyarországi ivóvízhálózatok topológiai optimalizációján keresztül. Az optimalizáció tárgyát pedig a nyomáscsökkentő szelepek optimális helyének és beállítási értékének meghatározása jelenti.

1.3. Szakirodalmi áttekintés és előzmények

Napjaink ivóvízhálózatainak topológiai, üzemviteli és megbízhatósági optimalizációja egy igen megalapozott területnek tekinthető. Azonban a szivárgási problémák hálózati feltárása, lokalizálása, illetve maga a szivárgáscsökkentés csak nemrég került be a tudományos köztudatba. A 'Web of Science' adatai szerint míg a 2010-es évben mindössze 20 munkát adtak be tudományos szakfolyóiratba a szivárgás témakörében, addig a tavalyi évre ez a szám már 104-re nőtt. A tudományos közegben ezzel egy fokozatos érdeklődés-növekedés érhető tetten, amely magyarázata, hogy egyre több ország ismeri fel a víz jövőbeli stratégiai és gazdasági szerepét. Szakirodalmi áttekintésemben megpróbálom azon forrásokat összefoglalni, amelyek munkám elkészítéséhez nélkülözhetetlenek voltak.

A projekt elején célom az ivóvízhálózatok fogyasztás- és szivárgásmodellezésének megismerése volt. E munkafázis fő forrásaként Orazio Gustiolisi és munkatársai publikációja [2] szolgált, akik 2008-ban az egyik első numerikus modellezés fókuszú munkát mutatták be az ivóvízhálózatok szivárgásmodellezéséről. A cikk amellett, hogy több különböző numerikus megközelítést összevet, felhívja a figyelmet a szivárgásmodellezés bonyolultságára is. A jelenség oka, hogy a csőhálózatokban az évek során elkerülhetetlenül jelentkeznek hibák. Ezek lehetnek akár anyagfáradásból, akár a helytelen beépítésből származó problémák. Emellett a lokalizációs, az elemzési folyamatban található és a kiértékeléses nehézségek is jelentősek. Ennek okán pedig a szerzők arra jutnak, hogy bár egy hálózati szakaszonkénti szivárgási érték sokkal jobban modellezné a hálózat szivárgásainak működését, egy lokalizált szivárgás elemzés szinte életszerűtlenül sok adatot igényel és pontossága kétes. Ugyanezen nehézséget mutatta meg Dr. Tingchao Yu és társainak cikke [22] is, amelyben a rés nagyságát a cső átmérőjével osztva kerestek összefüggéseket a szivárgás mértéke és a geometria között. A cikk szerint nem lehetséges egyetlen paraméterre visszavezetni a csőhibák okát, a modellezés bonyolult hálózati módszerek alkalmazását teszi szükségessé. A szivárgás tehát egy nem egyértelmű függvénye a csövek életkorának, anyagának, hosszának, átmérőjének, érdességének, és egyéb paramétereinek. Mégis, a mai legkorszerűbb matematikai és hidraulikus modellekben elfogadott tény, miszerint leginkább a nyomástól függ a szivárgási érték. Ezt támasztja alá L. S. Araujo, H. Ramos és S. T. Coelho cikke [3] is. Munkájukban definiálnak egy szivárgási együtthatót és egy kiömlési együtthatót is, ez utóbbi ráadásul függ a rés alakjától és a cső paramétereitől. Természetesen ezek meghatározhatatlanok valódi körülmények között, lévén ezen paraméterek megismeréséhez a hiba

feltárása szükséges. Ezen áttekintő és összefoglaló cikkek alapján az egyértelműen látható, hogy az ivóvízhálózatok hibáinak véletlen felbukkanása ellehetetleníti a túl részletes modellek alkalmazását, így a durvább, de a vízmérleg szempontjából pontosabb modellek alkalmazása felé terelődött a figyelmem. Azokat vizsgálva pedig egyértelművé vált, hogy valódi ivóvízhálózatok szivárgás elemzéséhez először egy olyan kalibrációs technika kidolgozására van szükség, amely akár a legegyszerűbb szivárgási modell hálózatspecifikus paramétereinek meghatározására is alkalmas.

Szerencsére a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék munkatársainak birtokában volt jelentős mennyiségű Sopron környéki ivóvíz hálózat hidraulikai és geodéziai modellje. Ehhez olyan adatokat kellett találni, amelyek alapján kalibrálni lehet adott hálózatokra a szivárgási tényezőt. Ebben Somos Éva 2012-ben közzétett kutatása [23] adott nagy segítséget, amely a magyarországi ivóvízhálózatok vízgazdasági és - természetesen ezen belül - szivárgási helyzetét vizsgálta. A MaTud cikkének függelékében városokra és körzetekre lebontva adta közzé adatait, amelyekből a számunkra megfelelő soproni hálózatokra vonatkozó elemeket sikerült kinyerni. Így elindulhatott munkánk ezen iránya is.

A gyakorlatban több olyan eljárást is alkalmaznak amely szivárgáshelyek lokalizációs eredményekre vezet. Itt papíron a bevett gyakorlat a csövek folyamatos ellenőrzése akusztikus módszerekkel, azonban a valóságban sajnos ez legtöbbször nem így alakul. A vízművek gyakorta nehéz anyagi helyzete miatt az erőforrások hiányában sokszor még kielégítő hidraulikai modelljük sincsen, amely a hibákat jelezni tudná. Mégis, a jobb anyagi helyzetben lévő országok sokat foglalkoznak ezzel a területtel. Példának okán egy friss 2020-as kutatás [11] vonalspektrumos módszert alkalmaz a szivárgási helyek feltérképezésére, amelynek jelét aztán egy köbös interpolációs kereséssel alakítja konkrét lokációvá. Előnye, hogy sokkal kisebb hibával dolgozik, mint a hagyományos módszerek, mindazonáltal még teszt-fázisban jár, mindössze egy városon tesztelték. Emellett minden méréshez egy állandó mérőműszert telepítése szükséges, amely azt jelenti, hogy egy milliós nagyváros hálózata nagyjából 10-12 ezer ilyet igényelne. Ezek beszerzése és beépítése így egy rendkívül költséges megoldást eredményez.

Egy másik, 2019-es kutatás [13] olyan lokalizációs eljárást keresett, amely mindössze a hidraulikai modellből, azon belül is a nyomásokból adja meg a rés helyét. A technikát egyelőre sajnos csak egy fiktív és egy valódi rendszerre implementálták, ahol több-kevesebb sikerrel dolgozott. Fő hibája volt, hogy csak a szivárgó csövet találta meg, amely akár

több kilométeres is lehet. Ez újabb és újabb, helyi méréseket igényelne a gyakorlatban. A mérés során felmerülő költségeket pedig tetézi, hogy úgynevezett okos mérőberendezésekre van szükség hálózati implemetálásához, amelyek már a hiba bekövetkezése előtt jelentős idővel telepítésre kerültek. A technika így az előzőhöz hasonlóan túl nagy költségvonzattal rendelkezi.

A szakirodalmi kutatásban konklúzióként vonható le, hogy a szivárgáslokalizáció nagyon költséges és fáradtságos módszer. Ezek után világossá vált számomra, hogy az útban rejlő lehetőségek ugyan sokrétűek, de egyetlen megoldás sem költség- és erőforrás-hatékony eléggé. Éppen ezért más irányt kerestem, amely univerzális, hatékony és hamar megtérülő megoldást tud biztosítani egy víziközmű cég számára.

Így érkeztem el a dolgozatom témájának számító szivárgáscsökkentési metódusokhoz. A szakirodalmi áttekintésben világossá vált számomra, hogy a szivárgást legkönnyebben nyomáscsökkentéssel lehet befolyásolni, mivel az a nyomásnak hatványfüggvénye. A nyomás csökkentése azonban felvet egy olyan problémát, amelynek megoldása még nehezebbé teszi az optimalizációt. Ez az úgynevezett kieső fogyasztói hányad. A lakossági ivóvízhálózatok nyomásának 1,5 - 6 bar közötti értékeket szükséges felvennie a szabvány szerint. Ha a nyomás ez alá esik, akkor a fogyasztói igények kielégítése nem fog megtörténni, magyarul a víz jobb esetben csordogálni, rosszabb esetben egyáltalán nem fog folyni a csapból. A nyomáscsökkentő szelepek nem megfelelő beállítása és ennek okán a rendszer szerződési nyomásszint alatti üzeme mind olyan tervezői hibák, amelyek nem engedhetők meg egyetlen ivóvízhálózatban sem, hiszen nyomáskiesést, ezáltal pedig kielégítetlen fogyasztói igényeket okoznak. Ez ráadásul kiemelten fontos szerepet kap az önkormányzati politikában, miután már néhány ház vízellátásának ingadozása is nagy hírértékkel bír a médiában.

Mindezek ellenére a nyomáscsökkentés alapú szivárgás-csökkentés relatíve gazdag szakirodalommal bír, az írások nagy része pedig rendkívül új. A legtöbb munka az ivóvízhálózatok topológia optimalizációján alapul. Az ezen belül nyomáscsökkentő szelepekkel (angolul pressure reduction valves, a továbbiakban PRV) dolgozó módszerek pedig kifejezetten gyakoriak, hiszen relatíve kis beruházási költséggel nagyszerű eredmények érhetők el. Egy 2019-es cikk [16] témája például a PRV-k optimális elhelyezése volt. Egy új mérőszámot, a VSI-t (valve selection index) definiálták és ez alapján optimalizálták a PRV-k elhelyezkedését. Mindezt úgy, hogy az NPRI (network pressure reliability index, azaz a

hálózati nyomás megbízhatósági index) nevű mérőszámot maximalizálják, ezáltal sokkal jobb, nyomásbarátabb eloszlást biztosítva a vízhálózatok napi szintű fogyasztási adataihoz igazodva. Ez átlagosan kisebb nyomásokat eredményez, amelyet az optimális PRV elhelyezéssel valósítanak meg, ezáltal bekövetkezik a szivárgáscsökkenés. Ehhez természetesen minden hálózathoz előzetes fogyasztási kimutatást kell készíteni. Mindössze egy elképzelt és egy valódi városra lett bevezetve, ahol 15-20 százalékos szivárgás csökkenést produkált. Előnye, hogy nagyon egyszerű algoritmust használ és a mérőszámok is igen egyszerűek, a PRV modell pedig topológia-független. Viszont, a módszer során alkalmazott optimalizációs technika nem zárja ki a kieső fogyasztói hányad bekövetkezését, illetve a hálózat méretéte és a futási idő között nem vázol összefüggést.

Egy másik, ugyancsak 2019-es írás [6] a PRV-k nyomásbeállításainak optimalizálásán keresztül szeretné a szivárgásokat csökkenteni. Ehhez minden csomópontra egy LPI (Leakage Performance Index, azaz szivárgási teljesítmény-index) indexet definiál, amely mérhető, kvantitatív adatokkal dolgozik (pontbéli tömegáram és nyomás). Ez sokkal egyszerűbb mint a szivárgást minimalizáló algoritmusok, tesztelése egy olasz kisvárosban történt. Összehasonlítási alapjai egy-egy már meglévő szivárgás minimalizáló és a legkisebb átlagnyomást célnak kitűző algoritmus. Mivel az LPI algoritmus egy nyomásvezérelt rendszer, ezért célja mindig az optimális PRV-felhasználást biztosítani a lehető legkisebb nyomáson, ellentétben a szivárgás minimalizáló algoritmussal, amely gyakrabban megenged nagyobb nyomásokat is. Ezáltal hosszú távon az LPI-s eredmény jobb csőéletkort és kevesebb csőtörést fog okozni, bár ez még természetesen csak a szerzők becslése, a cikk további kutatást igényelne. Összességében nagyszerűen implementálható programnak tűnt, bár a szivárgási modellről, illetve az implementáció technikai részleteiről a szerzők nem ejtettek szót. Ezen írás nagyon jó kiindulási alapnak tűnt a kutatáshoz és rávilágított még egy optimalizálandó aspektusra a PRV-kiosztás mellett: azok beállítására.

Mi sem mutatja jobban az optimalizációs feladat nehézségét, hogy 2017-ben Francesco De Paola vezetésével egy olasz kutatócsoport a zenéből merített ihletet [17] a szivárgás csökkentéséhez. A genetikus algoritmus helyett zenei, HM-alapú algoritmust vezet be, amelynek célja két változót harmonizálni. Ez egy random-generációs eljárás, amelyben az objektív függvények a lehetséges megoldási tér felé vannak eltolva, a két paraméter súlyozásával. A módszer odáig jutott, hogy két hálózaton is tesztelték, minkettőnél adott számú PRV-elhelyezést feltételezve. A programnyelv ugyan bonyolult, de talán jól mutat-

ja mennyire innovatív megoldásokhoz folyamodnak a tudósok a szivárgás csökkentésének érdekében.

A felhasználható módszerekről egészen részletes bemutatást nyújt egy, a Műegyetem kutatóinak munkája [5]. Itt több algoritmus ivóvízhálózati topológia optimalizációs felhasználását is bemutatásják, amelyeket a későbbiekben hasznosítani lehet.

A szakirodalmi áttekintésben láttam, hogy milyen nehéz munka is a megalapozott és működő algoritmusok fejlesztése a hidraulikában. Világossá vált számomra, hogy a hálózatok szivárgásának csökkentése ugyan szükséges a jövő szempontjából, mégis milyen kevés irodalom tartozik a témakörhöz. Munkámban éppen ezért a kutatások és kísérletek alapján legjobbnak tűnő, nyomáscsökkentő szelepek köré épülő megoldásra építettem.

1.4. A dolgozat felépítése

Dolgozatomban a bevezetés és szakirodalmi áttekintés után bemutatásra kerül az ivóvízhálózatok modellezése, illetve a hagyományos ivóvízhálózati modellek nyomásalapú fogyasztási- és szivárgási modellbővítménye. Ebben nagy segítségemre volt a már kereskedelmi forgalomban lévő, de a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék által kifejlesztett Staci [7] szoftver. Ez a fent említett módon ivóvízhálózatok modellezésére alkalmas program, amelyet Dr. Hős Csaba írt, számomra a szivárgási modellezéssel pedig konzulensem, Huzsvár Tamás egészítette ki.

A második fejezetben továbbá bemutatásra kerül az elméleti szivárgási modellen kívül egy gyakorlati munka [23] is, amely a modell kalibrációjában jelentett nagy segítséget. Somos Éva munkája impliciten tartalmazza a magyar hálózatok szivárgási értékeit egy úgynevezett veszteségtényezőn keresztül, amelyből az elszivárgott víz mennyiségét visszszámítva a szivárgási modell hálózati szintű kalibrációja már megvalósítható. Ez azért nagyon előnyös, mert így nem szükséges a Magyar Vízművektől számlázási adatokat kérvenyezni, amelyekből a szivárgást hálózatokra lebontva lehetne becsülni.

Ezek után következhetett a megfelelő optimumkereső algoritmusok keresése. A harmadik fejezet a használt algoritmusok bemutatására és azok szivárgáscsökkentési vonatkozására koncentrál. A szivárgási modell kalibrációjának esetében a Nelder-Mead algoritmus került alkalmazásra, a nyomáscsökkentő szelepek optimális kiosztására pedig a genetikai algoritmus. Sajnos utóbbi működése nem bizonyult megbízhatónak: konvergenciája, stabilitása és futási ideje a hálózatok növekedésével exponenciális romlásnak indult. A

helyzet orvoslásához egy másik optimumkereső választása lett szükségszerű. A szelepek kiosztására végül a klaszteranalízis, pontos helyük meghatározására egy variációs módszer, beállításukra pedig a differenciális evolúció került alkalmazásra. Az ezekből összeállt módszer stabil működése, alacsony futási ideje és megfelelő konvergenciája meggyőzőtt létjogosultságáról és alkalmazandónak találtam.

Az ezzel kapott eredmények kiértékelése képezi a negyedik fejezet tárgyát. A kiértékelést három eltérő méretű, valós, Sopronhoz közeli hálózaton végeztem el, amelyeknek adatait az 1. táblázatban foglaltam össze. Fontos kiemelni, hogy ezek valódi települések vagy városnegyedek ivóvízhálózatai, amelyek adatai a Soproni Vízművek és a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék együttműködése miatt elérhetőek.

Hálózat neve	Csomópontok száma $[db]$	Összegzett csőhossz $[km]$	Összegzett fogyasztás $\left[\frac{l}{perc}\right]$
Balf	378	5.096	148,3
Tómalom	1293	17.62	102,6
Villa-sor	7188	97.29	8986

1. táblázat. A vizsgált hálózatok főbb adatai

Dolgozatomat a kidolgozott módszer értékelése, a hibák okainak feltárása és egy rövid kitekintés zárja.

2. Az ivóvízhálózatok hidraulikai modellezése

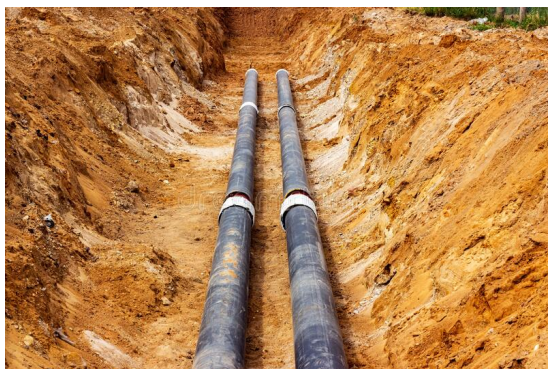
A következőkben bemutatásra kerülnek Dr. Csizmadia Péter [8] jegyzete nyomán a hidraulikai hálózatok különböző ágelemei, csomópontjai és azok összefüggő rendszere. Ezek után a teljes hálózat matematikai és fizikai modellje, illetve az ebből kapott megoldások elemzése következik. A fejezet végén ugyancsak bevezetésre kerül a [3] forrásból következő szivárgási alapegyenlet és a szivárgási tényező optimalizációjának módszere.

2.1. A hálózatot felépítő ágelemek

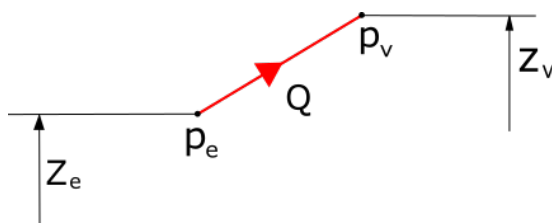
A hálózati ágelemek rövid bemutatása illetve használatos alapegyenletük felírása következik, különös tekintettel a szivárgást okozó ágelemekre.

2.1.1. Csővezetékek

A hálózatok talán legismertebb és legelterjedtebb elemei a csővezetékek. Anyagukat tekintve a húzott acél, PVC vagy KPE csövek a leggyakrabban használtak, azonban nem ritkák a korszerűtlen, gömbgrafitos öntöttvas csövek sem a régebben épült óvárosi részekben. Sajnos utóbbiak okozzák a legtöbb szivárgási problémát és egészségkárosító hatásaik miatt egyre gyakrabban cserélendőek, lévén e csövekről jelentős mennyiségű fémes bemosódás történhet. Összességében áramlási veszteségek szempontjából is ezen ágelem csoport tagjai a meghatározóak, hiszen nagy hosszuk miatt (a KSH adatai szerint 2019-ben Budapesten 4546, de még Debrecenben is 802 kilométernyi cső van lefektetve a földbe) ezek jelentik a legnagyobb áramlási veszteségeket.



(a) A valóságban



(b) Hidraulikai modellben

1. ábra. A csővezetékek

Elejük és végük között minden esetben felírható az energiamegmaradás törvényével összefüggő veszteséges Bernoulli-egyenlet. Az egyenlet felírásánál különösen ügyelni kell arra, hogy a csőátmérő a hossz mentén állandó legyen, ellenkező esetben a rendszert külön részekre kell bontani. Ellenkező esetben a kontinuitás értelmében a be- és kiáramlási sebességek nem egyeznének meg. Mivel azonban ez egy jól betáplált hálózatban nem fordulhat elő, a Bernoulli-egyenlet sebességre vonatkozó tagjai kiesnek. Így, a nyomásokat egy oldalra rendezve az alábbi formát kapjuk:

$$p_e - p_v = \rho g(z_v - z_e) + \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} \frac{Q|Q|}{A^2} \quad (1)$$

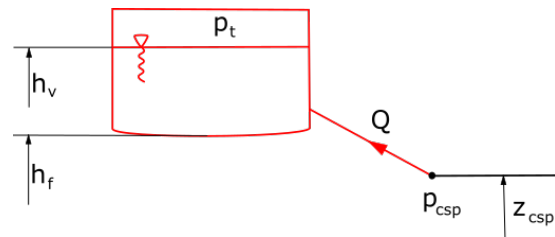
ahol p_e és p_v [Pa] a nyomások a csővezeték elején és végén, $\rho [\frac{kg}{m^3}]$ az áramló közeg sűrűsége, $g [\frac{m}{s^2}]$ a gravitációs gyorsulás, z_v és z_e [m] a geodéziai magasságok, $\lambda [-]$ a cső súrlódási tényező, L [m] és D [m] a cső hossza és átmérője, $Q [\frac{m^3}{s}]$ az átfolyó térfogatáram, $A [m^2]$ pedig a kiáramlási keresztmetszet. Az egyenlet utolsó tagja azért nem a sebességekkel van felírva, mert az abszolút értékben lévő térfogatáram-taggal így kifejezhető az áramló közeg és ezáltal az áramlási veszteség iránya is.

2.1.2. Medencék

Az ivóvízhálózatok következő fontos ágelemei a medencék. Fő feladatuk a hálózati alacsony nyomás biztosítása és fenntartása. Kitüntetett szerepük ugyanakkor a fogyasztói csúcsidőszakban való víztöbblet-biztosításban van, hiszen ekkor az igényeket a szivattyúk önmagukban képtelenek kielégíteni. A medencék általában magas területekre építettek, ilyenek például a dombtetőkre helyezettek (pl. Gellért-hegyi medence) vagy a víztornyok is. Energetikailag is fontos szerepet töltenek be, a vízerőműveknél gyakran használatosak elektromos áram kinyerésére.



(a) A valóságban, pl. egy víztorony



(b) Modellezésnél

2. ábra. A medencék

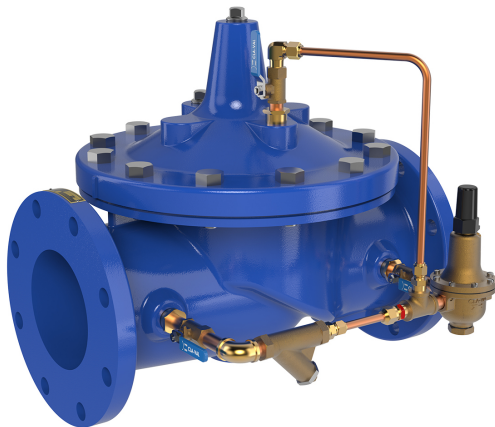
Modellezésük ugyancsak az energia-egyenlet alapján történik, azonban fontos különbség, hogy a medencék csak egyetlen bekötési ponttal rendelkeznek a csővezetékekkel szemben, amelyeket két csomópont között értelmeztünk. Mivel általában a csatlakozó és kiemenő csővezetékek nagyon rövidek a teljes hálózathoz képest, ezért veszteségük elhanyagolásra kerül. Így a medencék alapegyenlete:

$$p_{csp} - p_v = \rho g(h_f + h_v - z_{csp}) \quad (2)$$

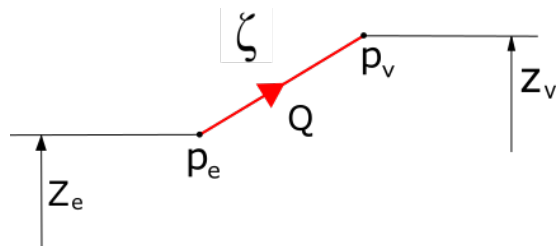
ahol $p_{csp}[Pa]$ és $p_v[Pa]$ a medencéhez tartozó csomópontban illetve a medence vízfelszínén uralkodó nyomások, $h_f[m]$ és $h_v[m]$ a medence fenekének és vízszitjének tengerszint feletti magassága.

2.1.3. Áramlási ellenállások

Az áramlási ellenállások csoportjába sorolható az összes olyan hálózati kiegészítő elem, amely az áramlás irányának vagy mértékének befolyásolásáért felelős, vagy valamiért lokális nyomásveszteséget okoz. Ide tartoznak a beépített térfogatáram- és nyomásmérő berendezések, fojtások, de ilyenek a veszteséget okozó csőkönyökök, a tolózárak és a dolgozatban tárgyalt nyomáscsökkentő szelepek is.



(a) A valóságban, például egy nyomáscsökkentő szelep, azaz PRV



(b) Modellezésnél

3. ábra. A csőszelvények

Egyenletük felírása szintén az energia-egyenlet segítségével történik:

$$p_e - p_v = \rho g(z_v - z_e) + \zeta \frac{\rho Q|Q|}{A^2} \quad (3)$$

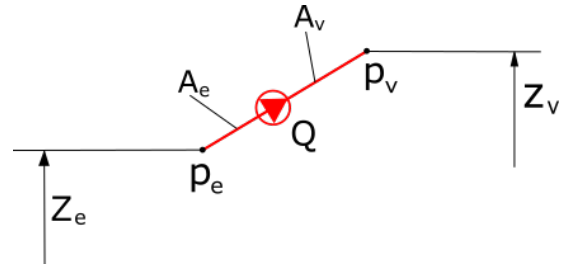
ahol $p_e[Pa]$ és $p_v[Pa]$ a szerelvény előtti és utáni nyomások, $z_e[m]$ és $z_v[m]$ a szerelvény előtti és utáni geodéziai magasságok, $\zeta[-]$ pedig a jellemző veszteségi tényező. Fontos megjegyeznünk, hogy a szerelvények legnagyobb része vízszintesen van beszerelve, tehát energia-egyenletünkől sokszor kiesik a geodéziát tartalmazó tag. Ugyanakkor a veszteségtényező függ a szerelvény típusától, illetve geometriájától vagy jelleggörbétől is. Ezek mind olyan értékek, amelyeket a gyártó katalógusából vagy az illetékes vízművek adataiból tudhatunk meg.

2.1.4. Szivattyúk

A szivattyúk elsődleges feladata a medencéből a víz hálózatba juttatása és a nyomás növelése. Legfontosabb adatuk jelleggörbékük, amely az adott szivattyút jellemzi a szállított térfogatáram függvényében határozza meg a szükséges szállítómagasságot. Ez utóbbiból lehet megmondani, hogy az adott térfogatáramon mennyi energiát képes átadni a folyadéknak.



(a) A valóságban



(b) Modellezésnél

4. ábra. A szivattyúk

A szivattyúk egyenletéhez is az energia-egyenletre van szükség, amely az alábbi alakot veszi fel:

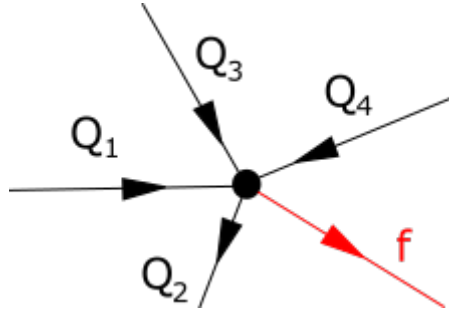
$$H(Q) = \frac{p_v - p_e}{\rho g} + (z_v - z_e) + \frac{1}{2g} Q^2 \left(\frac{1}{A_v^2} - \frac{1}{A_e^2} \right) \quad (4)$$

ahol $H(Q)[m]$ a szállítómagasság, $p_e[Pa]$ és $p_v[Pa]$ a szivattyú előtti és utáni nyomások, $z_e[m]$ és $z_v[m]$ pedig a szivattyú előtti és utáni geodéziai magasságok.

2.2. A hálózatot felépítő csomópontok

2.2.1. A csomóponti fogyasztás hagyományos értelmezése

A csomópontok az ágelemek csatlakozási helyeinél találhatók. Mivel az ágelemek valamilyen paraméterük megváltozásánál már külön-külön elemekre bontandók, ezért ezeken a helyeken is értelmezünk csomópontokat. Fontos leszögezni, hogy a rendszerből való vízkivétel elméletileg csak a csomópontokban lehetséges. Minden csomópont rendelkezik egy geodetikus magasságértékkel $z[m]$ és fogyasztási értékkel $f[\frac{m^3}{s}]$.



5. ábra. A hálózati csomópontok sematikus szemléltetése

A csomópontokban a közművek célja, hogy minél pontosabban határozhassák meg a kiáramló vízmennyiséget, hiszen ez alapján fog számlázni a fogyasztóknak. Ezt a legegyszerűbben a térfogatáramok méréséből tudja megtenni. Az anyagmegmaradás törvénye szerint a csomópontokban folyadék nem veszhet el, így a kontinuitási egyenlet jól leírja a térfogatáramokat az adott csomópontban. Az egyenlet alakja az alábbi:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i Q_i = f_i \quad (5)$$

ahol $\delta_i[-] = 1$ ha a csomópont az i -edik cső vége, azaz a térfogatáram befelé folyó, $\delta_i[-] = -1$ ha a csomópont az i -edik cső eleje és ezáltal kifolyó áramról van szó. Mivel az anyagmegmaradás miatt a közeg nem tűnhet el és nem is történik halmazállapot-változás, ezért a ki- és belépő térfogatáramok előjeles összege megadja a csomópont $f_i[\frac{m^3}{s}]$ fogyasztását.

2.2.2. A csomóponti fogyasztás nyomásfüggő értelmezése

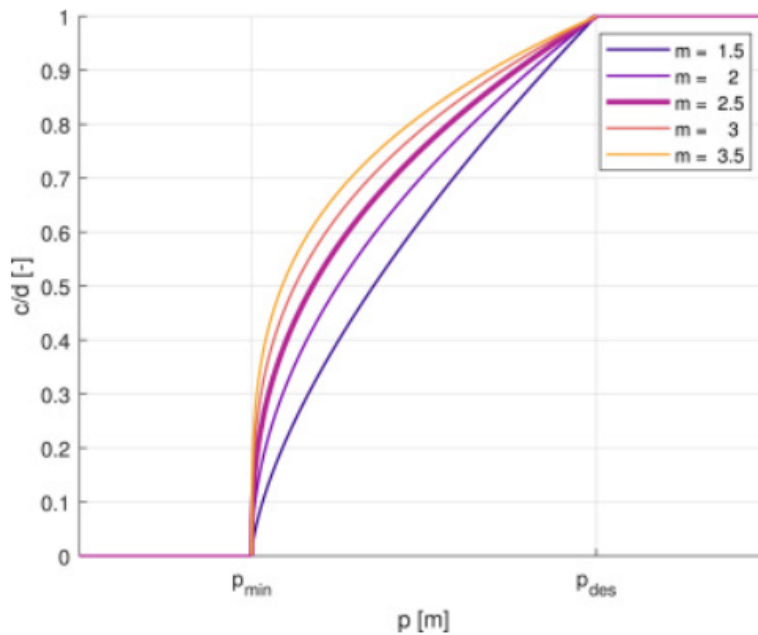
Amint az a bemutatott egyenletekből látható, az alapvető hidraulikus megoldók állandó fogyasztási értékekkel dolgoznak, azaz a csomópontokon a hálózathoz távozó víz

menyisége független a csomóponti nyomástól. Ez a megközelítés általában elfogadható pontosságú, mivel a megfelelően működő hálózatoknak elegendő nyomást kell biztosítania a hálózat minden igényének kielégítéséhez. Azonban bizonyos esetekben (pl. sérült rendszerek vagy nagy fogyasztás esetén, tűzcsap üzemkor) a nyomás drasztikusan lecsökkenhet, és a fogyasztás a névleges szükséglet alatt marad. Azonban még akkor is, ha a hálózati nyomás alacsony, az igények nagy része volumetrikus, és kimaradások idején megfelelően ellátható. Emellett normál üzemi körülmények között is a fogyasztás egy bizonyos része a csomóponti nyomástól függ, ilyen például az általam vizsgált szivárgás is.

Erre a problémára Weber Richárd, Huzsvár Tamás és Dr. Hős Csaba munkája [19] alapján egy megfelelő, nyomásfüggő fogyasztásokkal dolgozó függvény került hálózatba építésre. Ez az alábbi alakot veszi fel:

$$f(x) = \begin{cases} d, & \text{ha } p > p_{des}, \\ d\left(\frac{p-p_{min}}{p_{des}} - p_{min}\right)^{\frac{1}{m}}, & \text{ha } p_{des} > p > p_{min} \\ 0, & \text{ha } p_{min} > p \end{cases}$$

ahol d jelöli a névleges fogyasztást, amikor minden igény kielégített, p_{des} és p_{dig} a nyomás alsó és felső határát vízszlopméterben, m pedig a hatványkitevő. A 6. ábra a fogyasztási igény nyomástól való függését mutatja be különböző kitevő értékekkel. Jelen munkában az $m = 2,5$ kitevő került használatra.

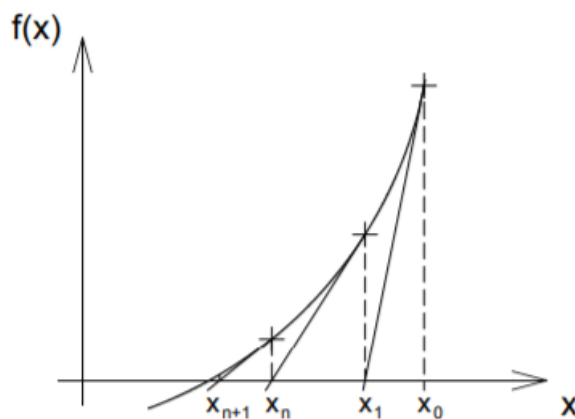


6. ábra. A nyomásvezérelt fogyasztásokat leíró függvény, forrás: [19]

2.3. A hálózati modell eredményeinek kiértékelése

Az ágelemek egyenleteiben az ismeretlen térfogatáram nemlineáris formában jelenik meg, illetve az ág- és csomóponti egyenletek Jacobi mátrixxá való összeépítése után már egy viszonylag kis ivóvízhálózat is jelentősen nagy egyenletrendszert ad eredményül. Jelen esetben egy jól definiált, de nemlineáris algebrai egyenletrendszert szükséges megoldani, amelyet egy számítógépes módszer tehet meg legkönnyebben. Erre bevett megoldási módszer a nemlineáris egyenletrendszerek egyik alapmegoldója, a Newton-Raphson módszer, amely a Staci programcsomagban is megtalálható.

A Newton-Raphson módszer egy olyan iterációs eljárás, amely valós függvények gyökeinek közelítésére alkalmas. A módszerben definiálásra kerül egy kezdeti pont, amely sejtés alapján a valós gyökhöz közel állhat. A függvény értéke ebben a pontban az ehhez a ponthoz tartozó érintőn található, ezt felhasználva a függvény pontbeli deriváltjának kiszámításával adódik az egyenlete. Ezen egyenletet $y = 0$ -ra rendezve kapható az abszcisszával képzett metszéspontja, amely pont nagy valószínűséggel jobb közelítése a gyöknek. Az iterációt így folytatva a vizsgált pont mindig egyre közelebb kerül a keresett gyökhöz. Az iteráció végét az jelenti, ha az n . és $n + 1$. gyökök közötti eltérés adott küszöbszám alatt lesz.



7. ábra. A Newton-Raphson módszer szemléltetése, forrás: [8]

Az eljárás egy- és többdimenziós esetekben is használatos, miután az egyenletekben egyszerre több változó megjelenése is lehetséges. Egyszerű, egydimenziós esetben, a kezdeti értéket x_0 -nak véve, n pedig az iterációs eljárások száma, a függvény meredeksége az

n . (x_n) pontban:

$$\tan(\alpha) = f'(x_n) = \frac{f(x_n)}{\Delta x} = \frac{f(x_n)}{x_n - x_{n-1}} \quad (6)$$

amelyből átrendezéssel adódik:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (7)$$

Ha a régi és az új gyökök között egy adott küszöbszám alatti a különbség, akkor a megoldó az utolsó értékének x -tengelyre vetített pontját tekinti a megoldásnak. Többdimenziós esetben, azaz hidraulikai hálózatok több egyenletének megoldásakor már elkerülhetetlen a deriváltakból álló Jacobi-mátrix képzése. A (7) egyenlet ebben az esetben a következőképpen alakul:

$$\underline{x}_{n+1} = \underline{x}_n - (\underline{Jac}(x_n))^{-1} \underline{f}(x_n) \quad (8)$$

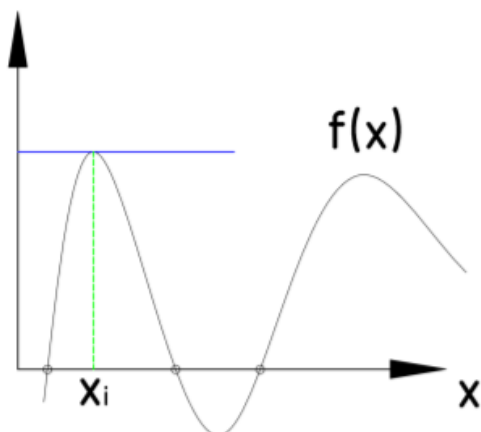
Miután a megoldás a derivált segítségével áll elő, a függvénynek a vizsgált pontban deriválhatónak kell lennie. Sokszor azonban ezen feltétel mellett sem teljesül a konvergencia, miután bizonyos esetekben (8a ábra) a vett érintő meredeksége zérus, vagy többdimenziós esetben a Jacobi-mátrix determinánsa adódik nullára. Ekkor az úgynevezett relaxáció alkalmazandó, amely lényege, hogy az iteráció következő lépéseként az új érték már ne a metszéspontot nem adó x helyen kerüljön kiszámításra. A relaxációs paraméter ebben az esetben α , alkalmazása pedig a következőképpen történik:

$$\tilde{\underline{x}}_{n+1} = \underline{x}_n - (\underline{Jac}(x_n))^{-1} \underline{f}(x_n) \quad (9)$$

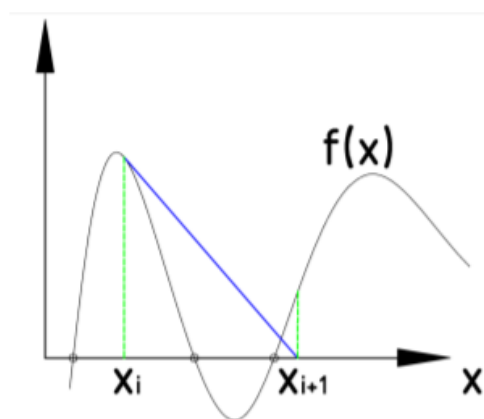
és

$$\underline{x}_{n+1} = \alpha \underline{x}_n + (1 - \alpha) \tilde{\underline{x}}_{n+1} \quad (10)$$

Ugyan a relaxáció megelőzi a végtelen ciklust vagy a konvergencia nélküli megoldásokat, a megoldó tökéletes konvergenciája nem biztosított. Több lokális gyökhely esetén például a kezdeti értéktől függ, hogy melyik lokális megoldást találja meg először az algoritmus. Ez a gyök sokszor lehet, hogy nem is a lokálisan legközelebbi, mint azt a 8b ábra is mutatja.



(a) Ha az érintő meredeksége zérus



(b) Több minimumhely esetén

8. ábra. A Newton-Raphson módszer hibái, forrás: [8]

A kiértékeléskor a Newton-Raphson módszer alkalmazásával az ismeretlen nyomások és térfogatáramok ismertté válnak, így az egész hálózat nyomástérképe és ágelemi térfogatáramai numerikusan kiadódnak. A hidraulikus kiértékelés a Staci nevű szoftverrel történik, amely a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék és a SYS-Team Zrt. közös fejlesztése.

Miután az modellezett ivóvízhálózat alapvető hidraulikai paramétereit így kiértékeltnek tekinthetők, a megoldó szivárgási modellezéssel való kiegészítése következik, amely a harmadik fejezetben kerül bemutatásra.

3. A szivárgás csökkentése topológia optimalizáción keresztül

3.1. A szivárgási modellezéshez szükséges együtthatók bevezetése és optimalizációja

Az optimalizáció első lépése a hálózati modell kiegészítése volt egy szivárgásszámító bővítménnyel. A szakirodalomban ([3], [2]) meghatározottakkal összhangban a hálózatokra szükséges volt az úgynevezett szivárgási- és kiömlési együtthatót definiálni. Az egyértelműen megalapozott és empirikus mérésekkel is alátámasztott szivárgásmodellezési alapegyenlet a következőképp definiálta a két együtthatót:

$$q_j = K_f p_j^\beta \quad (11)$$

ahol $q_j[\frac{m^3}{s}]$ a j pontban vett szivárgási térfogatáram, $\beta[1]$ az úgy nevezett szivárgási exponens, értéke jelen dolgozatban minden esetben 1,18 [18] alapján. Végül pedig $p_j[Pa]$ a j pontban vett üzemi nyomásérték, $K_f[\frac{m^4 s}{kg}]$ pedig az említett rögzített szivárgási együttható, amely egy cső- és talajkörümenyek által definiált függvény. Az utóbbi együttható a következőképpen áll elő:

$$K_f = c \cdot \sum_{j=1}^M 0.5 \cdot L_{ij} \quad (12)$$

ahol $L_{ij}[m]$ a csőhossz i és j pontok között, $c[\frac{m^5 s}{kg}]$ pedig a kiömlési együttható az adott cső adott pontján, amely függ a rés alakjától és a cső paramétereitől. Ezt látva világos volt, hogy szivárgási kutatáshoz szükséges egy olyan kalibrációs lehetőséget találni, amely pontos becslést adhat a tényező alakulásáról külön-külön minden hálózatra. A becslésből kapott szivárgási értékeket minden csomópontra kiszámítva és ezt összegezve kapható meg az egész hálózat szivárgása. Ezek mellett a kieső fogyasztói hányad is fontos szempont a munkában, ezért ugyanilyen módon a kielégítetlen fogyasztók számlálását is megteszi. Ez a két eredmény volt a legtöbb alkalommal reprezentálva a munkám során, ezért rendkívül fontos volt ennek hibátlan és stabil működése. A Staci szoftvert ennek megfelelően konzulensem, Huzsvár Tamás egészítette ki a szivárgási kalkulátorral, C++ programozási nyelven.

3.1.1. A kiömlési konstans hálózatfüggése által felvetett problémák

Ezt látva világos volt, hogy szivárgási kutatáshoz szükséges egy olyan kalibrációs lehetőség találni, amely pontos becslést adhat a kiömlési tényező alakulásáról. Ez azért volt nehéz lépés, mert a szakirodalomban hiányos a kiömlési együttható hálózatfüggésének elemzése, ezáltal nincsen olyan számítási metódus kidolgozva, amelynek analógiájára ki lehetne számolni az általam vizsgált hálózatok együtthatóit. Ez sok problémát vetett fel, hiszen minden ilyen konstans együttható hálózatfüggő és nem definiálható egyetlen, univerzális számként. Ebből következő a kiömlési együttható rossz becslése fals eredményeket szülne a különböző hálózatok szivárgási értékeire és nem lehetne viszonyítási alapot képezni a későbbi számításokhoz.

Ezért egy indirekt módszerrel tettem kísérletet a probléma megoldására. A Somos Éva által publikált [23] munka definiált egy úgynevezett szivárgási veszteségtényezőt, amely bizonyos városok éves szivárgási vízveszteségeit csőhosszra vetítve adja meg. Ebből néhány kiemelt adat megtalálható a 2. táblázatban. A tényezőkből vissza lehetett számítani az egy másodperc alatt történő egész hálózatra vonatkoztatott szivárgást.

Település	Mért hossz [km]	Fajlagos hibaszám $\left[\frac{db}{km}\right]$	Veszteségtényező $\left[\frac{m^3}{h \cdot km}\right]$
Budapest	4650	0,40	0,43
Debrecen	110	1,15	1,09
Eger	137	10,25	0,97
Győr	15	1,47	0,67
Kecskemét	23	0,30	0,13
Miskolc	39	0,55	0,35
Sopron	353	0,48	0,48
Székesfehérvár	689	0,69	0,63
Szolnok	70	0,43	0,57
Szombathely	294	0,94	0,76

2. táblázat. Magyarországi hálózatokra meghatározott veszteségindexek, forrás: [23]

Az így megkapott értékkel egyenes út vezet az ivóvízhálózati modell szivárgási bővít-
ményének egy-egy adott hálózatra vonatkozó kalibrációjához. Az együttható kalibrációs
folyamatát a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra. A kiömlési együttható kalibrációja

A szivárgás direkt meghatározása a kalibráció után már a kiömlési együttható fel-
adata. A módszer előnye, hogy kiömlési együttható becslését nem egy direkt módszer
kidolgozásával kellett megtenni, hanem már leírt, empirikus adatokból lehetett megb-
csülni a geográfiai elhelyezkedés figyelembe vételével. Miután a felsorolt hálózatok között
Sopron városa is megtalálható volt (2.táblázat) és a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék
birtokában vannak Sopronhoz geográfiailag közeli hálózatok, azok veszteségtényezője így
ismertnek tekinthető és kiindulási alapként szolgál. Ezzel lehetségessé vált az optimali-
zálni kívánt együtthatók becslése.

A következő lépés az optimalizációra leginkább alkalmas algoritmus megtalálása volt.
Ez a Nelder-Mead algoritmus lett, amely a A.1. számú mellékletben található.

3.1.2. A veszteségindex bevezetése és a célfüggvény meghatározása

Miután az optimumkeresési algoritmus ki lett jelölve, a használandó célfüggvény meg-
határozása következett. Ezt a fentebb vázolt indirekt megközelítéssel volt célszerű meg-
tenni, ebben pedig segítséget nyújt a [23] cikkben definiált veszteségindex, amely az éves
vízvesztéget a csőhosszra vetíti. Somos szerint a szakma törekvései egyértelműen ezen
index használatának irányába mutatnak, éppen ezért célszerűnek láttam a modellben való
használatát is. A veszteségindex a következőképpen áll elő:

$$q_V = \frac{Q_V}{8760 \cdot L} \quad (13)$$

ahol $q_V[\frac{m^3}{h \cdot km}]$ a veszteségindex amely az adott csőhálózatot jellemzi, $Q_V[\frac{m^3}{v}]$ az éves
vízvesztés, $L[km]$ a hálózat összes csövének hossza, $8760 \frac{h}{v}$ pedig az órák száma egy

évben.

Mivel a veszteségindex a csőhálózat összegzett hosszával leosztott, ezért már nem függ a hálózat nagyságától. A közművek szeretik veszteségüket éves bontású térfogatáramban kifejezni, amely sajnos nem ad elég információt a hálózat adottságairól. Jelen esetben azonban a veszteségindex és annak Somos által a magyar településekre meghatározott értékei sokkal jobb információt adnak a csőhibák gyakoriságáról. A dolgozatomban segítséget nyújtó HDR tanszéken szignifikáns mennyiségű Sopron közeli hálózat adatai találhatóak meg, amelyeknek kutatási anyagokban való felhasználása engedélyezett. Mivel a (11) és (12) egyenletekben a szivárgás térfogatáramokkal van kifejezve, célszerű volt ezen veszteségindexből is térfogatáram jellegű mennyiséget képezni. Az (5) egyenletet emiatt a hálózat várható szivárgására rendezve a következő adódik:

$$q_{v_i} = \frac{q_v \cdot L}{3600000} \quad (14)$$

ahol $q_{v_i} [\frac{m^3}{s}]$ az i -edik hálózat szivárgási vesztesége, $L[m]$ a hálózat összes csövének hossza, $3600000 [\frac{s \cdot m}{h \cdot km}]$ pedig a mértékegységek átrendezése utáni osztó. Ezen egyenletet felhasználva már bármely, meghatározott veszteségindex-szel bíró hálózat szivárgása térfogatáramban kifejezve adott.

3.1.3. A kiömlési együttható kalibrációja

Miután egy összehasonlító érték a szivárgási modellhez kiegészítésképp adott volt, a becslést meg lehetett tenni a kiömlési együttható hálózatfüggő értékeire.

Az algoritmus kiépítésének első lépéseként a célfüggvény meghatározása következett. Ehhez célszerű volt a két érték összehasonlítása: a (14) egyenletből megkapott várható szivárgási értéket és a függvényben számolt szivárgást egymásból kivonva majd ezt abszolút értékbe téve megtehető volt a két eljárásból származó érték eltérésének vizsgálata. Ez megfelelt a Nelder-Mead algoritmusnak visszaadott tükrözött pont értékének:

$$f(x_n) = |q_{v_i} - q_{v_{megoldo}}| \quad (15)$$

ahol $q_{v_i} [\frac{m^3}{s}]$ a [23] cikkből a vizsgált hálózatra vonatkoztatott, $q_{v_{megoldo}} [\frac{m^3}{s}]$ pedig a hidraulikai megoldó által számolt térfogatáram.

Ehhez a hidraulikai megoldót ki kellett egészíteni egy, az összes hálózati cső hosszát összegző eljárással. Ezek után következhetett a soproni veszteségindexből visszaszámaztatott várható szivárgási érték meghatározása, melyet a (14)-es egyenlet adott meg, majd

pedig az iterációs eljárás, melyet a legjobb lokális eredmény megtalálása érdekében több nagyságrendű kezdeti értékkel volt szükséges futtatni.

Az eljárásban minden iteráción belül lefut a Nelder-Mead algoritmus. Jelen esetben az algoritmussal optimalizált függvénynek egy bemenete van, ez a kiömlési konstans értéke. Ennek az értéknek a segítségével a hidraulikai megoldó szivárgási számító része kiszámolja a szivárgást. Ezek után következett a két érték célfüggvénnyel való összehasonlítása, amelynek értéke a Nelder-Mead függvény kimenete is volt.

A becslés az iterációs eljárás futtatásával így megtörtént, a módszer munkára készen állt, az eredmények kiértékelése pedig megkezdődhetett.

3.1.4. Eredmények

Az első futtatások után hamar látszott, hogy a Nelder-Mead eljárásnak problémája van a nagyságrendekkel. A módszer hátránya, hogy egy kezdeti érték megadására van szüksége, amelyről aztán sikeresen tudja majd a változó valódi értékét közelíteni. Azonban ha a kezdeti érték és a meghatározni kívánt paraméter értéke között sok nagyságrendi különbség van, akkor a módszer nem konvergál megfelelően, vagyis nem tudja megfelelően közelíteni a megoldást.

Ezt legjobban egy iteráló ciklus tudta kiküszöbölni. Feladata az volt, hogy a szivárgás nagyságrendjéből kiindulva 10 darab nagyságrendben futtassa az optimalizációt, ezzel biztosítva a legjobb lokális minimum megtalálását. Az iteráció addig tart, ameddig a függvényérték el nem éri a kívánt tolerancia-szintet a minimumhoz képest. Jelen esetben a tolerált hibát a következőképpen választottam:

$$h = \frac{q_{v_i}}{100} \quad (16)$$

azaz a $q_{v_i} \left[\frac{m^3}{s} \right]$ szivárgás 1 százalékos eltérésén belülre.

Az eljárást minden kijelölt nagyságrendben lefuttatva becslést adott a kiömlési együtthatóra. A Nelder-Mead algoritmus stabilitását mutatta, hogy a vizsgálatot sorozatban háromszor megismételve ugyanazon numerikus eredményeket adta.

A bemutatott teszteléssel nyolc valós, Sopron közeli ivóvízhálózat kiömlési együtthatóját sikerült meghatároznom a további munkához. Ez azt jelentette, hogy nagyszerű számítási alap keletkezett amely ráadásul empirikus, mérnökiileg meghatározott adatokra támaszkodhat.

3.2. A szivárgás topológia alapú optimalizációjának módja

Miután a rendszert és annak szivárgását a felálló hálózati modell már jól leírja, a szivárgáscsökkentést célzó optimalizációs eljárás megvalósítása következett. Az irodalmi áttekintés során bemutatott okokból fakadóan, lévén a szivárgások lokalizációja hosszú és fáradságos folyamat, illetve a csövek kicserélése pedig nagy anyagi- és emberi erőforrás vonzatokkal járna, a szivárgás csökkentés eszközeként az ivóvízhálózatok topológiai optimalizációja került kiválasztásra. Ilyen volt például Giovanna Cavazzini [6] és társainak munkája is, akik nyomáscsökkentő szelepek lehelyezésében látták a szivárgás csökkentésének leghatékonyabb módját. A szelepek működését az A.3. sz. melléklet részletezi. Módszerük logikus alapokra épít, hiszen az [3]-es cikkben közölt (11) egyenlet alapján a nyomás emelkedésével a szivárgás is hatványfüggvényként emelkedik. Munkájuk során a professzorok három algoritmust is használtak, amelyek a már meglévő nyomáscsökkentő szelepek (PRV-k) beállítását optimalizálták, az átlagos hálózati nyomást csökkentették vagy egy új mérőszám, a Leakage Performance Index alapján optimalizáltak. Módszerükkel a hidraulikus modell szerint nagyjából 15-20 százalékkal tudták csökkenteni a hálózati szivárgást. A nyomáscsökkentő szelepekkel való topológia optimalizáció tehát már bizonyított útnak tűnt, ezért alkalmazása mellett döntöttem.

Azonban sem a magyar vízműveknél, sem pedig külföldön nem jellemző a nyomáscsökkentő szelepek ivóvízhálózati alkalmazása szivárgáscsökkentési célokra. E szelepeket csak és tapasztalataink szerint kizárólag olyan esetekben telepítik, ha azt az ellátott település geodéziája szükségessé teszi. Vagyis a jelentősebb szintkülönbségek okozta hidrosztatikus nyomásnövekmény átlépné a szerződéses maximális nyomásértéket. Ezen okból kifolyólag, az általunk vizsgált Nyugat-magyarországi hálózati modellek nem tartalmaztak eredetileg nyomáscsökkentő szelepeket. Munkám során mindössze a hálózati modellt vehettem kiindulási alapnak, melyet aztán a megfelelő szelepkiosztással bővítettem a szivárgás csökkentésére. Jelen fejezetben az optimalizációs eljárásokat, a kutatás során felmerült problémákat, valamint a módszerfejlesztés lépéseit mutatom be.

3.3. Szivárgáscsökkentés genetikus algoritmussal

A munka során a legnagyobb kihívást a PRV-k kiosztása jelenti. Minden ivóvízhálózat csövekből és csomópontokból épül fel, amelyek a modellezés során egy gráffá alakulnak. Mivel a PRV-k beépítési hely szerint csak csövekben lehetnek, ezért a keresési tér a hálózat

összes csőve lesz. Miután a csövek száma még egy kisebb hálózatban is 500-600 darab körül mozog, ezért lehetetlen végigszámolni az összes PRV-kiosztási lehetőséget belátható időn belül, lévén az kombinatorikai robbanáshoz vezet a keresési térben. Ezért célszerűnek láttam egy, a kiosztást gyorsító algoritmus alkalmazását, ez pedig a szakirodalomban is említett genetikusan algoritmus. A genetikusan algoritmus működésének bemutatása az A.2. számú mellékletben található.

3.3.1. A genetikusan algoritmus használata és eredményei

A szivárgáscsökkentésben a genetikusan algoritmus használata a következőképpen történt. Bemenete a PRV-k helyei voltak aszerint, hogy melyik csővezeték mely részére került lehelyezésre a szelep. A letett elemek száma előzetesen került meghatározásra, egy külső változóban tárolva, ezáltal is növelve a program felhasználóbarát kialakítását. Célfüggvényként a szivárgási modell által visszaadott szivárgási érték és kieső fogyasztói hányad lineáris kombinációja szerepelt. Mivel a kieső hányad alacsonyabban tartása sokkal inkább élvez prioritást, mint a szivárgás csökkentése, ezért ez a következőképpen alakult:

$$f(\mathbf{X}) = L(\mathbf{X}) + 9 \cdot ld(\mathbf{X}) \quad (17)$$

ahol $L[\frac{m^3}{s}]$ a szivárgás, $\mathbf{X}$ a bemenő, PRV-k helyzetét tartalmazó vektor, $ld[-]$ pedig a kieső fogyasztói hányad. A célfüggvény meghatározásában a cél a szivárgás abszolút minimumon tartása volt, mindezt a keresési térben lévő, nem szignifikáns fogyasztói hányad kieséssel járó megoldások előnyeinek megőrzésével téve. A program elkészülte után megkezdődött annak valódi hálózatokon történő tesztelése, valamint a genetikusan algoritmus paramétervizsgálata.

Az első eredmények és futtatások kiértékelése után látható volt, hogy bár az algoritmus működik és konvergál, valamint sikerül stabil megoldást hoznia kevés (mindössze 1-2) PRV hálózatba építése esetén, azonban több szelepnél már konvergencia problémákba ütközik. Ez amiatt meglepő, lévén az első tesztek alatt, a genetikusan algoritmus csupán a nyomáscsökkentő szelepek helyét optimalizálta, azok beállítása rögzített volt. Minden szelepet 10 méteres nyomáscsökkenéssel feltételeztem, így ezen beállítással kerültek a hálózatba beépítésre. Ennek oka az volt, hogy először a genetikusan algoritmust, egy jól kondicionált és kedvező célfüggvénnyel szerettem volna tesztelni. Ezzel szemben azonban bebizonyosodott, hogy a csőazonosító mint módosítható paraméter - témavezetőm korábbi kutatásaihoz igazodóan [14] - ismételtelen egy rosszul kondicionált, nehezen kereshető célfüggvényt eredményez.

Mivel jelen esetben a csövek száma és helye diszkrét változóként került a modellbe, a PRV-k beállítása pedig egy folytonos változót képez egy tág tartományon belül, ezért együttes vizsgálatuk csak tovább bonyolított volna egy alapvetően rosszul kondicionált célfüggvényt. A jobb eredmények elérése érdekében tehát megkezdtem a kiértékelést és a paramétervizsgálatot.

A szivárgás-csökkentéshez használt genetikus algoritmus paraméterei széles skálán mozoghatnak. Elsőként a **populáció** számának értékelését végeztem el. A tesztelés 25,50,75,100 és 125-ös egyedszámmal futott, amelyekhez 3db lehelyezett PRV-t használt. A 10a ábrából egyértelműen kirajzolódott, hogy a populáció számának növelése nem okozott sikeresebb konvergenciát, ugyanakkor nem készítette szignifikánsan nagyobb futásidőre a programot. Figyelembe véve, hogy a nagyobb populáció diverzitásra több szelep lehelyezése esetén nagyobb szükség lehet, a paramétert 100-ra választottam.

A generációk számának vizsgálata következett, melyhez a **maximális javulás nélküli iterációszám** változtatására volt szükség. A hasznos konvergencia megtartása érdekében az iterációszám felső határának definiálása helyett ez előbbi alkalmazása a célravezető. Mivel az egyes eredmények között szignifikáns különbség nem volt várható, ezért a vizsgálat célja a beállítás nagyságrendjének meghatározása volt. Így $x \in [0, 4]$ tartományban a tesztek eredménye a 10b ábrán látható. Az első nagyságrend, amely hatásos konvergenciát biztosított, az $x = 2$ volt. Ezért a maximális javulás nélküli iterációszámot 100-nak választottam.

A **mutáció** és a **keresztezési valószínűség** szintén a genetikus sodródás megakadályozására használatos, keresési tér bővítésére való paraméterek, elemzésük a $x \in [0, 1]$ tartományon a 10c és 10e ábrákon látható. Miután semelyik változónál nem rajzolódott ki egyértelmű trend, ezért az iterációk számának alakulása is ábrázolásra került a paraméter értékének függvényében (10d és 10f ábrák). Erre és a szakirodalomra támaszkodva a keresztezési valószínűséget 0.9-nek, a mutációs valószínűséget pedig 0.3-nek választottam.

Az elitek bevezetésének jelen esetben mindössze a legjobb eredmény megőrzése céljából van értelme. Éppen ezért elég egyetlen elitet hagyni a populációban, ez 100-as egyedszámnál pedig 1db, azaz a paraméter értéke 0.01-re adódik.

Az egyik legsarkalatosabb pontja a paraméterek választásának a szülők részarányának definíciója. A túl kicsi szám esetén a bővülő keresési tér az eredmények elvesztését jelentené, túl nagy értéke esetén pedig a genetikus sodródás jelensége lépne fel. Ez egy

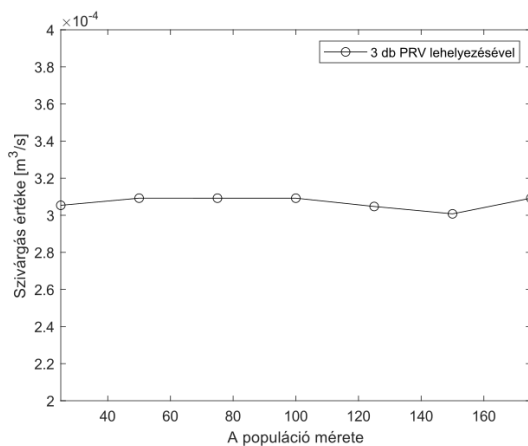
olyan, a valóságban is tapasztalható törvényszerűség, amely a bennfentes egyedcsoportok esetén a változatosság hiánya miatt gyenge populációt eredményez. A paraméter értékei $x \in [0, 1]$ között változik, teszteredményei a 21a ábrában láthatóak. Mivel a szivárgási és a konvergenciaszámból adódó értékek a 0.3 és 0.8 közötti tartományban voltak biztatóak, a szakirodalmat alapul véve a 0.3-as paraméterérték választása mellett döntöttem.

A keresztezésnél az előző alfejezetben ismertetett három típus közül a szivárgáscsökkenésre legalkalmasabbra volt szükség. Ennek elemzése a 21b ábrán látható, amelyből kiolvassva a 'two-point' és a 'uniform' típus tűnt alkalmasnak a továbbhaladásra. Mivel a hasonló optimalizációs problémák esetére az általános, 'uniform' típus használatos, ezért jelen helyzetben is ez alkotta a paraméterek sorát.

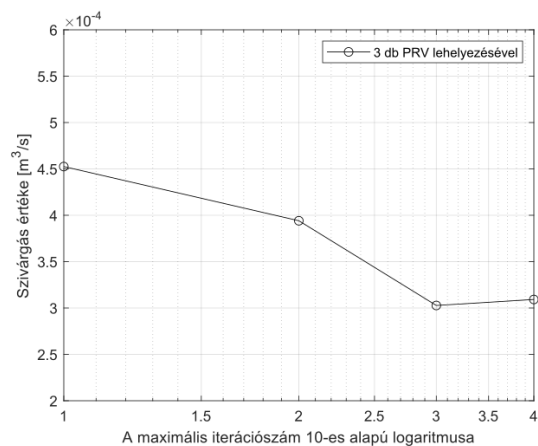
A paramétervizsgálat eredményeit összefoglalja a 3.táblázat, a paramétervizsgálat kiértékelésének folyamatát pedig a 10. ábra szemlélteti.

Paraméter neve	Populáció	Maximális javulás nélküli iterációszám	Mutációs valószínűség
Paraméter értéke	100	1000	0,3
Paraméter neve	Keresztezési valószínűség	Keresztezés típusa	Szülők részaránya
Paraméter értéke	0,9	'uniform'	0,3
			Elitek aránya
			0,01

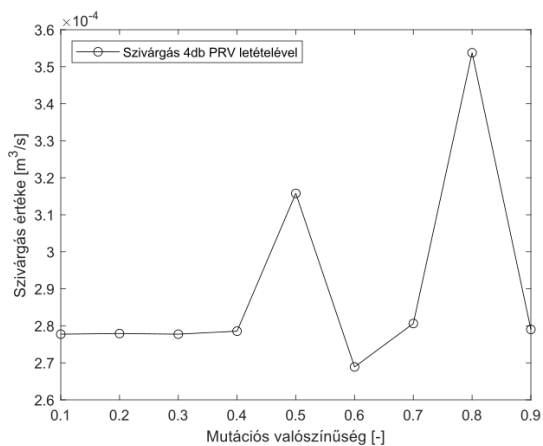
3. táblázat. A genetikus algoritmus paraméterei



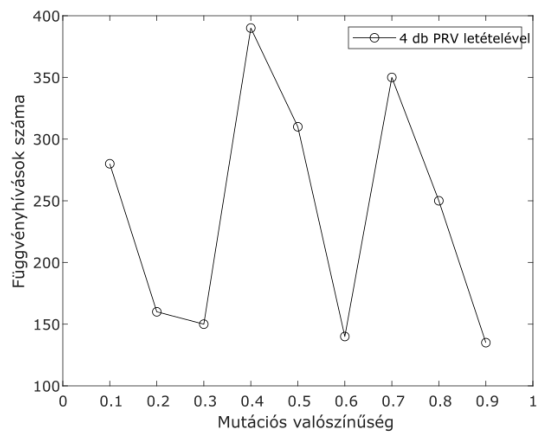
(a) A populációméret



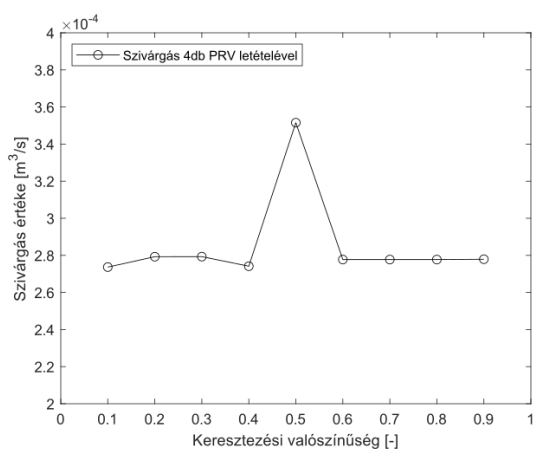
(b) A maximális, javulás nélküli iterációszám



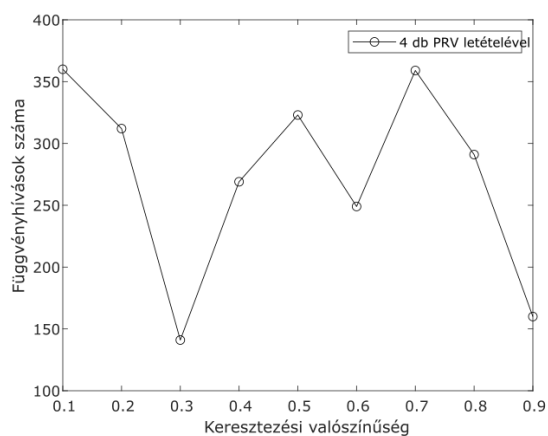
(c) A mutáció



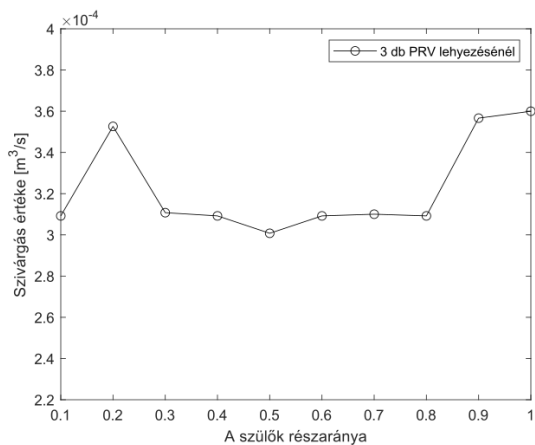
(d) A mutáció konvergenciája



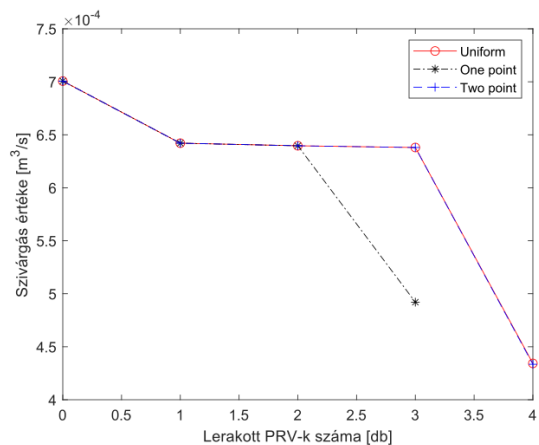
(e) A keresztezés



(f) A keresztezés konvergenciája



(g) A szülők részaránya

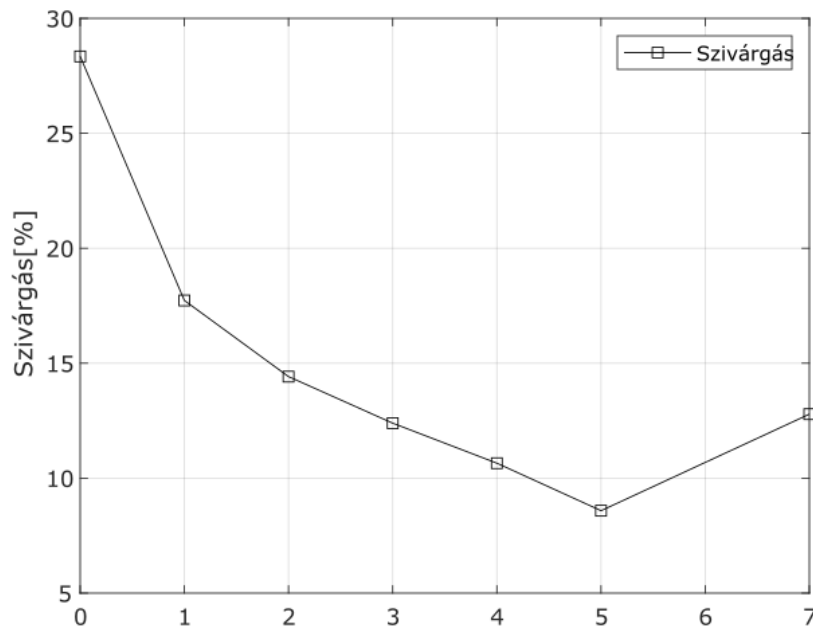


(h) A keresztezés fajtája

10. ábra. A genetikus algoritmus paramétereinek hatása az elért szivárgásra

3.3.2. A genetikus algoritmus eredményei

A paraméterek hangolása után megkezdődhetett a szivárgáscsökkentés kiértékelése. A futtatás során egy valóságos hálózatot vettem alapul. Az eredményeket a 11. ábra szemlélteti:



11. ábra. Szivárgás a balfi hálózaton adott számú PRV beépítésével

Az ábrán az x tengelyen a beszerelni kívánt PRV-k száma, míg az y tengelyen a teljes fogyasztáshoz képest elszivárgó víz modell szerinti hányada áll százalékban. A szakirodalomban több cikk is 15-20 százalék közötti szivárgáscsökkenésről számolt be. Az ábráról leolvasható, hogy a genetikus algoritmus által alkotott módszer ezeket jóval túlszárnyalja, hiszen a mintahálózaton már 2 darab nyomáscsökkentő szelep beépítésével is nagyjából felére csökken a rendszer szivárgása. Ez ugyanakkor adódhat a megnövekvő kieső fogyasztói hányadból is. Jelen esetben a fogyasztói hányad vizsgálatának ábrázolása nem történt meg, mert a futtatások több olyan kérdést is felvetettek, amelyek nélkül is megkérdőjelezték a módszer mérnöki alkalmazásának lehetőségét.

Ezt a 11. ábra szemléletesen mutatja. A szivárgási görbe több PRV beépítésénél furcsa irányt vett, 5db szelep elméleti elhelyezésével adta a legkisebb szivárgást, 6 darabnál többszöri próbálkozás után sem adott eredményt, 7 darabnál pedig egyenesen nőtt a szivárgási érték. Ennek oka a keresési tér exponenciális bővülése. Miután Balf esetén

378 db cső elejére vagy végére helyezhető el szelep, azaz 756 lehetőség van a beépítésre, ebből a módszer 6-7 darabot kiválasztva egy rettentően nagy teret definiál, amelyben nem képes megtalálni a legjobb megoldást, a futási idő pedig hatványfüggvény szerint nő. Ugyanakkor az egyre gyengébb megoldásoknak és a nem egyenletes konvergenciának köszönhetően instabilitás volt tapasztalható, mégpedig a hálózati modell számításai jeleztek hibát. A genetikus algoritmus ugyanis a csövek számainak diszkrét mivolta miatt nem tud megfelelően konvergálni. Ennek egyik oka a csövek kiosztásának véletlenszerűsége. Ezt legjobban egy példával lehetne érzékeltetni: tegyük fel, hogy az algoritmus egy adott hálózat 3. csövére virtuálisan beépíti a szelepet. Ekkor a genetikus algoritmus keresi azon lehetőségeket, amikor is a függvény kisebb értékeket vesz fel. Az optimális megoldás legyen a 6. csövön. Ekkor a 4. és 5. csövet is át kellene ugrania ahhoz, hogy a konvergencia teljesüljön. Azonban ezen csöveknek értékei olyannyira nagyok lehetnek, hogy az ezirányú öröklődést meggátolják. Ez a konvergencia instabilitását eredményezheti, amely pedig számítási hibákhoz vezethet. Mindezek miatt néhány esetben az instabilitás olyannyira problémás jelenséggé vált, hogy a módszer a 6 darab PRV-vel való futtatás során ötszöri újrapróbálkozás után sem adott értékelhető eredményt. Ez sajnos méginkább jellemző volt a nagyobb hálózatokra, Vashegyen például az ott lefektetett 1571 cső annyira nagy teret képez, hogy 3 darab szelep lerakása is gondot jelentett az algoritmusnak, 2 darabnál pedig csaknem 20 percig futott. Mindezen tényezők mellé figyelembe kellett venni a további bővítési lehetőségek sorát is. A genetikus algoritmus sajnos nem alkalmas diszkrét és folytonos változók együttes vizsgálatára, éppen ezért a szelepek csak egy előre meghatározott, optimalizálatlan beállítással futottak, amely sokszor nagy hányadkiesést generált. Ez utóbbit a legkönnyebb kijavítani, hiszen egy újabban definiált genetikus algoritmussal a nyomásbeállítások optimalizációja is megvalósítható, mint ahogyan ezt felhasználom majd a munkám későbbi szakaszában is.

A genetikus algoritmussal alkotott módszer tehát minden igyekezet ellenére sem mondható univerzálisnak és felhasználóbarátnak. Sajnos nagyobb hálózatok esetén olyan nagyra növekszik futásideje, illetve konvergenciája sem biztosított. Ezen két paraméter összessége ellehetetleníti használhatóságát ipari szempontból. Mindezek hatására a módszer újragondolása mellett döntöttem, és egy olyan algoritmus megtalálását tűztam ki célul, amelynek implementálása stabil és gyors konvergenciát, kisebb számítási igényt és rövid

futási időt biztosít. Ezen kritériumok mindegyike igaz a következő fejezetben bemutatott módszerre: a klaszterezésre.

3.4. Szivárgáscsökkentés klaszteranalízissel

A klaszteranalízis egy olyan elemzési technika, amely egy adathalmazt több, homogén csoportra képes klasszifikálni. Ezen adathalmaz-csoportokat nevezzük klasztereknek. Az egyes klasztereken belüli elemek általában valamilyen adatuk alapján hasonlítanak egymáshoz, ilyen lehet például a távolság, vagy az elemekhez rendelt súlyok. A klaszterezés annál jobb, minél homogénebb csoportokat tud kialakítani a bemenő adathalmazból.

A klaszteranalízist nagyon sok helyen alkalmazzák. Ilyenek többek között a különböző képfelismerő szoftverek, ahol a képen található élek vagy tárgyak különíthetők el ilyen módon. Népszerű használata a biológiában, ahol különböző fajok heterogén környezetben való életét tudja követni, vagy az orvoslásban, amikor az antibiotikumok antibakteriális hatásait kívánják feltérképezni. Széles körben elterjedt az üzleti és a társadalomtudományi szférában is, előbbinél piackutatásokat, utóbbinál pedig szociális vagy bűnelemzési szempontoknak megfelelően használható az algoritmus.

A genetikus algoritmus futási- és konvergencia-problémái miatt a cél a klaszteranalízissel olyan homogén nyomáscsökkentő létrehozása volt, amelyek széleire nyomáscsökkentő szelepeket helyezve a szivárgás értéke a zónákon belül és így az egész hálózaton is jelentősen csökken. Miután a klaszterezés megtörtént, a klasztereket megvizsgálva a csővezetékkel összekötött, de külön klaszterben elhelyezkedő csomópontok közé PRV-ket helyeztem le. Ezzel elvárásaim szerint teljesül a homogén nyomáscsökkentő létrehozása, amelyekkel a leghatékonyabban csökkenthető a szivárgás. Mivel a szelepbeállítások optimalizációjára a klaszterezési algoritmusokon belül nincsen lehetőség, ezek maradtak a genetikus algoritmusnál is használt 10 méteres értékek minden PRV-re.

Jelen esetben a klaszteranalízist az ivóvízhálózati gráf csoportokra bontásánál érdemes megvizsgálni. Miután az algoritmus alapvetően gráfstruktúrák felismerésével és gráf-pontok összekötésével dolgozik, a kutatásban felhasznált ivóvízhálózatok modellje pedig gráfként áll elő, ezért implementációja és a hálózati modell klaszterekre bontása megvalósítható. A használandó algoritmusról azonban a bő kínálat miatt nehéz volt dönteni. A lehetőségek elemzése után választásom a Leiden-algoritmusra esett. A klaszterezési technikákat és a Leiden-algoritmust az A.4. melléklet mutatja be.

3.4.1. A klaszterezés előnyei és felvetett problémái

A klaszterezés fő feladata azon megoldások megtalálása volt, amellyel hatékony nyomáscsökkentés útján szivárgáscsökkentés indulhat meg a hálózatban. Miután a genetikus algoritmus már akár 6-7 darab nyomáscsökkentő szelep kiosztásánál a megnövekedett futási ideje és problémás konvergenciája miatt nehezen volt használható, a klaszterezés futásideje és stabilitása nagyszerű eredményeket hozott. A klaszterek számától és a hálózatok nagyságától függően ugyan a futási idő változott, de minden esetben 5 másodperc alatt volt. Természetesen a tesztelés során csak magyarországi ivóvízhálózatokat vizsgáltunk, de minden esetben - Balf, Tómalom és Villasor településeken - a módszer helyessége igazolódott. Így elmondható, hogy a módszer működésének megbízhatósága a topológiától független (legalábbis a vizsgált területen biztosan).

Azonban egy hátránya mégis volt a klaszteranalízisnek a genetikus algoritmussal szemben, ez pedig a PRV-k félig meghatározott helyzete volt. Miután az eljárás csak a klasztereket tünteti fel végeredményében, beépítésre került egy olyan programkiegészítés, amely kinyerte az ehhez virtuálisan elmetszett éleket. Azonban az élekkel még nem volt teljesen meghatározva a szelepek helyzete. Gyakorlati szempontból megközelítve a problémát, a különböző csomópontoknál található aknákat, tolózárakat vagy egyéb elemeket a szignifikánsan sűrű beavatkozások miatt könnyebb elérni mint a hálózat bármely más részét. Éppen ezen könnyebb hozzáférhetőség miatt a PRV-k csomópontok közelébe való beépítése a legegyszerűbb és legolcsóbb megoldás. Ez minden csövön két megoldási lehetőséget eredményez, amelynek vizsgálata klaszteranalízissel nem volt megvalósítható. Lévéen a klaszterezés mint az optimalizáció első lépése lefutott, ezért már csak az elvágott éleknek megfelelő csöveket kellett a PRV-k lehelyezése szempontjából vizsgálni.

Miután a keresési tér ebben az esetben 2 hatványaival bővül, ezért nem éreztem szükségesnek bármilyen optimumkereső algoritmus használatát. Ebből fakadóan került egy olyan iteráló algoritmus bevezetésre, amely minden esetben megvizsgálta az összes elvágott csőre való lehetséges PRV-kiosztást célfüggvényként a szivárgás és a kieső fogyasztói hányad lineáris kombinációját használva. Célja az volt, hogy a klaszterezés által adott megoldások közül a szivárgás szempontjából a kieső fogyasztói hányad figyelembe vételével a legjobb kiosztást válassza ki. A dolgozat további részében az algoritmusra 'varianciamódszer'-ként referálok.

3.4.2. A nyomáscsökkentő szelepek beállításai

A szivárgásnak ebből a szempontból való vizsgálata elengedhetetlen volt az optimalizáció teljességéhez. Mivel a lehelyezett PRV-k beállításai az alkalmazott eljárások korlátai miatt egy előzetes konstans értékben kerültek megállapításra, az algoritmus konvergenciájának szűk határok között kellett jól mozognia. Mivel mind a genetikusan algoritmusnál, mind a klaszterezésnél a kieső fogyasztói nyomások (sokszor az összes fogyasztó esetében) nagy mértékben voltak a szabványos 1,5 bar-os határérték alatt, a cél a beállítások megtalálása mögött az volt, hogy a legkisebb kieső fogyasztói hányadok közül a legkisebb szivárgási értékűt megtalálva optimális megoldást szolgáltatasson.

Miután a keresési tér így a PRV-k számainak megfelelő dimenzióban volt értelmezve és a kiadott függvénynek számtalan lokális minimumhelye volt, a Pythonban alkalmazható globális optimalizációs algoritmusok alkalmazása tűnt célszerűnek. A célfüggvény nemlinearitása következtében a deriváltjai jelen esetben sem voltak ismertek, így az erre épülő módszerek sajnos nem voltak használhatóak. Az így maradt eljárások közül a függvény bonyolultságából adódóan a genetikusan algoritmusnál is alkalmazott evolúciós megközelítést éreztem célszerűnek. A leszűkített megoldások köréből a *scipy*-csomagban lévő differenciális evolúciós algoritmus [20] bizonyult a legmegfelelőbbnek. Ennek bemutatása a A.5. sz. mellékletben látható.

3.5. A szivárgás optimalizációjára kidolgozott módszer összefoglalása

Legvégül szeretném összefoglalni a kidolgozott módszert, amellyel a kiértékelés során dolgozni fogok.

Első lépésként a kiömlési konstans kalibrációja történik a vizsgálni kívánt hálózatra. Ezen hálózat modellje, nyomásfüggő fogyasztási és szivárgási bővítménye előzetesen már fel lett véve a Staci nevű programmal. A kiömlési együttható meghatározásával a szivárgási számításokhoz egy alapkálibráció kerül elvégzésre, amely teret nyit a nyomáscsökkentő szelepek által indukált szivárgáscsökkenésnek.

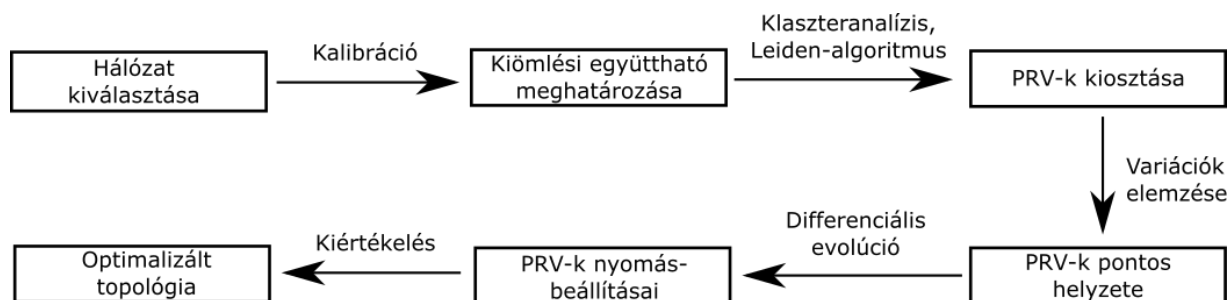
Másodszorra következik a nyomáscsökkentő szelepek kiosztása. Itt a cél olyan homogén nyomászónák körülhatárolása, amelyeken a PRV-k nyomáscsökkentő hatása érvényesülni tud és ezáltal a szivárgást is csökkenti. A körülhatárolás az úgynevezett klaszteranalízissel történik, amely praktikusán gráfok pontjainak csoportokba rendezését jelenti. Az így kialakult klaszterek alkotják a homogén nyomászónákat. A klaszterezési algoritmusok közül a Leiden-módszer bizonyult a legmegfelelőbbnek, amely a hierarchikus klaszterezési eljárások csoportján belüli agglomeratív klaszteranalízissel keres megoldást. A klaszterek számát a felbontási paraméterrel lehet változtatni. A klaszterezési megoldás a homogén nyomászónákat a gráfok pontjainak klaszterekbe rendezésével teszi meg, ehhez pedig a gráf éleit vágja el. Az elvágott élek a hálózatban a csöveket jelentik, az elvágott hely pedig azt a csövet, amelyre a nyomáscsökkentő szelepet beépíteni szükséges. Az így létrehozott kiosztást ezek után a módszer további elemzéseknek veti alá.

A nyomáscsökkentő szelepek beépítési pozíciói így csövenként vannak meghatározva. A praktikus beépítés miatt ezen szelepeket érdemes a csomópontok közelébe helyezni, amely a gyakorlatban a csövek elejét vagy végét jelenti. Ezen kiosztásokat egy variációs algoritmus minden lehetséges beépítési variációra végigszámolja és legvégül a legkisebb kieső hányad és szivárgás kombinációt örökíti tovább a vizsgálatok befejezésére.

Legvégül már csak a PRV-k beállításai maradtak vissza, ezeknek beállítását egy, a genetikus algoritmushoz nagyon hasonló módszer, a differenciális evolúció végzi. A cél újra a legkisebb kieső fogyasztói hányad és szivárgás összeg meghatározása, amelynek minimumát az algoritmus végül eredményül adja. Ezen végső eredmény tartalmazza a PRV-k pontos pozícióját és nyomásbeállításait, valamint kijelzi az optimalizáció után kapott szí-

várgást és a kieső fogyasztói hányadot is.

A létrehozott algoritmus folyamatábrája a 12. ábrán kerül szemléltetésre.



12. ábra. A létrehozott módszer folyamatábrája

4. Kiértékelés és eredmények

4.1. A klaszterezés eredményei

Elsőként a genetikus algoritmus hibáit kijavító klaszteranalízis eredményeit szeretném bemutatni. Az algoritmus Pythonban elérhető verziója lehetőséget adott az eljárás vizsgálandó hálózatokba való integrálására, erre az *igraph* gráfelméleti programcsomag adott lehetőséget. Bemenő adatsora természetesen az éppen vizsgált hálózati modellből képzett gráf, az optimalizálás céljául szolgáló célfüggvénye pedig az (18) egyenletből képzett Konstans Potts-Modell vagy a modularitás.

A gráf beadott súlyai különbözőek lehetnek. Miután célom a csomópontok közötti élek közül olyanok kiválasztása, melyekre nyomáscsökkentő szelepek lehelyezésével homogén nyomáshozókat létrehozva csökkenjen a hálózati szivárgás, célszerűnek láttam a gráf pontjait vagy éleit súlyozni a nyomásuk illetve nyomásveszteségük alapján. Ezért a szivárgási modellből számított csomóponti nyomásokkal dolgoztam.

Első lehetőségként csak a csomóponti abszolút nyomásokat vettem alapul. Ez azért lehetett jó megoldás, mivel így lehetősége volt az algoritmusnak olyan nyomáshozó létrehozására, amelyeknek nyomásait nagyjából azonos értékek lévén könnyen lehetett együttesen csökkenteni. Miután a Staci szoftver a csomóponti nyomásokat egyébként is végigszámolja a hálózati modellezés közben, súlyként való használatuk kézenfekvő volt.

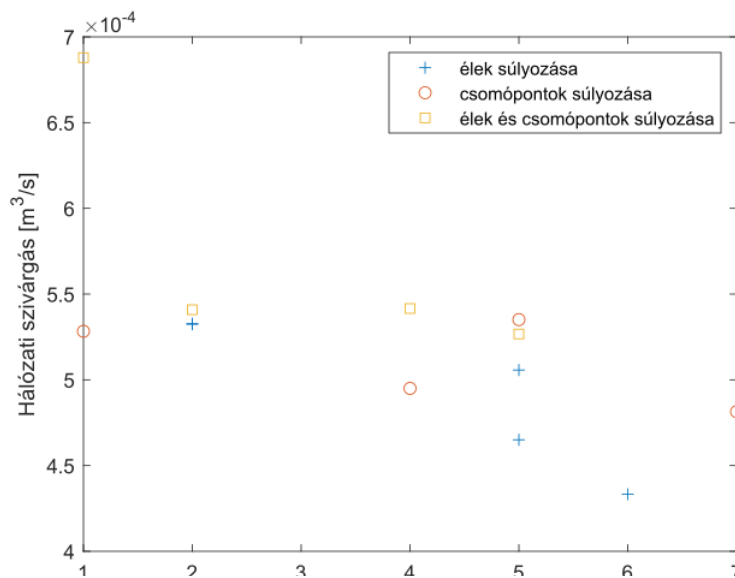
Második opcióként az éleken történő nyomásveszteséget vettem súlyozó tényezőnek. Miután a szivárgás általában a csövekben történik, amelyek a hálózati gráfmodellben élekként vannak reprezentálva, az éleken kialakuló nyomásváltozás vizsgálata célszerűnek tűnt. Minél nagyobb ugyanis e változás, annál hosszabb vagy rosszabb minőségű csövekkel van ellátva a rendszer és annál inkább hajlamos a szivárgás jelenségére. A feladathoz elsőként generálva lett egy lista, amely a csövek számához rendelte a kezdő- és végcsomópontjuk számát, nyomásértékeit és abszolút értékben vett nyomáskülönbségét. Ez utóbbira azért volt szükség, mivel a Leiden-algoritmus negatív súlyokat sajnos nem tud értelmezni. Miután azonban a nyomáskülönbség előjele csak az áramlás irányától függ, a megoldás következő lépéseként pedig a PRV-k a cső elejére vagy végére való lehelyezésével ez egyébként is figyelembe lesz véve, ez nem rontott a megoldások minőségén.

A harmadik lehetőség a két megoldás ötvözése volt. Mivel a Leiden-algoritmus klaszteranalízisét az éleire és a pontjaira adott súlyokkal is lehetett befolyásolni, ezért

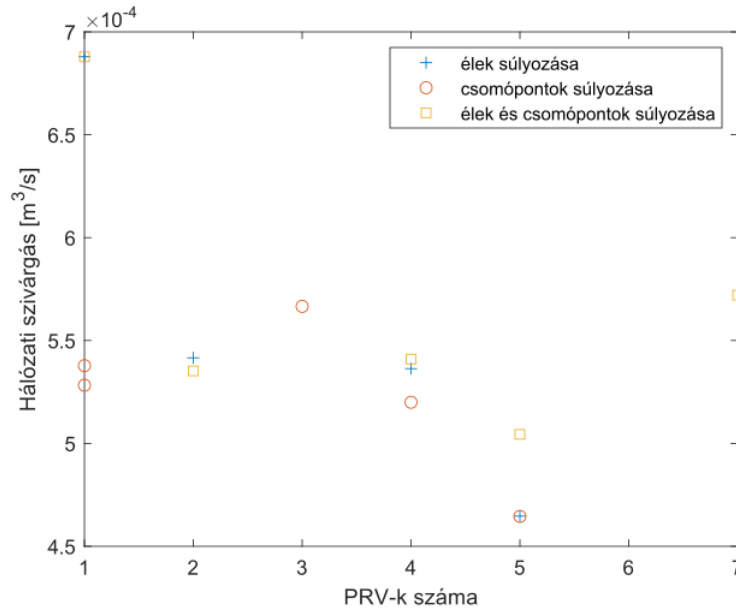
mindkét megoldás ötvözése kézenfekvő volt.

Az így történő szivárgáscsökkentést Balf hálózatán elemeztem ki. Miután a γ felbontási paraméter megváltoztatása közvetlenül a klaszterek számát befolyásolja, ezért az elvágott élek számát csak közvetetten lehet beállítani. Emiatt nem lehetséges bármilyen számú PRV beépítésének beállítása. Mindezek ellenére a tesztelés egyértelmű eredményeket adott, amelyek a 13. ábrán láthatóak.

A 13a ábrán látható a modularitás, a 13b-n pedig a Konstans-Potts módszerrel alkotott megoldások. Miután a fogyasztói hányad kiesést a differenciális evolúciós algoritmus segítségével minden esetben sikerült az eredeti értéken tartani, így elegendő volt a szivárgás szempontjából vizsgálni az eredményeket. Jól látszik, hogy a modularitás célfüggvénye a szivárgáscsökkentés szempontjából szignifikánsan jobb PRV-kiosztást eredményez, mint a CPM-algoritmus. A súlyozások közül pedig ugyan az eredmények igen diverzen alakulnak, a kizárólag a gráfélek nyomásveszteséges taggal való súlyozása a legstabilabb és legkifizetődőbb módszer. Emiatt a modularitás célfüggvény használata, illetve a gráfélek súlyozása mellett döntöttem.



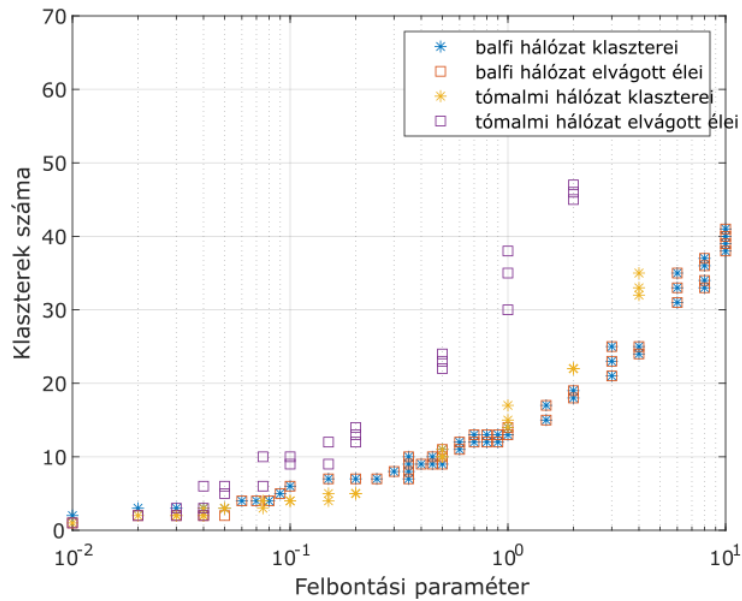
(a) Modularitás



(b) CPM

13. ábra. Súlyozás különböző célfüggvényekkel és nyomásokkal

Ezek után elemeztem a felbontási paraméter változtatására adott választ. Ezt a 14. ábrán szemléltetem. Az x -tengelyen a felbontási paraméter logaritmikus értékei látszanak, az így kirajzolódó enyhe linearitásból a felbontási paraméter klaszterszám függvényében exponencialitás lelhető fel. Jól látszik az is, hogy a felbontási paraméter változtatásával nem lehetséges tetszőleges számú él elvágása, mivel a klaszteranalízis célja nem ez, hanem a minél homogénebb klaszterek létrehozása. Az algoritmus sajátosságához hozzátartozik, hogy egyetlen paraméterhez nem mindig ugyanaz a klaszterszám, ezáltal pedig nem ugyanaz az elvágott élszám tartozik. Ez ugyan gondot okozhat a kiértékelésnél, azonban megfelelő számú futtatással az eredményekben jelentkező fluktuációt ellensúlyozni lehet. Éppen ezért úgy döntöttem, hogy minden kiértékelendő hálózathoz 10-10 db tesztelést rendeljek.



14. ábra. Súlyozás különböző célfüggvényekkel és nyomásokkal

4.2. Kiegészítő programrész a szelepek pontos lehelyezéséhez

Miután a klaszterezési metódusok közül kiválasztásra került a legmegfelelőbb célfüggvény és súlyozás, a PRV-k helyének pontos meghatározását tűztem ki célul. Az első tervek között az szerepelt, hogy a mechanizmussal a szivárgást célfüggvényként használva a leg-minimálisabb hálózati vízvesztéseget örökítse tovább a differenciális evolúciós algoritmus-ba. Azonban a sokszor nagyszámú kieső fogyasztó miatt ez a megközelítés zsákutcának bizonyult. A tesztelésnél ugyanis világosan látszott, hogy sok esetben ugyan a szivárgás lecsökken, de a nagy kieső fogyasztói hányadot az evolúciós algoritmus nem tudja kezelni, ezáltal pedig a valóságtól nagyon távol álló és az optimalizáció szempontjából rendkívül gyenge eredményt adott.

A célfüggvény hibájából tanultva a legjobb megoldás ezért a két érték kombinálása volt. Első lehetőségként az azonos nagyságrendbeli értékek összeadása volt kézenfekvő. Ekkor a PRV-k adott behelyezésével kapott szivárgásérték leosztásra került a megfelelő eredeti értékkel. Miután számtalan hálózaton azonban az eredetileg is kieső fogyasztói hányad értéke zérusra adódott, a módszer mérnöki alkalmazhatósága megkérdőjeleződött.

Tovább gondolkodva második opcióként a két érték lineáris kombinációja volt kézenfekvő. Így egyfajta automatikus súlyozás is létrejöhett, hiszen a kieső fogyasztói hányad értéke mindig 0 és 1 közötti, míg a szivárgás hálózatfüggő mértéke nagyságrendekkel ki-

sebb. Így minél nagyobb egy hálózat, annál nagyobb súlyt kap a szivárgáscsökkentés. Emellett így az algoritmus legjobb megoldása konvergencia szempontjából elsődlegesen a zérus vagy nagyon kicsi fogyasztói hányad kiesést részesíti előnyben. Ha ez az érték nagyjából konstans szinten megáll, amely leggyakrabban a nulla értéknél szokott megtörténni, akkor már csak a legkisebb szivárgás szerint kerülnek súlyozásra a megoldások. Az így tesztelt algoritmus nagyszerűen állta a futtatásokat és megbízható eredményeket adott.

4.3. A PRV-k nyomásbeállításainak optimalizációs eredményei

Soron következő optimalizálandó paraméter a nyomáscsökkentő szelepek optimális beállítása volt. Miután az ehhez használandó algoritmusnak is célfüggvényre volt szüksége, legfőképpen ennek meghatározása volt a fő szempont a futtatások során. Előzetes tervem az volt, hogy a PRV-k szivárgásminimalizáló optimumkeresése után a nyomáscsökkentő szelepekkel csak a kieső fogyasztói hányad zérus értékre való levitele adódott kézenfekvő célként. Azonban az előző alfejezetben is bemutatott hibák miatt ezt a megoldást el kellett vetnem. Miután ott a kieső fogyasztói hányadot sokkal inkább figyelembe veszi az előző algoritmus, mint a szivárgás csökkentését, ezért az újabb elvesző fogyasztói hányad csökkentés értelmetlennek bizonyult volna.

Ezért célfüggvényként a két értéknek újfent a lineáris kombinációja került beállításra. Ez az előző fejezetben is boncolt megfontolásokból került megállapításra. A kapott eredményeket a következő alfejezetekben található esettanulmányokban mutatom be és elemzem.

4.4. Esettanulmányok

A kiértékelés során három valódi hálózaton került tesztelésre a módszer. Mivel a megközelítés csak elméleti lépéseket tartalmaz, fontos megemlíteni hogy ugyan a hálózati modellezés már kiforrott eljárásnak tekinthető, a szivárgás irodalmában nincsen konszenzus arról, hogy mely modellezés vagy szivárgáscsökkentési módszer a legmegbízhatóbb és közelíti a valós eredményeket a legjobban. Éppen ezért a kapott eredményekből mindössze nagyságrendi következtetések levonását tartom célszerűnek.

Hálózat neve	Csomópontok száma $[db]$	Összegzett csőhossz $[m]$	Összegzett fogyasztás $\left[\frac{l}{perc}\right]$	Kiömlési együttható $\left[\cdot 10^8 \left[\frac{m^5}{kg}\right]\right]$	Alapszivárgás $\left[\frac{l}{perc}\right]$
Balf	378	5096	148,31	2,9375	41,13
Tómalom	1293	17623	102,55	2,515625	140,61
Villa-sor	7188	97285	8986,44	2,865625	777,912

4. táblázat. A vizsgált hálózatok bemutatása

A három hálózat sajátosságait mindazonáltal az 4. összefoglaló táblázatban szeretném bemutatni. Mindhárom Sopron városához közeli vagy éppen Sopronon belüli hálózat, a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék és a Soproni Vízművek együttműködéséből származó hálózati modell.

4.4.1. Balf hálózata

A vizsgált hálózatok közül a legkisebb Balf hálózata, amely 12 perces autótúra található Sopron belvárosától. Balf a Fertő-térség egyik jelentős települése, vizei nagy múltú tekintenek vissza. Már Kr.u. 180-ban írott források említik, hogy a balfi gyógyvizet a rómaiak is használták. Sopron város lakói a középkor végétől kezdték el használni az itteni fürdőt, amelynek gyógyvize mára sok területen kerül kihasználásra. 1560-tól új fürdőépületeket emeltettek és számos nemesi és főnemesi család felkereste a fürdőt. Az 1631-ből származó kézirat szélesebb körben is népszerűsíti a gyógyhelyet, és mind fürdésre, mind ivókúrára alkalmas vizét. Azóta kisebb-nagyobb megszakításokkal, de folyamatosan üzemel. A balfi víz hírneve mindig a kényszerforrásokon alapult, gyógyvíznek nyilvánították. Palackozását már 1900-tól megkezdték, ásványvízként 1980-tól ismerik el.

Az alig ezer főt számláló falu hálózatát 378 csomópont és mindössze 6 kilométernyi cső alkotja, felépítése párutcsás falu lévén fagráfhoz hasonló. Különleges jellemzője, hogy a 15. ábrán is látható nagy geodetikus magasságkülönbségei miatt nagy nyomáskülönbségek is kialakulnak a hálózatban, éppen ezért a szivárgáscsökkentés effektív működése várható.



15. ábra. Balf hálózatának csomóponti magasságtérképe

A módszer kiértékeléséhez tíz futtatást végeztem, ezeket a 5. táblázatban a szivárgás és a kieső fogyasztói hányad szempontjából vizsgáltam. A módszernél egyértelműen látszik, hogy a klaszterezés nem ad mindig egyértelmű megoldást, ezért nagy az elvágandó élek

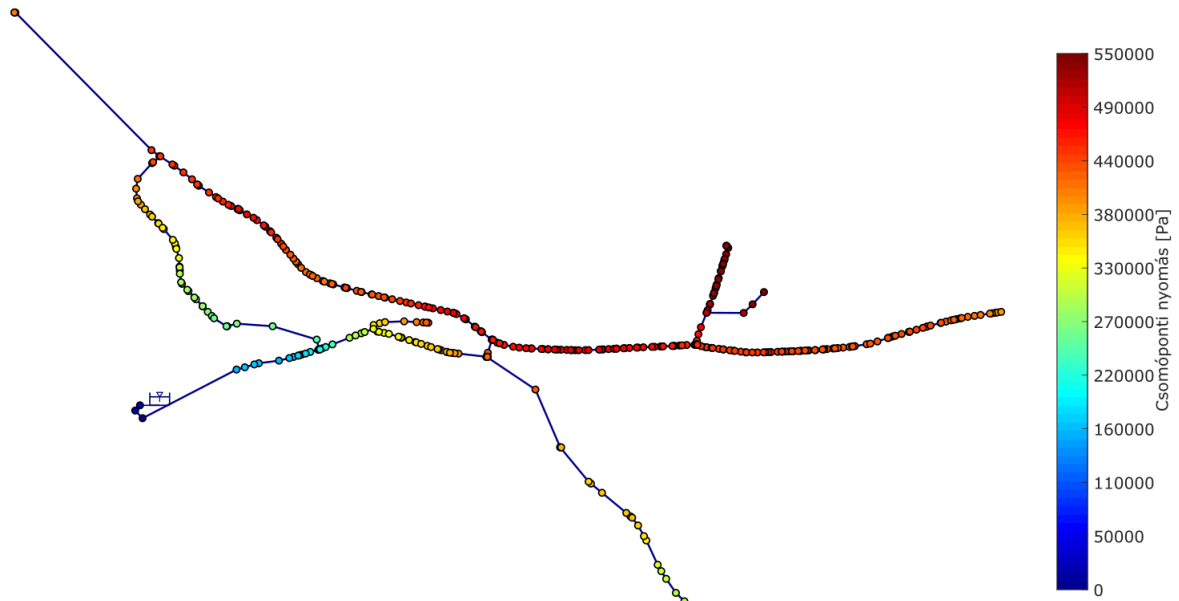
fluktuációja. Ez azt vonja maga után, hogy nemcsak több felbontási paraméternél, változó PRV számok mellett szükséges többet futtatni, hanem azonos paraméterek felhasználása mellett is érdemes több tesztet végezni.

Futtatás	PRV-k száma	Összes szivárgás $[\frac{l}{perc}]$	Szivárgás-csökkenés [%]	Kieső fogyasztói hányad változása[%]
1	1	31.70	22.95	-0.7
2	2	31.96	22.30	-0.7
3	2	31.94	22.31	-0.7
4	2	32.31	21.46	-0.7
5	4	32.64	20.65	-0.6
6	5	30.34	26.23	-2.7
7	5	32.17	32.17	-1.0
8	6	25.99	36.81	-1.1
9	6	26.96	34.44	-2.9
10	9	29.17	29.10	-2.9

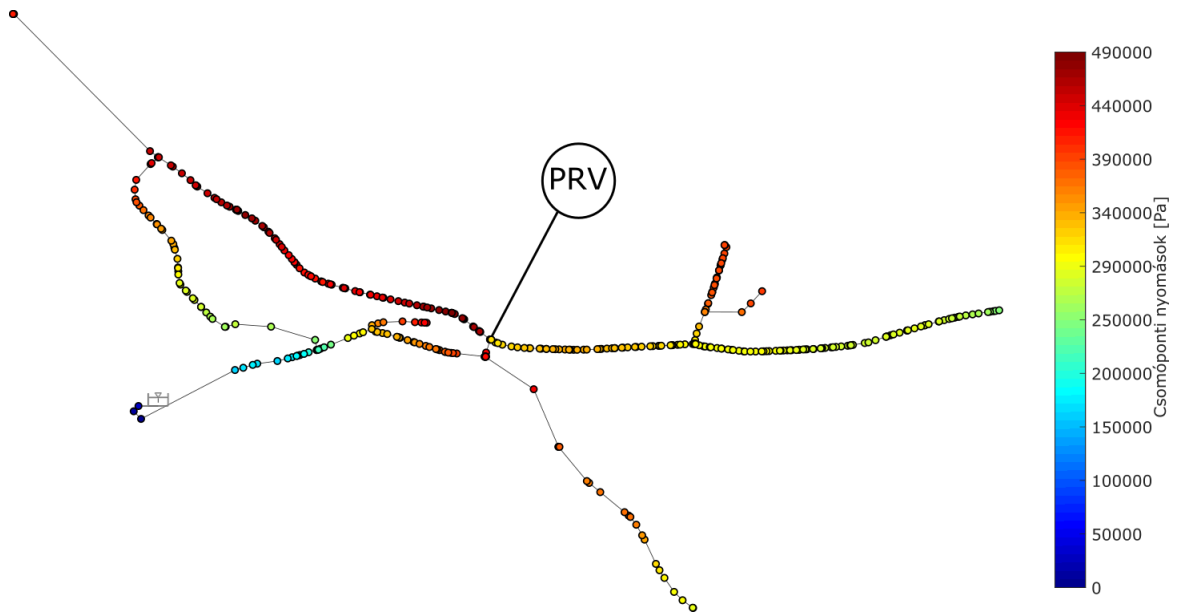
5. táblázat. Futtatások Balf hálózaton

Amint már említettem is, Balf települése mindössze 1000 fő körüli lakosságot számlál, ezért az igen költséges nyomáscsökkentő szelepek beszerzése és beépítése által jelentett terhek minimalizálása érdekében 1-2 PRV futtatással elért eredmények a leginkább alkalmasak a megvalósításra. Ezért a táblázat első sorában látható megoldásról elkészítettem egy, az újraszámolt csomóponti nyomásokat és szivárgásokat bemutató értékeket.

Balf hálózaton a szivárgáscsökkentő algoritmus alkalmasnak látszott a további vizsgálatokra. Már 1db nyomáscsökkentő szelep lehelyezésével is csaknem 23 százalékos szivárgáscsökkentésre volt képes, amely egy ilyen kicsi hálózatonál figyelemre méltó eredmény. További pozitívum, hogy a kieső fogyasztói hányad növekedése egyáltalán nem volt tetten érhető, az előálló csökkenő értékek ugyanúgy jöhettek a megoldó iterációinak kalkulációs hibáiból, ahogyan a tényleges kieső hányad csökkenéséből. A jelen megoldásból készült gráfszerkezet a 16b ábrán látható, míg összehasonlításként az eredeti értékek a 16a képen.



(a) Nyomáscsökkentő szelep beépítése nélkül



(b) 1 db nyomáscsökkentő szelep beépítésével

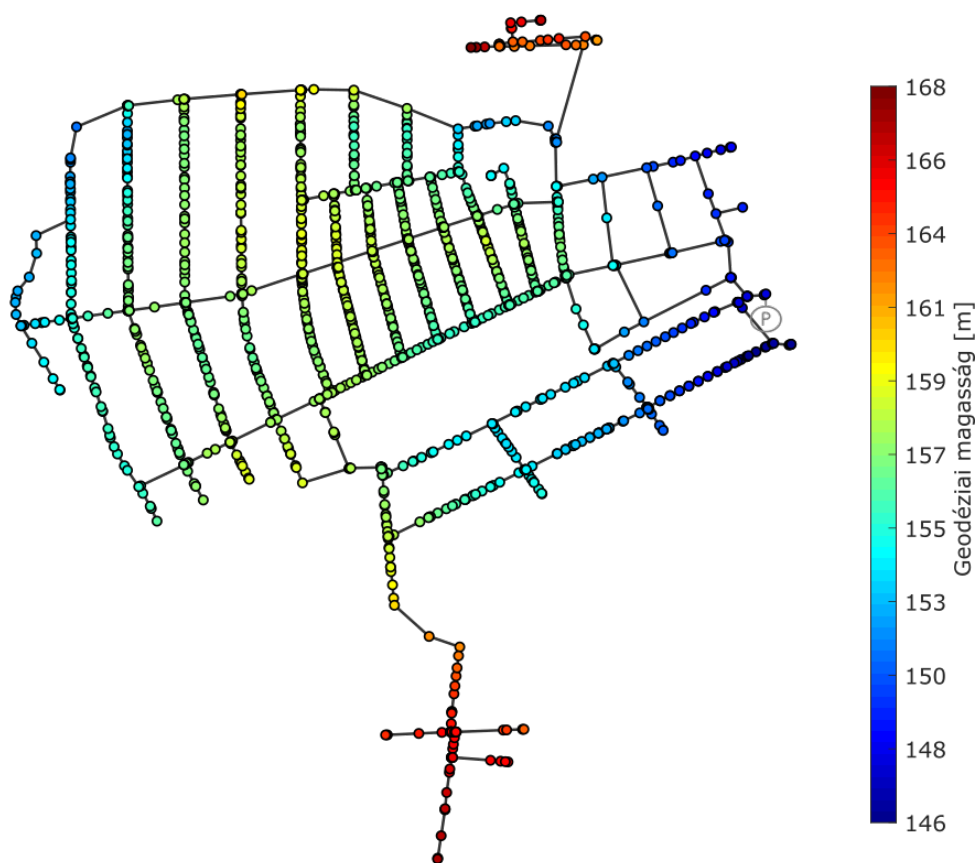
16. ábra. Balf hálózatának nyomástérképe

Az ábrákból kitűnik, hogy az algoritmus a hálózat északkeleti részén egyetlen PRV lehelyezésével nagymértékű nyomáscsökkentést vitt véghez. Ennek pontos értéke a fogyasztói hányadban nem okozott semmilyen plusz kiesést, mindössze annyit tett meg, hogy Balf északkeleti zónáját a szivárgás szempontjából sokkal kedvezőbbé tette. Az így

újra kalibrált szivárgási értékek a nyomások függvényeiként a 16. ábrához hasonló képet mutatnak.

4.4.2. Tómalom hálózata

Másodikként Tómalom kisvárosának hálózatát is vizsgálat alá vettem. Ez a Soprontól mindössze 15 percnyi kocsútra elhelyezkedő, a Fertő-tóhoz közel eső üdülőnegyed. A legendák szerint már a rómaiak korában is tavak alkották a környéket, mára ez két tóból álló láncot alkotva, Kistómalommal és Nagytómalommal a horgászok kedvencévé vált. 1842-ben alakították ki az első tómalmi fürdőt, amelyet az évszázadok alatt többször újra kellett építeni. A fürdő legújabbán 2021. június 1-jén nyitott meg, azóta is látogatható.



17. ábra. Tómalom hálózatának 3D-s térképe

Maga a városka állandó lakosai számában elmarad Balftól, 469 lakosával igen kevés a stabil fogyasztása. Ez kisebb anomáliát is okoz, hiszen névleges fogyasztása kisebb értéket vesz fel, mint az a kalibrációs során a [23] munkából meghatározott szivárgás. Ez olyan

módon lehetséges, hogy a városka üdülőövezeti mivolta miatt a csomóponti fogyasztás az esetek 50-60 %-ában 0. Ez azt jelenti, hogy ugyan a csövekből nem vesznek ki számlázott vizet, de a csövek menti hibák miatt a szivárgás jelensége ugyanúgy jelen van. Mivel utóbbi mennyiség a csőhosszra van vetítve, ezért értéke jelen esetben meghaladja a fogyasztási értéket.

Tómalom fürdővárosként sokkal több turistát vonz, mint ahány bennfentes lakos él benne. Éppen ezért nagyobb hálózatként szükséges kezelni, 1291 csomópontjával és 17621 méteres csőhálózatával a tanszék birtokában lévő modellek közül közepes nagyságúnak számít. Felépítése hurkolt gráfra hasonlít, mely négyzetes utcaszerkezetével magyarázható. Topológiája a 17. ábra szerinti, nem tartalmaz nagy magasságkülönbségeket és hurkolt mivolta miatt klaszteranalízise problémákba ütközhet. Éppen ezért szivárgáscsökkentése nehéz feladatnak ígérkezik, Balf hálózatához képest kisebb potenciállal.

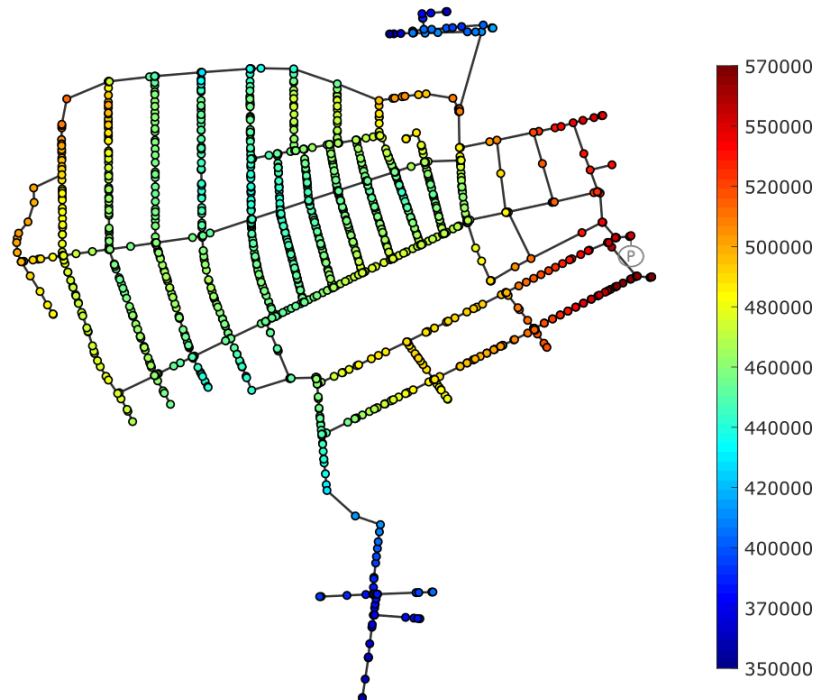
A kiértékelést az előzőhöz hasonlóan tíz futtatás eredményeiből végeztem, ezeket a 6. táblázatban a szivárgás és a kieső fogyasztói hányad szempontjából vizsgáltam. Ahogy előzőleg is, a módszernél egyértelműen látszik, hogy az elvágandó élek fluktuációja szignifikáns.

Futtatás	PRV-k száma	Összes szivárgás $[\frac{l}{perc}]$	Szivárgáscsökkenés [%]	Kieső fogyasztói hányad változása[%]
1	2	101.81	27.60	0
2	2	101.75	27.63	0
3	2	101.97	27.48	0
4	3	123.46	12.20	0
5	4	113.18	19.51	0
6	5	93.32	33.63	0
7	5	94.90	32.51	0
8	5	116.0	17.50	0
9	5	118.11	16.00	0
10	6	102.15	27.35	0

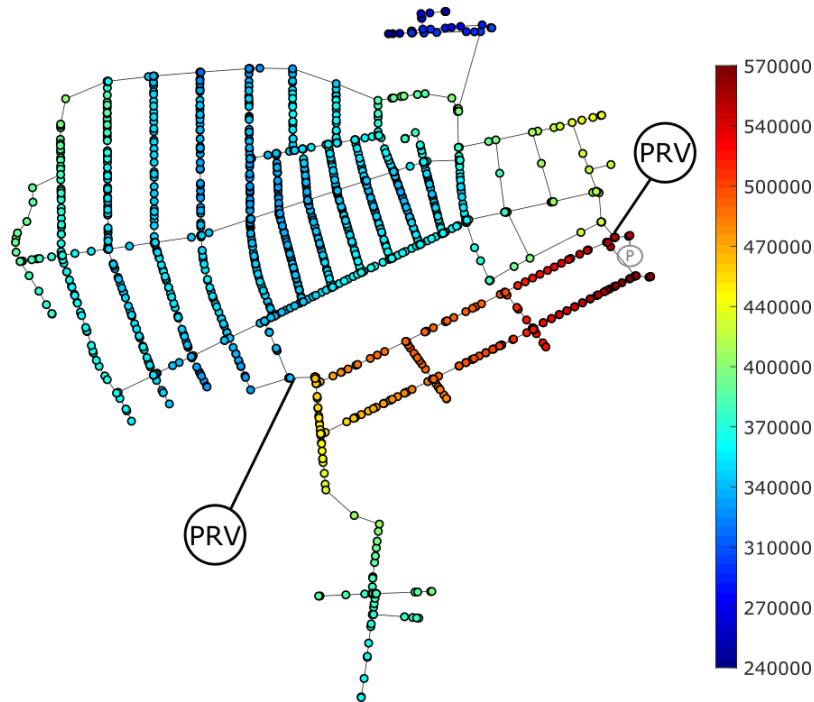
6. táblázat. Futtatások Tómalom hálózatán

Miután Tómalom mindössze 469 fő stabil lakost számlál, ezért itt sem engedhető meg egy költséges beruházás. Emiatt az esettanulmányban a táblázat első sorában látható

megoldásról elkészítettem egy, az újraszámolt csomóponti nyomásokat és szivárgásokat bemutató értékeket. Az erről készült grafikon a 18. ábrán látható.



(a) Szivárgáscsökkentés előtt



(b) Szivárgáscsökkentés után

18. ábra. Tómalom hálózatának nyomástérképe

Az eredeti nyomástérkép azt mutatja, hogy a hálózat kevésbé van túlnyomással terhelve, mint Balf települése. A nyomások nagy része 3.5-5 bar közötti értékeket mutat, amelyek alkalmasnak tűnnek szivárgáscsökkentésre. Ez a futtatások során be is bizonyosodott, hiszen a 18b ábrán látható megoldással 27.6 %-os szivárgáscsökkenés érhető el.

A klaszterezés jelen esetben jól láthatóan két elkülönült nyomászónát hozott létre, mégpedig egy nagyobb, északnyugati és egy kisebb, délkeleti fekvésűt. A PRV-k jelen esetben is jól láthatóan olyan helyekre kerültek, hogy az mérnöki intuícióval is megfelelőnek tűnő megoldást ad. A nyomások csökkentése az észak-északnyugati részen történt.

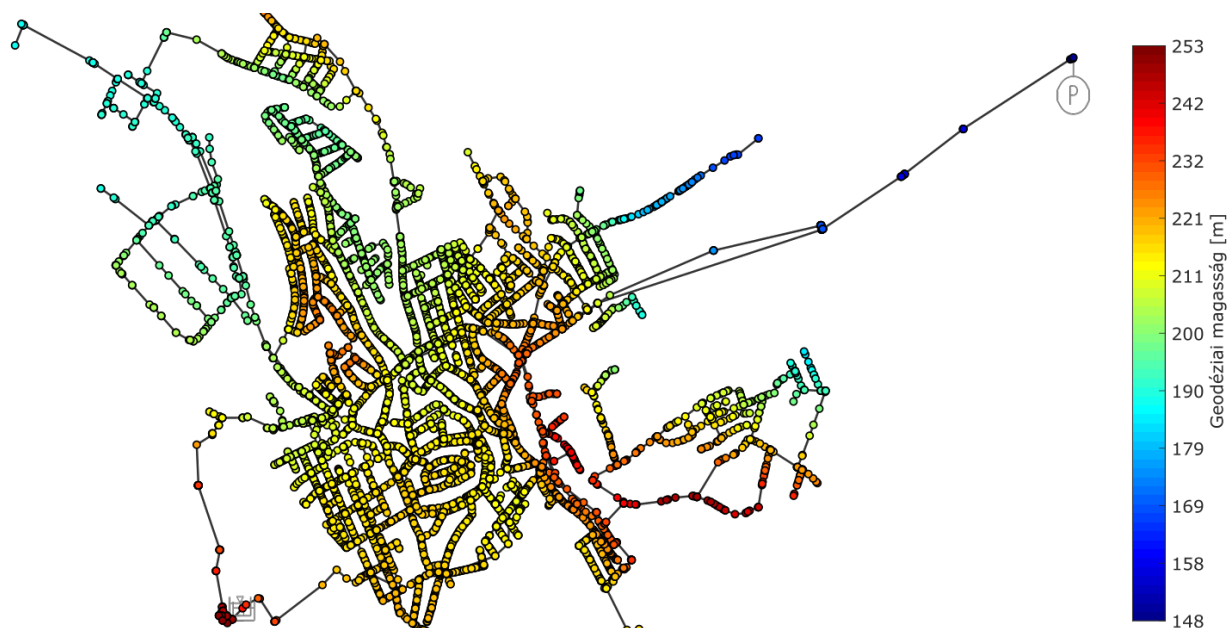
Tómalom hálózatán is megfelelően működött tehát az algoritmus, 2db PRV virtuális beépítésével a modell szerint nagyjából 27 % -os szivárgáscsökkenést ért el. A kieső fogyasztó hányad növekménye jelen esetben zérus volt.

4.4.3. Villa-sor hálózata

Harmadikként pedig Villa-sort szeretném bemutatni, mint a vizsgált hálózatok legnagyobbját. Napjainkban a Villa-soron a 19-20. század fordulóján épült, jellegzetes egy vagy kétszintes, alpesi stílusú villák találhatók. A városnegyed külső részen pedig nyaralókkal beépült utcák vannak. Épp ezért ezen helyeken nem jellemző a szignifikáns vízfogyasztás, míg a belsőbb részekben igen magas értékek is mérhetőek a nagyobb kertesházak miatt.

A lakónegyed 7186 csomópontjával és több, mint 97 kilométernyi csőszakaszával a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék kezében lévő hálózatok közül az egyik legnagyobb számú. Geodéziáját is ábrázoló 3D-s gráfterképét a 19. ábrán láthatóan nagy magasságkülönbségek jellemzik, gráfmodellje hurkoltként és bonyolultként írható le. Miután ennél a gráfnál a homogén nyomászónák létrehozása, de még a klaszteranalízis sem tűnik egyszerűnek, ezért az eredmények egyáltalán nem várhatóak triviálisnak. Villa-sor hálózatán az is nehezíti az eredmények tökéletes értékelését, hogy a kieső fogyasztói hányad rendkívül nagy, 45,7 % körüli értéken van, amihez képest a szivárgás két nagyságrenddel kisebb. Természetesen ez nem azt jelenti, hogy a város lakosságának 45.7 %-a nem jut ivóvízhez, csupán azt, hogy sok helyütt csökken valamelyest a rendszernyomás a 2,5 bar-os abszolút nyomásérték alá. Ebből fakadóan a hálózat nagy részén olyan kicsik a nyomások, hogy azok csökkentése is csak minimális szivárgáscsökkenést eredményezne, viszont szignifikáns fogyasztói hányad kieséssel járna. Éppen ezért a kidolgozott módszerben ez utóbbi jelentősen kisebb súlyt fog kapni mint az előző hálózatok esetében. Az eredményeknél az

előbbieket megfontolva jelentős lépésnek tűnhet már egy néhány százalék környéki szivárgáscsökkenés is.



19. ábra. Villa-sor geodéziai magasságtérképe

Futtatás	PRV-k száma	Összes szivárgás $[\frac{l}{perc}]$	Szivárgáscsökkenés [%]	Kieső fogyasztói hányad változása[%]
1	1	777.91	0	0
2	2	749.15	3.70	0.03
3	3	752.81	3.23	0.01
4	3	751.13	3.44	0.02
5	6	705.17	9.35	0.09
6	7	753.05	3.20	0.02
7	7	773.09	0.62	0
8	8	762.94	1.93	0.02
9	8	764.93	1.67	0.03
10	10	831.82	-6.93	-0.06

7. táblázat. Futtatások Villa-sor hálózaton

A kiértékelést az előzőhöz hasonlóan tíz futtatás eredményeiből végeztem, ezeket a 7. táblázatban a szivárgás és a kieső fogyasztói hányad szempontjából vizsgáltam. Ahogy

előzőleg is, a módszernél egyértelműen látszik, hogy az elvágandó élek fluktuációja szignifikáns. A tapasztalatom az volt, hogy ugyanazon felbontási paraméter mellett a klaszterezés nem adta mindig ugyanazon megoldást, éppen ezért egy paraméterrel háromszori futtatást végeztem el.

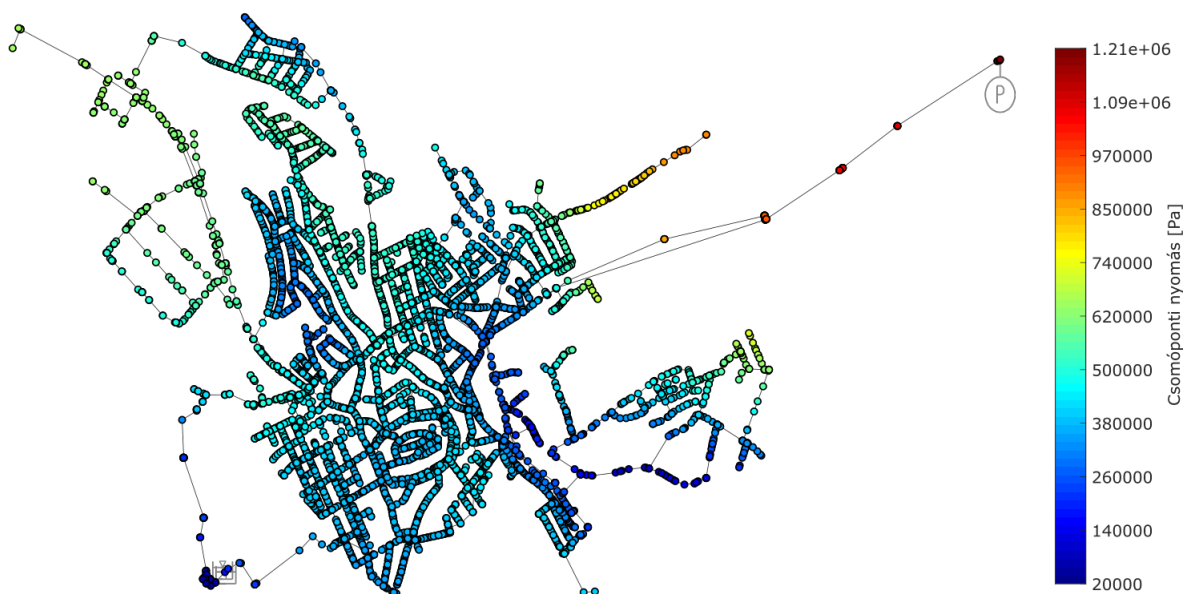
A táblázatból világosan látszik, hogy a hálózatban nagyon nehéz homogén nyomászónák létrehozása, ez pedig a szivárgáscsökkentést is jelentősen megnehezíti. Mindazonáltal az ötödik sorban látható eredmény azt sugallja, hogy ez utóbbi lehetséges, de a differenciális evolúció célfüggvénye nem ad egyértelmű konvergenciautat. Ezt megerősíti a tizedik eredmény is, ahol a rosszul kondicionált hálózati struktúra miatt a kieső fogyasztók csökkentése mellett a szivárgás növekményes. Ez a módszer alaptéziséhez képest egy fordított eredmény. Ennek oka a hálózati sajátosságokban keresendő.

Villa-sor hálózata rendkívül nagy, csaknem 10-15 ezer lakost lát el vízzel. Mivel a szivárgást kiegészítő modellben a szivárgás miatti víznövekmény a hálózati vízfogyasztással összeadásra kerül, ez igen nagy plusz terhet ró a szivattyúkra, vagyis egy ekkora hálózat esetén rettentő nagy fogyasztásnövekményt okoz a szivárgás figyelembe vétele. A jelleggörbe pontjai azonban a Staci programban rögzített betáplálásként vannak megadva, így az alapnyomás növelése nem lehetséges tetszőlegesen. Ez a modellben azt eredményezi, hogy a fogyasztás növekedés hatására, a hálózati jelleggörbe mentén elmozdulva, a nyomások lecsökkennek. Ami pedig nagy kieső hányadhoz vezet, amely pedig jelen esetben rosszul konvergáló célfüggvényhez. Ezt kompenzálendő, a túl nagy alapból kieső fogyasztás súlyát érdemes csökkenteni, vagyis jelen esetben a célfüggvény módosításra kerül és a szivárgás valamint kieső fogyasztói hányad azonos súllyal kerül figyelembe vételre. Természetesen a hatás kompenzációjára a legmegfelelőbb módszer a hálózat újramodellezése lenne, azonban a Soproni Vízművektől az ehhez szükséges adatok nem érkeztek meg a dolgozat beadásáig, így adatok hiányában nem volt megoldható a dolgozat keretében. Helyette legjobb megoldásnak a szivárgás fajlagosítását láttam, hiszen így a célfüggvényben két fajlagos érték kerülne összeadásra, így utóbbi minimalizálása nagyobb hangsúlyt kap. Ennek megfelelően a 7. táblázat tizedik sorának eredményét elvetem. Ez, lévén a futási idő nagyon alacsony, nem hat kedvezőtlenül a kiértékelésre és nem kérdőjelezi meg a módszer helyességét. A fajlagos értékek összeadásával kapott megoldások a 8. táblázatban láthatóak:

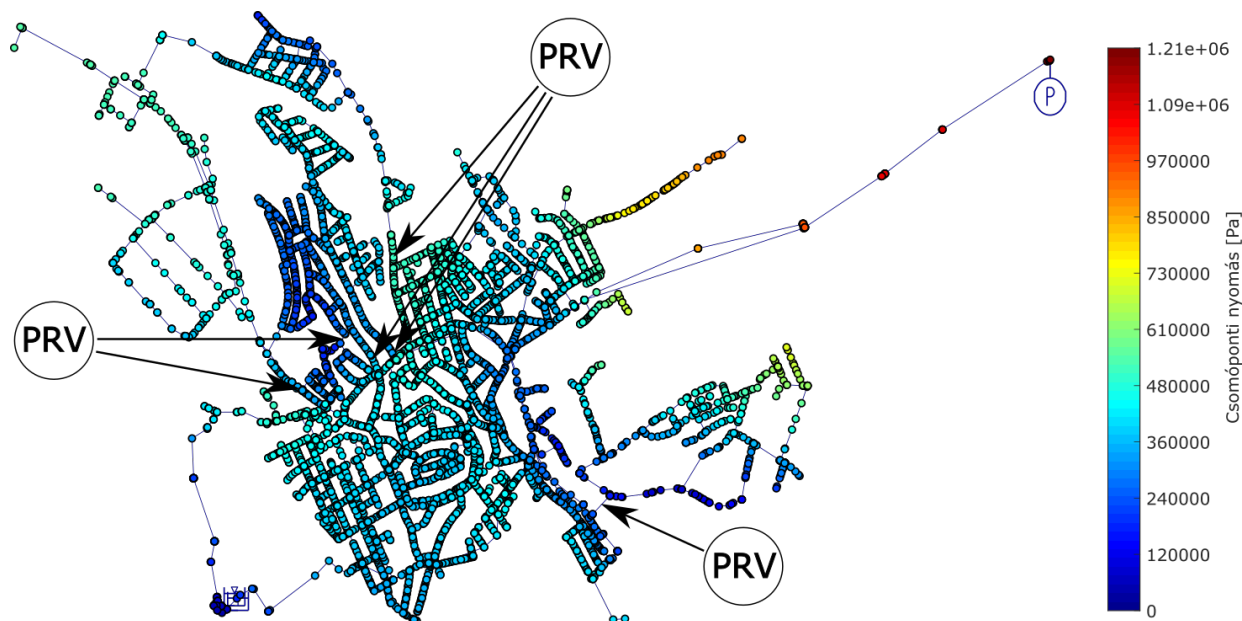
Futtatás	PRV-k száma	Összes szivárgás $[\frac{l}{perc}]$	Szivárgáscsökkenés [%]	Kieső fogyasztói hányad változása[%]
1	1	759.86	2.41	0.13
2	6	749.98	3.59	0.45
3	7	729.16	6.26	0.75
4	8	727.53	6.48	1.32
5	8	731.37	5.98	0.72

8. táblázat. Újrafuttatások Villa-sor hálózaton

Az újabb futtatásokkal a szivárgási értékek kicsivel jobban alakulnak és kevésbé ingadoznak, mint az első próbálkozásnál. Az eredmények vizsgálata akkor különösen izgalmas, ha megnézzük, hogy e hálózat jelentősen nagyobb minden korábbi vizsgált hálózathoz képest. Miután a legjobb adódó szivárgási érték az első táblázat ötödik sorában található, ezt értékeltem ki gráfok segítségével. Az újraszámolt csomóponti nyomások a 20. ábrán láthatóak.



(a) Szivárgáscsökkentés előtt



(b) Szivárgáscsökkentés után

20. ábra. A villasor hálózatának nyomástérképe

Abból fakadóan, hogy egy ilyen nagy méretű hálózat esetén az elért szivárgáscsökkentés valamelyest kisebb mértékű a többi hálózathoz viszonyítva, így a nyomáscsökkenés értékei kevésbé látszanak jól. A 20b ábrán látható a szelepkiosztás, amely három részre bontja a hálózatot. Ezek közül az északnyugati és délkeleti klaszterben lelhetőek fel a kisebb csomóponti nyomások, amelyek léte indukálja a szivárgás csökkenését is. Az ábrák jól mutatják a hálózati optimalizáció jelen esetben miért nagyon nehéz: az alapnyomások nagyon alacsony mivolta nem enged elég teret a szivárgás csökkentésének, másként fogalmazva a PRV-k beépítésével a kieső fogyasztói hányad nagyon könnyen növekvésnek indul, ezzel jelentős korlátokat szabva az optimalizációnak. Emellett a rendkívül szabdalt topológiát nagyon nehéz kevés szelep segítségével homogén nyomászónákra osztani. Ugyan a klaszterezés mérnöki intuíció szerint is logikusan osztja fel a hálózatot, mégis, az alapból jelentős kieső fogyasztói szám elrontja a beállításokkal elérhető optimális szivárgást. Azonban a módszer mindezen problémák ellenére is csaknem 10 %-os szivárgáscsökkentést kalkulál, amely megfelelő egy ekkora méretű hálózat esetén, szignifikáns mennyiségű ivóvíz megtakarítást tesz lehetővé.

5. Összefoglalás

Dolgozatomban az ivóvízhálózatok topológia alapú szivárgási optimalizációját megvalósító algoritmust mutattam be. Az első fejezetben egy rövid szakpolitikai kitekintés és motivációm bemutatása után ismertettem a szakirodalom szivárgásról alkotott képét. A téma fontosságát jelezte, hogy a területen publikált cikkek évről évre nagyobb számban jelennek meg. Ezzel megerősítvén elkötelezettségem, kutatni kezdtem a szivárgás csökkentésének módszerei után. Tudomásomra jutott, hogy a szivárgás nyomásfüggően modellezhető, és leginkább költséghatékony, illetve magyar vonatkozásban legjobban használható módszere a nyomáscsökkentő szelepek topológiába való beépítése.

A második fejezetben az ivóvízhálózatok modellezése kerül bemutatásra. Ez jelen esetben kiegészült egy nyomásfüggő fogyasztási modellel, illetve beépítésre került egy nyomásfüggő szivárgási modellező bővítmény a szivárgás szakirodalma alapján. Az eredeti modellező szoftvert Dr. Hős Csaba fejlesztette ki, a nyomásvezérelt fogyasztási és szivárgási bővítményeket pedig Wéber Richárd és Huzsvár Tamás tanszéki munkatársak írták.

Mindezek után következett egy szivárgási modell kalibrációs algoritmus, amelyet az empirikus alapú számítások elvégzésének érdekében vezettem be. Ezzel a programmal olyan valós hálózati adatokhoz jutott módszerem, amelyek reprezentatív értékekkel rendelkeztek mind a szakirodalom, mind a valóság irányában, emellett pedig stabil számítási alapot képeztek későbbi munkámhoz.

A kalibráció után elsőként a nyomáscsökkentő szelepek kiosztásával próbálkoztam. Ezen szelepeket az ivóvízhálózatokban lévő csövekbe lehetséges beépíteni, amely még egy kis hálózatnál is nagy keresési teret definiál. A kiosztást genetikus algoritmus végezte, azonban ez a módszer konvergencia-problémákba ütközött, így elvetettem. Helyette a kiosztáshoz az úgynevezett klaszteranalízist használtam, a klaszterezési technikák közül a Leiden-módszert implementáltam. Ez alacsony futási idejével és stabil működésével bizonyított. A nyomáscsökkentő szelepek számát az úgynevezett felbontási paraméterrel lehet változtatni, a klaszterező technika által feldolgozott gráfot pedig az ivóvízhálózatból a modellezés során képzett gráf adta. Ez utóbbit lehetséges volt súlyozni, ezen súlyokat a hálózatban csöveket jelentő gráfélek nyomáskülönbségei jelentették.

A szelepek helyeinek meghatározása ezzel azonban még nem ért véget, hiszen az adott csövön hosszú tartományon van lehetőség annak beépítésére. Ezt szűkíti a gyakorlati tény,

hogy a beépítést legkönnyebben a csomópontok közelében lehet megvalósítani. Mivel a csövek mindig két csomópont között értelmezettek, minden PRV-nek kétféle beépítése volt lehetséges. Az így kialakult variációk mindegyikét megvizsgálta a variációs algoritmus, amely a legoptimálisabb kiosztást részesítette előnyben.

Végül a nyomáscsökkentő szelepek beállításai következtek, amelyhez egy globális optimalizációs technikát, a differenciális evolúciót alkalmaztam. Az így előállt megoldás tehát megadja a nyomáscsökkentő szelepek pontos beépítési helyeit, illetve nyomásbeállításait.

Az optimalizációs eljárást a harmadik fejezetben, míg annak kiértékelését a negyedik fejezetben mutattam be. Utóbbi esetében a szakirodalmi módszerekkel vetekedő, csaknem 20-30 százalékos szivárgáscsökkenésről számoltam be, amely nagyban függött a hálózatok topológiájától. Kiemelendő, hogy a vizsgálat három valós, Sopron környéki hálózaton való futtatásból állt, amely így gyakorlatias eredményeket és problémákat tárt elem.

Az így elkészült módszernek már jól használhatónak bizonyult. A jövőben azonban megfontolandónak tartom a következő vizsgálatokat. Egyrészt a klaszterezéshez felhasznált felbontási paraméter manuális beállítását megszüntetendő, egy ezt beállító algoritmus írása sokkal kényelmesebbé és gépiesebbé tehetné a kiértékelést. Másodrészt a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék kezében lévő összesen 29 db hálózati modellen való futtatással sokkal nagyobb mintaszámú elemzéseket lehetne végezni. Ez rávilágíthatna eddig nem ismert problémákra vagy új optimalizációs technikák, célfüggvények használatára sarkallhatna.

A jövőben szeretném, hogy ha valódi implementációs lehetőséget kapna a módszer. Erre minden bizonnyal jó esély kínálkozik, lévén a HDR tanszék jó viszonyt ápol a Soproni Vízművekkel. Ha az én közreműködésemmel is létrehozott technika empirikus mérések útján is bizonyíthatóan szivárgáscsökkentő hatást vált ki, azzal céljaimat és motivációimat elértnek tekinteném. Ennek megvalósulása esetén úgy érzem, hogy egy olyan érték megőrzésében vállalhatok szerepet, amely az emberiség jövője szempontjából kulcsfontosságú lehet a következő évtizedekben és évszázadokban.

Hivatkozások

- [1] [https : //scikit – learn.org/stable/modules/clustering.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html).
- [2] Orazio Giustolisi and; Dragan Savic and Zoran Kapelan. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. 2008.
- [3] L. S. Araujo, H. Ramos, and S. T. Coelho. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20:133–149, 2006.
- [4] Jakob J. Verbeek Aristidis Likasa, Nikos Vlassis. The global k-means clustering algorithm. *Pattern Recognition*, 36:451–461, 2003.
- [5] Attila Bibok and Roland Fülöp. Hydraulic model calibration and performance assessment of pressure managed areas with multiple inlets. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64:605–613, 5 2020.
- [6] Giovanna Cavazzini, Giorgio Pavesi, and Guido Ardizzon. Optimal assets management of a water distribution network for leakage minimization based on an innovative index. *Sustainable Cities and Society*, 54, 3 2020.
- [7] Hős Csaba. [https : //www.hds.bme.hu/staci_web/staci_run.html](https://www.hds.bme.hu/staci_web/staci_un.html).
- [8] Till Sára Czizmadia Péter. Áramlástechnikai rendszerek. *Akadémiai Kiadó*, 2020.
- [9] Lloyd S. Nelson Donald M. Ohlsson. The nelder-mead simplex procedure for function minimization. *Technometrics*, 17:45–51, 1975.
- [10] Pierre Legendre Fionn Murtagh. Ward’s hierarchical clustering method: Clustering criterion and agglomerative algorithm. *Journal of Classification*, 31:274–295, 2014.
- [11] Guancheng Guo, Xipeng Yu, Shuming Liu, Xiyan Xu, Ziqing Ma, Xiaoting Wang, Yujun Huang, and Kate Smith. Novel leakage detection and localization method based on line spectrum pair and cubic interpolation search. *Water Resources Management*, 34:3895–3911, 9 2020.
- [12] Kaijun Wang; Junying Zhang; Dan Li; Xinna Zhang; Tao Guo. Adaptive affinity propagation clustering. *Acta Automatica Sinica*, 33:1242–1246, 2007.

- [13] Yuan Huang, Feifei Zheng, Zoran Kapelan, Dragan Savic, Huan Feng Duan, and Qingzhou Zhang. Efficient leak localization in water distribution systems using multi-stage optimal valve operations and smart demand metering. *Water Resources Research*, 56, 10 2020.
- [14] Tamás Huzsvár, Richárd Wéber, Ákos Délei, and Csaba Hős. Increasing the capacity of water distribution networks using fitness function transformation. *Water Research*, 201:117362, 2021.
- [15] D. Krznaric; C. Levcopoulos. Fast algorithms for complete linkage clustering. *Journal of Classification*, 19:131–145, 1998.
- [16] Dini Mehdi and Asadi Asghar. Pressure management of large-scale water distribution network using optimal location and valve setting. *Water Resources Management*, 33:4701–4713, 11 2019.
- [17] Francesco De Paola, Maurizio Giugni, and Davide Portolano. Pressure management through optimal location and setting of valves in water distribution networks using a music-inspired approach. *Water Resources Management*, 31:1517–1533, 3 2017.
- [18] Leakage Reductionwater, Distribution Systems, Alve Control, By Kalanithy, and Jeremy Lumbers. LEAKAGE REDUCTION IN WATER DISTRIBUTION SYSTEMS $\therefore$ (1989):1146–1154, 1998.
- [19] Csaba Hős Richárd Wéber, Tamás Huzsvár. Vulnerability analysis of water distribution networks to accidental pipe burst. *Water Research*, 184, 2020.
- [20] A. K. Qin; V. L. Huang; P. N. Suganthan. From louvain to leiden: guaranteeing well-connected communities. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13:398–417, 2009.
- [21] L. Waltman; N. J. van Eck V. A. Traag. Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization. *Scientific reports*, 9, 2019.
- [22] Tingchao Yu, Xiangqiu Zhang, Iran E.Lima Neto, Tuqiao Zhang, Yu Shao, and Miaomiao Ye. Impact of orifice-to-pipe diameter ratio on leakage flow: An experimental study. *Water (Switzerland)*, 11, 10 2019.

- [23] Somos Éva. A csőbe zárt ivóvíz... (vagy mégsem?). *Magyar Tudomány*, 172:1425–1439, 12 2012.