

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék

Papp Klaudia

MSc. I. évf.

e-mail: pappklaudia13@gmail.com

Szennyvízátemelő aknák üzemének optimalizációja

Országos Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat

Konzulensek:

Dr. Garbai László prof. emeritus

Jasper Andor tudományos segédmunkatárs

BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék

e-mail: garbai@epgep.bme.hu

jasper@epgep.bme.hu

Budapest, 2015

Tartalom

Bevezetés.....	3
1. A szennyvízcsatorna-rendszerek hidraulikai analízisének kérdései állandósult állapotban [1][2].....	5
1.1. A hidraulikai analízis módszerei.....	6
1.2. Csőhálózatok gráfja és topológiai leírása.....	6
1.3. A csőhálózati áramlások megmaradási egyenletei, „peremfeltételei” és meghatározottsága.....	8
2. Rendszertani és rendszerelméleti áttekintés [3][4][5][6]	9
2.1. A rendszerek típusai.....	10
2.2. A konkrét rendszerek absztrakciója. A matematikai rendszerelmélet alapjai.....	12
2.3. A gépészeti rendszerek leírása a matematikai rendszerelmélet segítségével.....	13
3. Gépészeti rendszerek [3][4][5][6]	13
3.1. A gépészeti rendszerek típusai, leírásai	13
3.1.1. A gépészeti rendszerek leírása állandósult állapotban.....	14
3.1.2. A gépészeti rendszerek leírása nem állandósult állapotban. Az állandó és változó állapotok leírásának összekapcsolása.....	20
3.1.3. Zavarások a rendszerek működésében	20
3.1.4. Rendszerek szabályozása. A szabályozás leképezése absztrakt rendszerre	21
3.2. Gépészeti rendszerek rendszeranalízise	22
3.2.1. Az alapfeladat megoldása a gépészeti rendszerekre.....	22
3.2.2. Az inverz feladat megoldása a gépészeti rendszerekre	22
3.2.3. Rendszerelméleti optimalizációs módszerek.....	23
3.3. A soros rendszerek optimalizációja	24
3.3.1. Soros rendszer optimalizációja visszafelé haladó rekurzióval	25
3.3.2. Soros rendszer optimalizációja előrehaladó rekurzióval	27
3.4. Nem-soros rendszerek vizsgálata és optimalizációja.....	29

3.4.1. Összeágazó rendszer.....	29
4. A dabasi szennyvízcsatorna-rendszer bemutatása.....	34
5. A hálózat hidraulikai modellje	37
5.1. Az áramlást leíró összefüggések állandósult állapotban.....	38
5.2. Az egyszerű alrendszerek hidraulikai egyenletei.....	40
6. A döntési modell	42
6.1. Lineáris töltés.....	44
6.1.1. Az ürítéshez alkalmazható stratégiák	44
6.2. Konvex profilú szennyvízbetárolás.....	46
6.2.1. Dinamikus programozás használata	48
7. Összegzés, további feladatok	50
Melléklet.....	51
Irodalomjegyzék.....	55

Bevezetés

A TDK dolgozatomban a dabasi szennyvízcsatorna-hálózat példáját felhasználva a kiterjedt szennyvíz-hálózatok rendszertani és hidraulikai modellezésével, valamint az üzemmód optimalizálásával foglalkozom.

A kiterjedt csatornarendszerek létesítése és üzemeltetése gyakorlati és elméleti problémák egész sorát veti fel, amelyek különösen akkor súlyosak, ha a minimális beruházási költségű rendszerek létesítésének és a minimális költségű üzemmód(ok) kialakításának lehetőségét vizsgáljuk. A csatornarendszerek minimális költségű üzemeltetésének legfontosabb problémája a minimális költségű hidraulikai üzemmódok előállítása, az esetleg több összekapcsolt ágból álló, sztochasztikus üzemű, sztochasztikusan keletkező szennyvízáramok szállítását végző csatornahálózatok hidraulikai-áramlási viszonyainak tisztázása; a nyomás- és tömegáram-eloszlás meghatározott feltételekre történő megállapítása, illetve a kívánt áramlási kép, azaz a kívánt folyadékáram-eloszlás és az előírt fogyasztások (vételezések) vagy azok lehetőségeinek beállítása.

A dabasi szennyvíztisztító telep csakúgy, mint Magyarország szennyvíztisztító telepeinek többsége napjainkra mind hidraulikailag, mind szerves anyag tartalom szempontjából a méretezési állapot felett üzemel. Ezt okozhatja a létesítéskor történt alulméretezés, vagy gyakrabban az időközben a tervezési állapothoz képest megnövekedett terhelés. Ez a túlterhelés lehet folyamatos, vagy – mint a dabasi esetben – csak időszakos. A megvalósítani kívánt innováció esetén olyan új megoldásokat kívánunk alkalmazni, amelyek mindkét esetben jelentősen csökkenthetik a szennyvíztisztító telepek terhelését. A vizsgált csatornarendszerben egyidejűleg van jelen a gravitációs és a szivattyús szállítás. Az innováció egyfelől egy új baktériumos kezelés bevezetésére, másfelől új informatikai adatgyűjtő és üzemirányítási módszer telepítésére irányul. Ez utóbbi során gazdasági célfüggvénnyel irányított döntési modell alkalmazásával az optimális üzemirányítás megvalósítása a cél.

TDK dolgozatomban elkészítem a csatornarendszer gráfelméleti, döntéseméleti modelljét, amelyet alrendszerekre osztok fel, azoknak elkészítem az áramlást leíró hidraulikai modelljeit. A hidraulikai egyenletek felírása mellett egyidejűleg felállítható a hálózat üzemirányításának döntési modellje, amelynek célfüggvénye a szivattyúzási munkák minimumának keresése. A tisztítási és lebontási folyamat sikere érdekében feltételként kell szabni azt is, hogy a tározókban, gyűjtőkben és a csatornahálózatban a szennyvíz tartózkodási ideje összességében közelítse meg a lebontáshoz szükséges időtartamot. A döntési modell részét képezik még a

mellékfeltételek, amelyek a szennyvíztározók korlátos befogadóképességét, kapacitását jelentik. Az ezek figyelembe vételével felírt hálózati döntési modell megoldásával előállítható a rendszer optimális üzemmenetének első közelítése.

1. A szennyvízcsatorna-rendszerek hidraulikai analízisének kérdései állandósult állapotban [1][2]

Az irányítási döntési modell elkészítéséhez áttekintést adok a szennyvízcsatorna-hálózatok hidraulikai analízisének módszereiről, és összefoglaló módon elemzem a feladat megoldásához szükséges rendszerelméleti alapegyenleteket.

A hidraulikai analízis bonyolultsága jelentősen függ a rendszer kiterjedésétől. A tervezés első pillanatától kezdve törekedni lehet és szükséges is a minimális beruházási költségre, illetve arra, hogy az üzemeltetés során is fenntartható legyen a költségminimum. Összetett, nagyméretű rendszerekben a legnagyobb problémát a sztochasztikusan keletkező szennyvízáram okozza, melyek a hidraulikai számításokat komplikáltabbá teszik. Nem csak a nyomásprofil változik, hanem az előírt folyadékáram-eloszlás is nagymértékben módosulhat.

Ugyanakkor - beláthatóan – egy bonyolult, összetett, különböző típusú szállítási módokat tartalmazó rendszerelemek és hálózati elemek áramlási viszonyainak tisztázása igen nagy jelentőségű a hálózat fejlesztésének vizsgálatában is, tehát akkor pl., ha arról kell dönteni, hogy egy új fogyasztó ellátható-e a meglévő hálózatról, vagy pedig a hálózat vezetékeinek bővítésére, cseréjére és új vezeték(ek) fektetésére van szükség. Jelen vizsgálatban természetesen elsősorban az optimális üzemmódok kialakítása, az online vezérlés és szabályozás megvalósításához szükséges modellezés a feladat. A legfőbb gondot a keletkező szennyvíz sztochasztikus jellege jelenti, és emiatt a matematikában sztochasztikus optimalizációnak nevezett megoldási algoritmusok megkeresése a feladat.

A probléma megoldása tulajdonképpen egy összetett gráfelméleti, rendszertani-, rendszerelméleti keretbe ágyazott sztochasztikus döntéseméleti feladat. A konkrét optimalizációs és modellezési probléma megoldása előtt szükséges áttekinteni a különböző típusú és a különböző feladatokat ellátó csővezeték hálózatok úgynevezett hidraulikai analízisének kérdéskörét.

A gyakorlatban felvetődő a hidraulikai analízis problémakörébe tartozó feladatok az alábbi nagy csoportokba sorolhatók:

- adott betáplálási jellemzők (szivattyújelleg, szivattyújellemzők), szennyvízmenntiségek és hálózati jellemzők (ellenállás-tényezők) mellett kialakuló áramlási kép és kialakuló szállítások vizsgálata,

- ismert szennyvízmennyiségek és megadott hálózati jellemzők mellett az optimális (minimális üzemeltetési költséget eredményező) betáplálási jellemzők (szivattyújellemzők, munkapont) meghatározása,
- gravitációs üzemeltetésű hálózatokban a szállítások korlátai, lehetőségei és peremfeltételei,
- gravitációs üzemeltetésű hálózatokban adott betáplálások eljuttatásának vizsgálata gyűjtőpontokba, determinisztikus, illetve sztochasztikus jelleg mellett,
- gravitációs és nyomás alatti üzemmódok összekapcsolásának vizsgálata, vagy adott betáplálások eljuttatása kivételi, illetve gyűjtőpontokba.

E feladatok megoldására irányuló vizsgálatokat összefoglalóan hálózatanalízisnek vagy hidraulikai analízisnek nevezzük.

1.1. A hidraulikai analízis módszerei

A csőhálózatok hidraulikai analízisének lépései általában

- a valóságos hálózat modelljének megalkotása,
- a modell topológiai leírása,
- a megmaradási egyenletek felírása a modell áramaira és
- a megmaradási egyenletek megoldása.

A csőhálózatok modelljének megalkotását és topológiai leírását a gráfelmélet eszközeivel lehet elvégezni. A csőhálózat modelljén a hálózat gráfját értjük. A modell áramaira felírt megmaradási egyenletek az áramló tömeg megmaradását kifejező, ún. csomóponti egyenletek és a nyomásvesztések zárt hurokra történő algebrai összegezése. A csomóponti egyenletek az ún. csomóponti törvényt, míg a hurokegyenletek a huroktörvényt fejezik ki, amelyeket hidraulikai Kirchhoff-törvényeknek is nevezzük.

1.2. Csőhálózatok gráfja és topológiai leírása

Egy gráf - mint matematikai struktúra - pontok és élek, valamint azokon értelmezett relációk halmaza. Egy gráf szerkezetét a pontok és az azokat összekötő élek adják. A pontok összekapcsolásának jellege megadja a gráf jellegét, típusát. A csőhálózatok hidraulikai analízise szempontjából a gráfokkal kapcsolatos legfontosabb fogalmak:

- a gráf éleinek irányítottsága,
- a gráf csúcsainak fokszáma,
- a gráf összefüggősége,

- a gráfban található utak és körök (hurkok),
- fastruktúrájú gráf.

A gráfok lehetnek irányítottak és irányítatlanok attól függően, hogy a gráf élei rendelkeznek-e irányítással vagy sem (1.1. ábra). Minden csővezeték-hálózatnak és minden hálózati áramképnek létezik olyan absztrakciója, amely egy irányított vagy irányítatlan gráffal izomorf.

Igen fontos fogalom a gráfokkal kapcsolatban a csúcsok fokszáma. Egy gráfcsúcs fokszámán a csúcsra illeszkedő élek számát értjük. A gráf elsőfokú csúcspontjait végpontoknak nevezzük.

A gráfok lehetnek összefüggők és nem összefüggők. A gráf k -szorosan összefüggő, ha bármely két tetszőleges v és w csúcsa legalább k számú úttal összeköthető oly módon, hogy ezeknek az utaknak nincsen más közös csúcsuk v -n és w -n kívül. Így pl. minden kör kétszeresen összefüggő gráfot alkot.

A csővezeték-hálózatok elemeinek geometriai kapcsolódása hurokélt nem tartalmazó összefüggő irányítatlan gráffal, míg a hálózat feltételezett vagy valóságos áramképe összefüggő irányított gráffal szemléltethető. Mind az irányított, mind az irányítatlan gráfokban kiválaszthatók, illetve megkülönböztethetők utak. Útnak nevezzük a gráf éleinek és csúcsainak egy olyan összefüggő sorozatát (tulajdonképpen a gráf egy részgráfját), amelyben minden él és minden csúcs csak egyszer fordul elő (1.1. ábra). Az útnak egy kezdő- és egy végpontja van. Irányított gráfokban csak az olyan élsorozatot nevezzük útnak, amelyben az élek irányítása megegyező, tehát az élek irányítását követve az élsorozat bejárható.

A gráfok tartalmazhatnak köröket (hurkokat), vagy lehetnek ún. tiszta fastruktúrájúak (1.1. ábra). A kör olyan „út”, amelynek kezdő- és végpontja egybeesik.

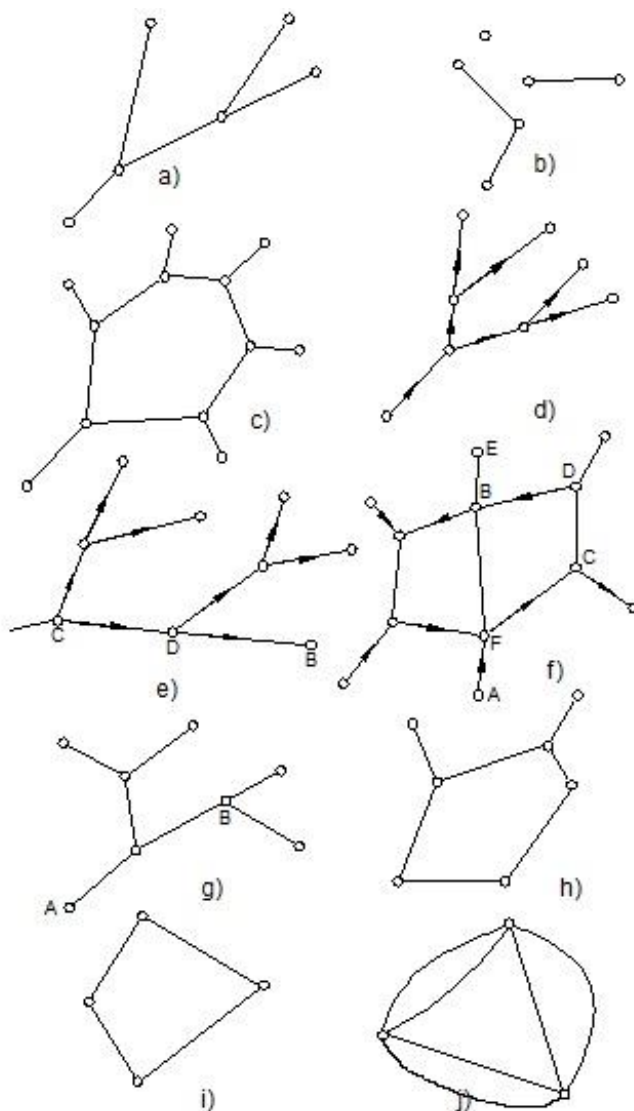
Az ún. sugaras rendszerű csőhálózatok irányítatlan gráfja fastruktúrájú gráf, míg az ún. hurkolt csőhálózatok gráfja köröket tartalmaz.

A valóságos hálózatok áramlását leíró irányított gráfokra a következő megállapításokat tehetjük:

- sugaras hálózatok áramképének irányított gráfja irányított fa,
- hurkolt hálózatokban kialakuló áramkép irányított gráfja ún. párhuzamos éleket vagy párhuzamos utakat tartalmaz.

Egy gráf struktúrája legkényelmesebben mátrixok felhasználásával írható le. E célra az ún. illeszkedési és csúcs- vagy szomszédossági mátrixok használhatóak fel. Illeszkedési mátrix alkalmazásakor a gráf csúcsait és éleit nevekkal (célszerűen sorszámokkal) látjuk el. Az

illeszkedési mátrixban a gráf csúcsai a mátrix sorainak, míg az élei a mátrix oszlopainak felelnek meg, és a mátrix a_{ij} eleme - attól függően, hogy értéke 1 vagy 0 - azt mutatja, hogy a gráf j-edik éle illeszkedik-e az i-edik csúcsra vagy nem.



1.1. ábra: A gráfok ábrázolása és osztályozása

1.3. A csőhálózati áramlások megmaradási egyenletei, „peremfeltételei” és meghatározottsága

Csővezeték-hálózatokban az áramlás jellemzői (a tömegáram, valamint a nyomáseloszlás) leírhatóak:

- a tömegmegmaradást kifejező ún. csomóponti (csúcsonti) egyenletekkel, valamint
- az energia megmaradására utaló ún. hurokegyenletekkel és útegyenletekkel.

Beláthatóan minden útegyenlet formailag ekvivalens egy olyan pszeudohurokra felírt hurokegyenlettel, amelyet úgy kapunk, hogy az út kezdő- és végpontját összekötjük egy, a gráfhoz nem tartozó végtelen nagy ellenállású segédéllel. Mivel a végtelen nagy ellenállású élen áram nem folyhat, a pszeudohurokokat tartalmazó gráf áramlástanilag ekvivalens az eredeti gráffal. Ezek alapján tehát a megmaradási egyenletek elvileg minden esetben felfoghatók csomóponti és hurokegyenletekként.

A hálózati áramlást akkor tekinthető teljesen meghatározottnak, ha ismert

- minden élen az áram nagysága, és
- minden csomópontban az áramló közeg abszolút nyomása (potenciálja),

vagy ami ezzel ekvivalens: minden élen ismert a nyomásvesztés (potenciálesés) nagysága és a csomópontok geodetikus magassága.

Egy vizsgált hálózat ismert adatai és a hálózati áramlás teljes meghatározottsága között a kapcsolatot a megmaradási egyenletek teremtik meg.

Ha a hidraulikai analízis feladata nem korrekt kitűzésű, akkor az előírt feltételekkel, illetve az előírt adatokkal végtelen sok áramlási kép megvalósítható, vagy egyetlen fizikailag reális áramlási kép sem állítható elő. Az első esetben az áramlásra kirótt feltételek „alulhatározottságáról”, míg a második esetben azok „túlhatározottságáról” beszélünk.

A hálózat teljes meghatározottsága e számú áram és c számú csomóponti potenciál ismeretét jelenti. Mivel e számú független megmaradási egyenlet írható fel egy hálózatra, ezért nyilvánvalóan c számú jellemző szabad megválasztása engedhető meg. Tehát egy korrekt kitűzésű hálózatanalízis-feladatban c számú áram, illetve potenciál együttes előírása lehetséges, illetve szükséges. Ha a csomópontokra a betáplálások, illetve elvételek nagysága írható elő, akkor - mivel csak $c - 1$ számú betáplálás és elvétel adható meg egymástól függetlenül - egy csomóponti potenciálértéket még meg kell határozni. Ha valamely csomópontra nem írunk elő elvételt vagy betáplálást, az hallgatólagosan zérus elvételt vagy betáplálást jelent, és bele kell számítani a szabadon választott c számú jellemzők körébe.

2. Rendszertani és rendszerelméleti áttekintés [3][4][5][6]

A gráffal modellezett hálózatot le kell írni rendszertanilag, illeszteni kell a matematikai rendszerelméletben definiált rendszertípusokhoz, és elő kell állítani a hálózat optimális üzemeltetésének úgynevezett műszaki-gazdasági döntési modelljét.

Jelen tanulmány alapvetően az úgynevezett „white box” elemekből felépített és bemenet-kimenet párokkal összekapcsolt, véges számú, diszkrét, állandósult állapotú részekből álló gépészeti rendszereket és technológiákat vizsgálja.

Mielőtt a csatorna-rendszerek tervezésére és üzemeltetésére irányuló konkrét vizsgálati modelleket bemutatnám, röviden áttekintést nyújtok a rendszerek osztályozásáról, típusairól és a matematikai leírás módszertanáról.

2.1. A rendszerek típusai

A rendszer olyan objektum, amely a 2.6. ábra szerinti elemekből áll.

A matematikai rendszerelmélet legteljesebb kifejtését adja Zadeh és Polak könyve.

A konkrét rendszerek, és így a gépészeti rendszerek osztályozhatók

- időbeli viselkedésük szerint,
- ok, okozati meghatározottsága szerint,
- morfológiai alapon.

A dolgozatban alkalmazott vizsgálati módszer abban áll, hogy minden gépészeti rendszer leképezhető a matematikai rendszerelméletben definiált valamely típusú bemenet – kimenet modellre.

A rendszerek típusai időbeli viselkedésük alapján:

- állandó rendszer: az állapota az időben nem változik, az objektum tulajdonságai állandóak maradnak, a bemeneteket és kimeneteket időbeli állandóság jellemzi,
- változó rendszer: állapota az időben változik, a rendszert leíró kimenet-bemenet párok időfüggvények.

A rendszerek típusai a rendszerelemek térbeli kapcsolata szerint:

- folytonos rendszer: elemei a térben összefüggően helyezkednek el, a bennük lezajló változások térben folytonos függvénnyel írhatók le,
- diszkrét rendszerek: elemei térben elkülönülten, szeparáltan, tagoltan helyezkednek el, amelyek funkcionálisan összehangoltan és összekapcsoltan, egy működési cél megvalósításának érdekében épülnek fel. A diszkrét rendszer lehet egyszerű, vagy összetett rendszer. Az egyszerű rendszer egy elemből áll, a működési célt egy működési relációval összekapcsolt bemenet-kimenet pár halmaz valósítja meg. Az összetett rendszer több összekapcsolt elemből áll, mindegyik elemet jellemez egy

működési reláció (állapot, állapottranszformáció), amely elemenként a bemenet-kimenet párokat összekapcsolja.

A rendszerek típusai ok, okozati meghatározottsága szerint:

- sztochasztikus rendszer: a rendszerben legalább egy elem működése valószínűségi jellegű, vagyis egy meghatározott bemenethez a kimeneteknek egy időben állandó vagy időben változó spektruma tartozhat, a spektrumnak sűrűségfüggvénye és valószínűség eloszlása van. Az épületgépészeti rendszerek szigorúan véve sztochasztikus rendszerek. A sztochasztikus jelleget a kielégítendő igények valószínűségi jellege adja.
- determinisztikus rendszer: minden elemét az jellemzi, hogy egy meghatározott bemenethez egy kimenet tartozik.

Minden gépészeti rendszernek a matematikai rendszerelmélet absztrakt rendszerét feleltetjük meg, a gépészeti rendszert egy absztrakt rendszerre képezzük le. A sztochasztikus rendszereknél alkalmazott tárgyalásmód alapvetően nem változik a determinisztikus rendszerekhez képest sem. A mérlegegyenletek, mint megmaradó tulajdonságokkal rendelkező paraméterekre felírt összefüggések változatlanok.

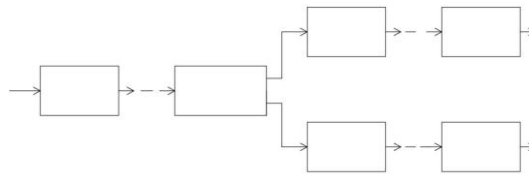
A diszkrét rendszerek típusai morfológia, azaz a rendszerelemek egymáshoz való kapcsolódásának geometriája alapján:

- soros,
- nem soros,
 - szétágazó,
 - összeágazó,
 - hurkolt,
 - előrecsatolt,
 - visszacsatolt.

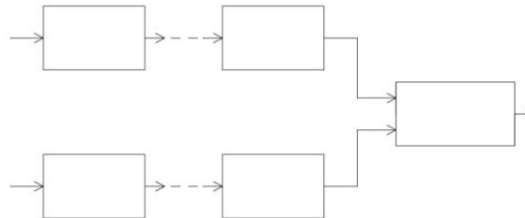
A rendszerek típusait morfológiai megkülönböztetés szerint az ábrák (2.1. ábra, 2.2. ábra, 2.3. ábra, 2.4. ábra, 2.5. ábra) mutatják.



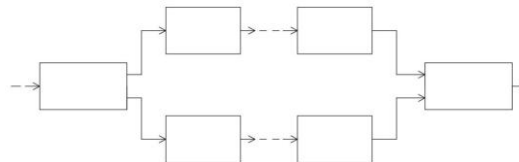
2.1. ábra: Soros rendszer



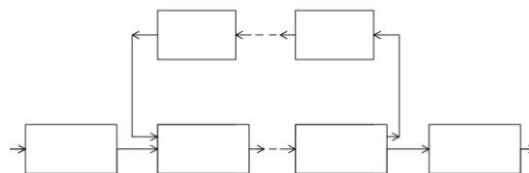
2.2. ábra: Szétágazó rendszer



2.3. ábra: Összeágazó rendszer



2.4. ábra: hurkolt, előrecsatolt rendszer



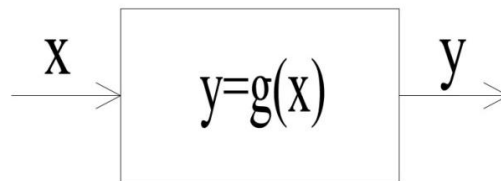
2.5. ábra: Hurkolt, visszacsatolt rendszer

Az épületgépészeti gyakorlatban soros rendszert képez például egy egyszerű, egyutas légtechnikai rendszer. Szétágazó rendszert alkotnak a sugaras távfűtő hálózatok, gázhálózatok és vízhálózatok, ha nem tartalmaznak hurkokat. Összeágazó rendszerként modellezhetők a csatornahálózatok. Hurkolt, előrecsatolt rendszerről beszélhetünk például a hurkolt távfűtő hálózatok esetében. Hurkolt, visszacsatolt rendszert képeznek például a rekuperációt tartalmazó klimatechnikai rendszerek.

2.2. A konkrét rendszerek absztrakciója. A matematikai rendszerelmélet alapjai

A matematikai rendszerelméletben a rendszer bemenet-kimenet párok halmaza. Az állapot a bemenet-kimenet párokat összekapcsoló relációk. A rendszer lehet állandó és változó állapotú. A változó állapotú rendszerben az objektum tulajdonságait időfüggvények írják le.

Az x bemenettel és y kimenettel jellemzett absztrakt objektumot a szokásos módon a 2.6. ábra mutatja be sematikusán, amelyet „white - box” modellnek is nevezünk.



2.6. ábra: Konkrét rendszer-, rendszerelem absztrakciója, bemenet - kimenet modell

A továbbiakban az előbb említett Zadeh és Polak, továbbá Aris és Nemhauser tárgyalásmódját követem. A szennyvízcsatorna-rendszerek vizsgálatában a rendszert az 2.6. ábra szerint olyan rendszerelemekre bontom, amelyek viselkedését és működését kimenet–bemenet változókkal és az azokat összekapcsoló relációkkal, mérlegegyenletekkel írható le.

2.3. A gépészeti rendszerek leírása a matematikai rendszerelmélet segítségével

A gépészeti rendszer leképezhető az előzőekben bemutatott bemenet-kimenet modellre.

Az állandó (állandósult állapotú) rendszerek matematikai absztrakcióját az 2.6. ábra mutatja, amely séma a rendszer állandósult állapotait írja le. Adott az a függvény, amely egyértelműen rögzíti, hogy az x bemenetre a rendszer milyen y választ ad, az x bemenethez tartozóan a rendszernek y az állandósult állapota. Ez a modell nem vizsgálja azt a kérdést, hogy amennyiben a rendszer x_0 bemenete x_1 -re változik, milyen időbeli átmenettel és milyen időpontra valósul meg az x_1 -hez tartozó y_1 állapot.

3. Gépészeti rendszerek [3][4][5][6]

Gépészeti elemek, alkotórészek halmaza, amelyek egymással anyagi, energetikai és informatikai kapcsolatban állnak. A rendszer környezetétől jól elhatárolható, de azzal is szintén anyagi, energetikai és informatikai kapcsolatban állhat. Feltételezem az absztrakt matematikai rendszerre való leképezését, s így a vizsgálataim során megkeresem a leképezések azon sorozatát, amelynek végső eredménye a gépészeti rendszerrel azonos (izomorf vagy homomorf) absztrakt rendszer.

3.1. A gépészeti rendszerek típusai, leírásai

A gépészeti rendszereknek a tervezése mind a mai napig sok esetben mellőzi az integrált rendszerszemléletet, a rendszerelemek kapcsolatainak mély analízisét, a mérlegegyenletek

teljes körű felírását, és ami különösen sajnálatos, a rendszerek időbeli viselkedésének, dinamikájának vizsgálatát. Az utóbbi időben igényként merült fel a rendszerek tervezésével és üzemeltetésével kapcsolatban az optimumkeresés, az érzékenységvizsgálat, valamint a kockázati elvű méretezések „filozófiájának” és módszertanának alkalmazása.

A fentiek érdekében ismertetem az absztrakt matematikai rendszerelmélet alapjait és azt a módszertant, amelyet ez az elmélet felkínál a gépészmérnök számára a gépészeti rendszerek teljes körű vizsgálatára és optimalizációjára. Aris, Nemhauser, Bellmann valamint Garbai vizsgálataira támaszkodva bemutatom a soros és az összeágazó rendszerek gráfelméleti, döntéelméleti modelljeit, a Bellmann-féle optimalitási elvet alkalmazó dinamikus programozást a gazdasági célfüggvénnyel irányított rendszerek tervezési és üzemeltetési optimumának megkeresésére. Az eddigi vizsgálatok és becslések alapján ezeknek a módszereknek az alkalmazása a nagy gépészeti rendszerek beruházásában és üzemeltetésében 10-15 % megtakarítást is eredményezhet.

3.1.1. A gépészeti rendszerek leírása állandósult állapotban

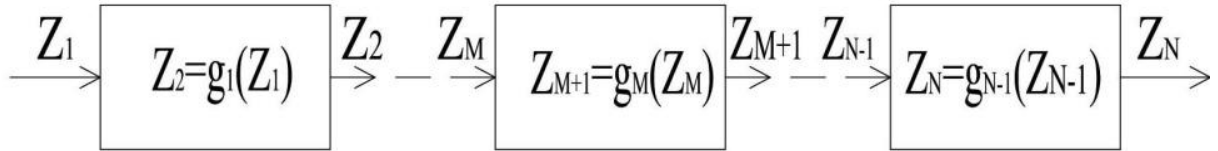
A gépészeti rendszerek többnyire összetett, diszkrét rendszerek. Többségük determinisztikus, de működhetnek sztochasztikus állapotban is. A cél az, hogy a matematikai rendszerelméletben megfogalmazott módszertant alkalmazva leképezések és a modellalkotások sorozatán keresztül fel tudjuk írni a gépészeti rendszerrel azonos (izomorf) absztrakt matematikai rendszert.

Az összetett gépészeti rendszerek elemeinek belső kapcsolatait gráfok és a gráfokon értelmezett mérlegegyenletek segítségével írhatók le. A gráf pontok és élek, illetve azokon értelmezett relációk halmaza. A gráf pontjai a gépészeti rendszer alkotórészeinek feleltethetők meg, míg a gráf élei azt mutatják, hogy egy alkotóelem mely másik alkotóelemmel áll valamilyen típusú kapcsolatban. A rendszerelemek kapcsolatát leíró gráfok minősége, bonyolultsága és a leírás mélysége más-más típusú és minőségű gráffal fejezhető ki. A gráfok morfológiai azonosságban vannak a rendszerek morfológiai típusaival (2.1. ábra, 2.2. ábra, 2.3. ábra, 2.4. ábra, 2.5. ábra). A gráfok csomópontjainak a boxok felelnek meg, míg a boxokat összekötő vonalak a gráfok éleinek.

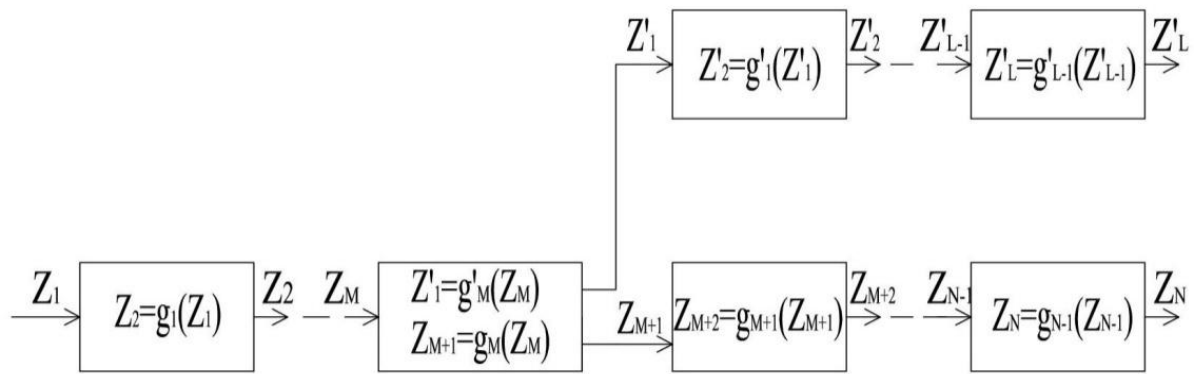
A gépészeti rendszerek leírásában alkalmazott gráfok a következők:

- kapcsolatgráf: az egyes alkotóelemek tisztán formális, úgyszólván térbeli, geometriai kapcsolatát fejezi ki (2.1. ábra, 2.2. ábra, 2.3. ábra, 2.4. ábra, 2.5. ábra)

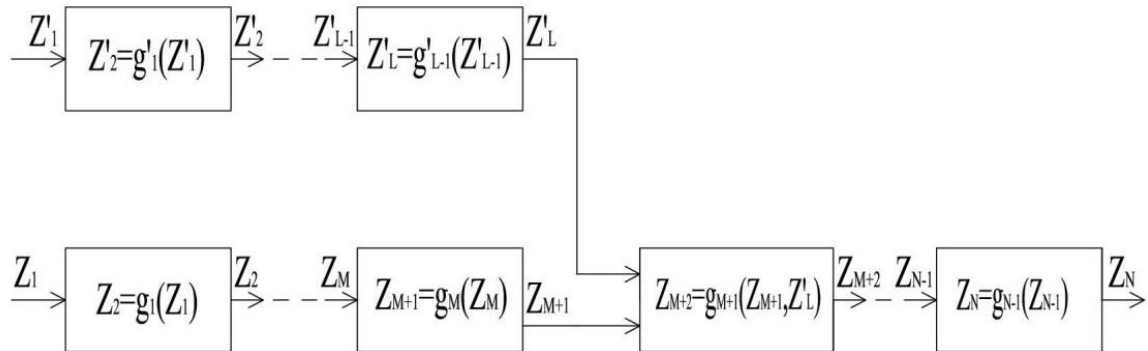
- technológiai gráf: már magasabb fokát képviseli a leírásnak. A technológiai gráfban már vizsgálható az egyes alkotóelemek közötti anyag-, energiaáramokat és informatikai jeleket. Ez a gráf már a működést fejezi ki, nem csak a kapcsolatokat. A technológiai gráfok típusai morfológiai alapon (lásd: 3.1. ábra, 3.2. ábra, 3.3. ábra, 3.4. ábra, 3.5. ábra):



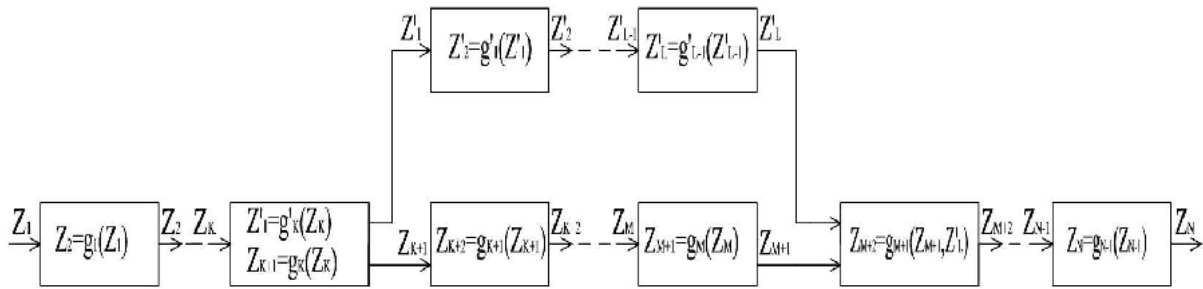
3.1. ábra Soros rendszer



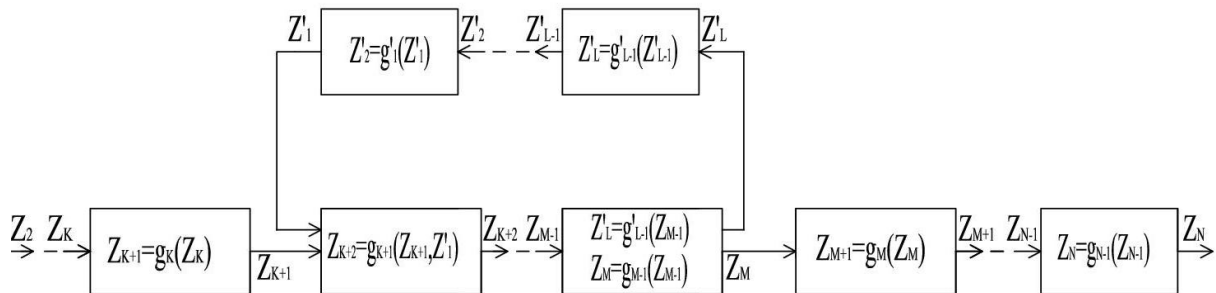
3.2. ábra: Szétágazó rendszer



3.3. ábra: Összeágazó rendszer



3.4. ábra: Hurkolt, előrecsatolt rendszer

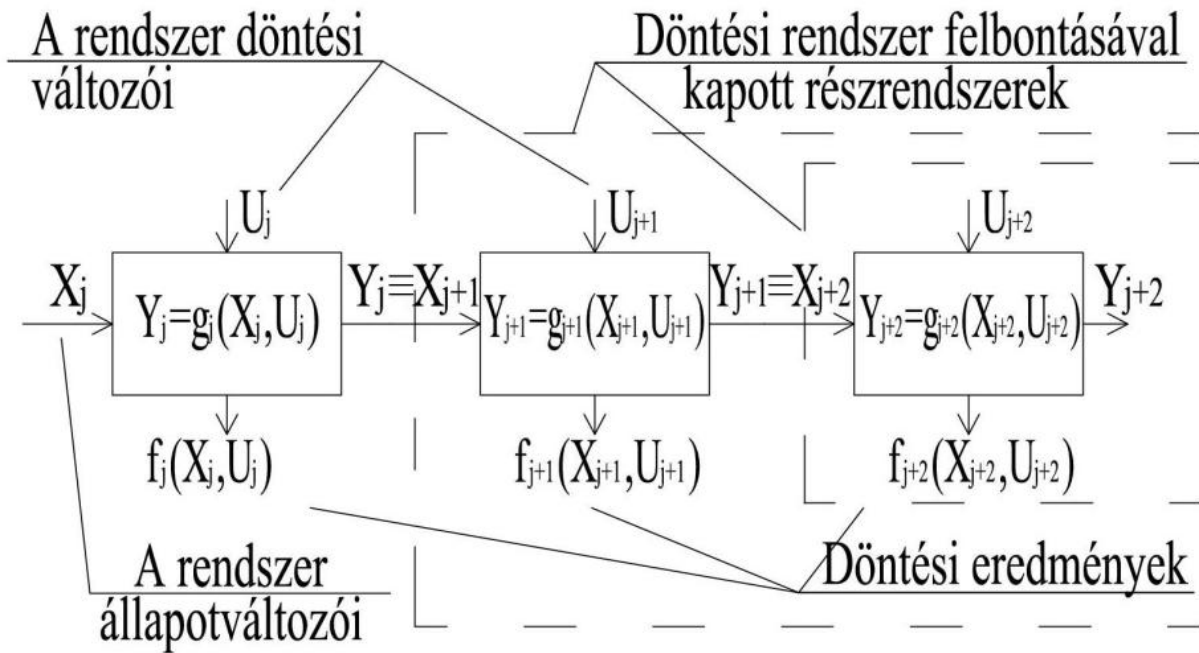


3.5. ábra: Hurkolt, visszacsatolt rendszer

- műszaki-gazdasági döntési gráf: a szabályozott rendszert írja le, a beavatkozásokat, az inputokat és outputokat, a döntéseink eredményeit és mindezeket a mérlegegyenletek rendszerével kapcsolja össze. Ez adja a legteljesebb leírást. A műszaki-gazdasági döntési gráfhoz már illeszthetők a szabályozási feladat illetve a tervezéshez és működtetéshez szükséges döntési modellek.

A döntési modellek általában elméletileg egyben optimalizációs modellek. Olyan rendszereket tervezünk, és azokat úgy kívánjuk üzemeltetni, hogy a rendszer létesítésével és üzemeltetésével kapcsolatos költségek minimálisak legyenek. Az optimalizációs döntési modellek mindig tartalmaznak egy célfüggvényt is, amely döntéseink gazdasági eredményét matematikailag írja le.

A döntési modellek felépítését a 3.6. ábra mutatja.

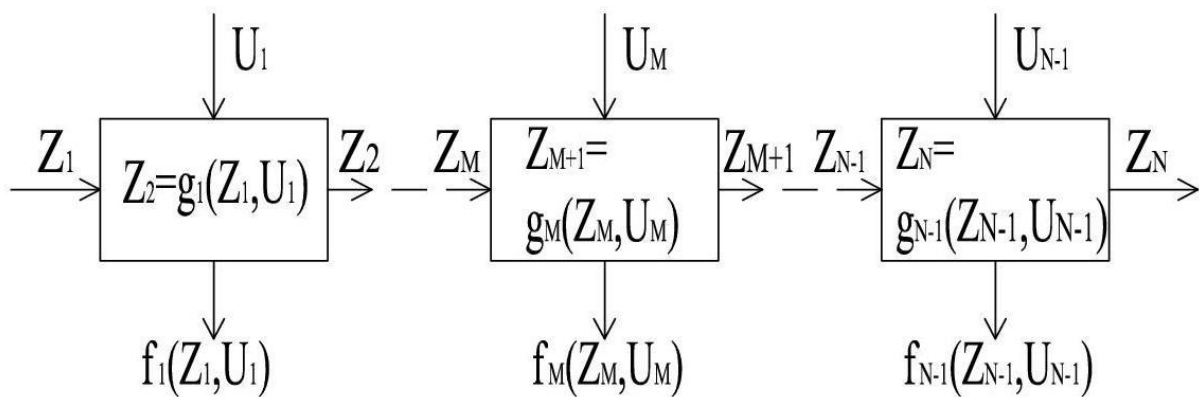


Döntési cél:

$$C = f_1(X_1, U_1) + \dots + f_j(X_j, U_j) + f_{j+1}(X_{j+1}, U_{j+1}) + \dots + f_N(X_N, U_N) \rightarrow \min!$$

3.6. ábra: A döntési rendszer szemléltetése

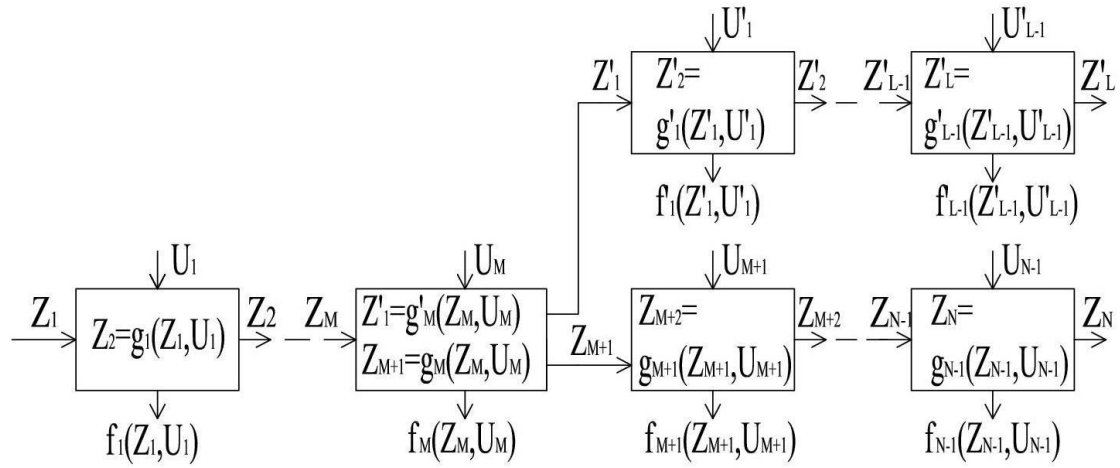
A különböző morfológiájú döntési rendszereket a 3.7.-3.11. ábrák szemléltetik.



Döntési cél:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_M + \dots + f_N \rightarrow \min!$$

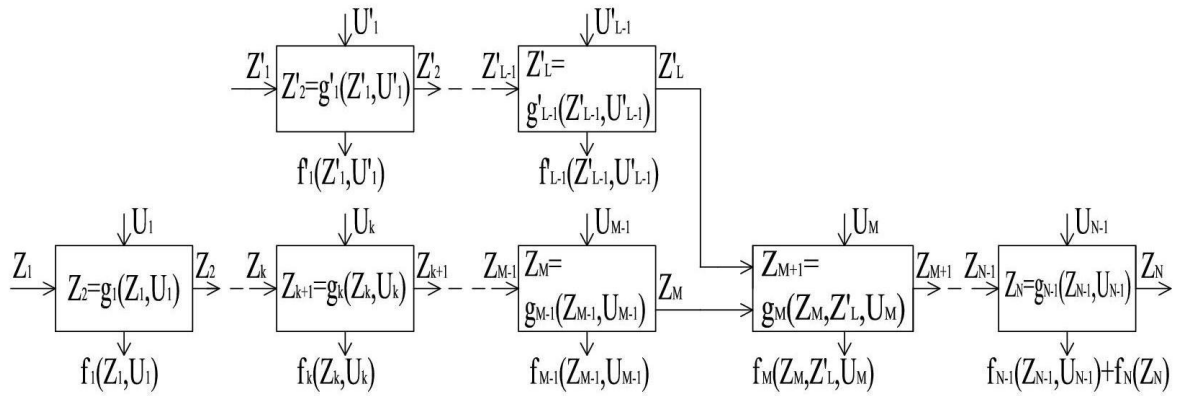
3.7. ábra: Soros rendszer döntési modellje



Döntési cél:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_1 + \dots + f_{L-1} + \dots + f_N \rightarrow \min!$$

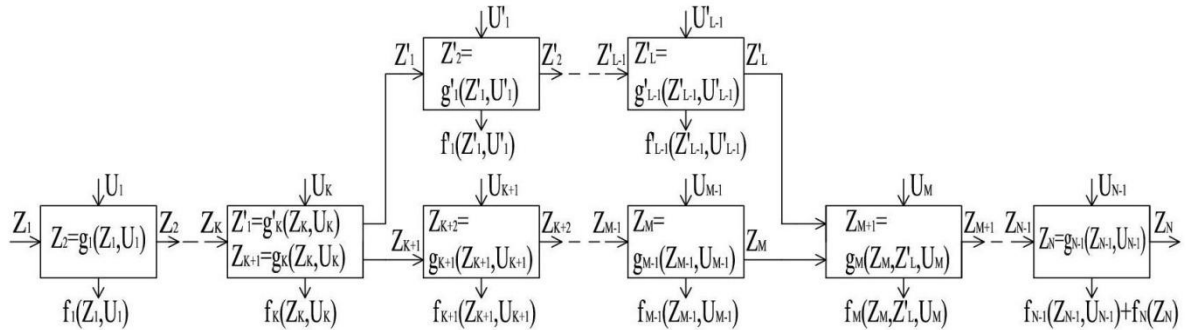
3.8. ábra: Szétágazó rendszer döntési modellje



Döntési cél:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_1 + \dots + f_{L-1} + \dots + f_N \rightarrow \min!$$

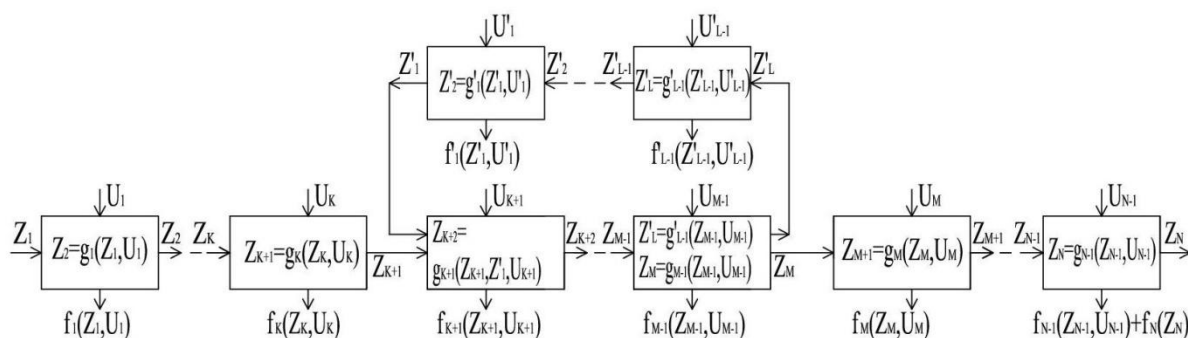
3.9. ábra: Összeágazó rendszer döntési modellje



Döntési cél:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_1 + \dots + f_{L-1} + \dots + f_N \rightarrow \min!$$

3.10. ábra: Előrecsatolt rendszer döntési modellje



Döntési cél:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_{L-1} + \dots + f_N \rightarrow \min!$$

3.11. ábra: Visszacsatolt rendszer döntési modellje

A tervezési feladatokban a gépészeti rendszerek létesítési, méretezési paramétereit határozzuk meg az úgynevezett mértékadó, névleges terhelési állapotra, az ekkor jelentkező fogyasztási igények alapulvételével. A tervezési paraméterek lehetséges értékhalmozából azokat a paraméter-értékeket szükséges kiválasztani, amelyekkel a rendszer létesítési és majdani üzemeltetési költségei együttesen minimumot adnak.

Meglévő rendszer üzemeltetésének rendszerelméleti vizsgálata kétféle feladat, úgynevezett alap- vagy inverz feladat megoldását jelentheti:

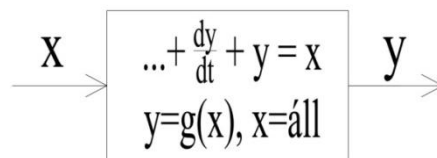
- **alapfeladat:** tetszőleges inputhoz keressük az outputot. Ez a rendszer determinisztikus, ha egy határozott inputhoz határozott output tartozik, vagy sztochasztikus, ha egy meghatározott inputhoz az outputok egy spektruma tartozhat. Az alapfeladatra általában nem értelmezhető optimalizáció.
- **inverz feladat:** egy megkívánt outputot milyen inputtal tudunk megvalósítani. (pl.: légtechnikai rendszereknél ismerjük a belső tér kívánt paramétereit (outputok), és keressük hozzá azt a berendezést, és/vagy azt az üzemmódot (inputot), ami ezeket a kívánt értékeket elő tudja állítani.) Az inverz feladatban felmerül az optimalizáció igénye. Az inverz feladatoknak az egyik optimalizálási szempontja a gazdaságosság. Az optimalizálás során keressük azt a megoldást, amellyel a beruházási-, és üzemeltetési költségek minimalizálhatóak. Az ábrák szerint keressük a célfüggvények minimumát, azaz $\sum f_i \rightarrow \min!$. Az inverz feladatok leírására és megoldására alkalmazott döntési modellek elvi vázlatát (white box modell) a 3.1. ábra szemlélteti. Egy döntési modell a technológiai gráfot, az elemek közötti input-output kapcsolatokat, a döntési változókat és a döntési eredményeket szemlélteti.

Definiálható még úgynevezett szállítási feladat, amely azt fejezi ki, hogy a determinisztikusan vagy sztochasztikusan ismert betáplálásokat a rendszer milyen feltételek mellett tudja eljuttatni a kivételi vagy gyűjtő pontba. Ennél a feladtnál is lehetséges az optimalizáció.

3.1.2. A gépészeti rendszerek leírása nem állandósult állapotban. Az állandó és változó állapotok leírásának összekapcsolása

Az absztrakt rendszerekben az állandó és változó állapotok bemenet-kimenet relációi közötti kapcsolat úgy található meg, hogy a változó állapotú rendszert leíró differenciálegyenlet megoldásával a változások lefolyása után azt az y kimenetet kell kapni, amelyek között állandósult állapotra az $y=g(x)$ egyenlet érvényessége áll fenn.

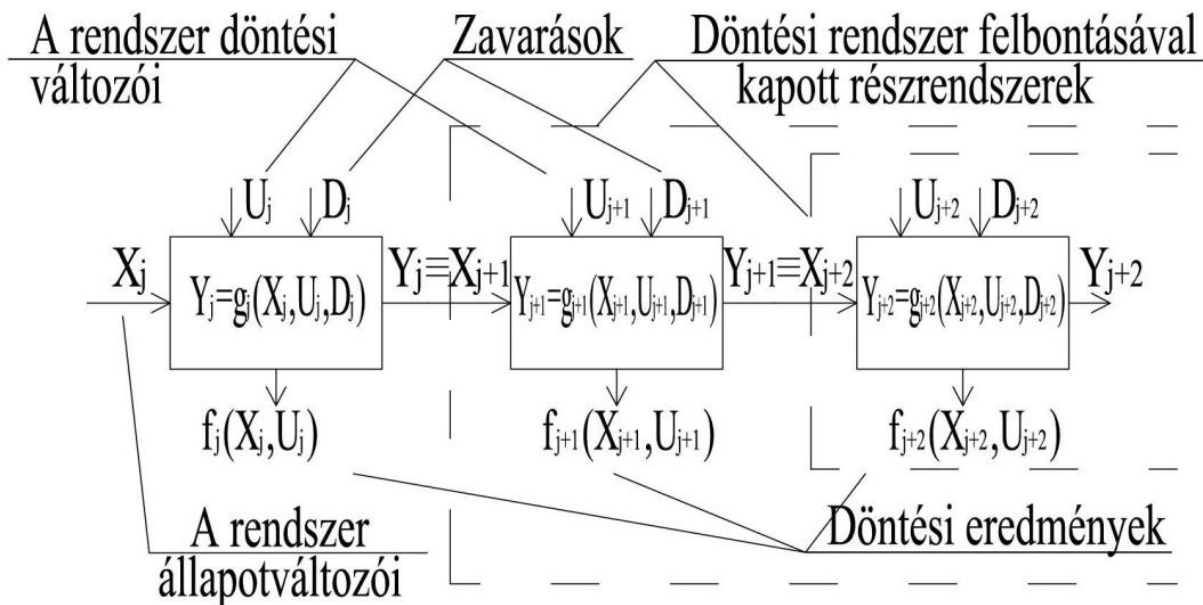
Egy rendszerelem teljes körű leírása tehát



3.12. ábra: Rendszerelem komplex bemenet-kimenet sémája

3.1.3. Zavarások a rendszerek működésében

A 3.12. ábra szerint az $x = y + \frac{dy}{dt} + \dots$ differenciálegyenlet lineáris, s ezzel azt a hagyományos szemléletet tükrözi, amely szerint a bemenő változó időbeli változására a kimenő változó késleltetéssel reagál. Ha a bemenő változó egységugrás, akkor a válasz függvény az úgynevezett átmeneti függvény. Ha a bemenő jellemző változását zavarás idézi elő, akkor a kimenet értéke a parancsolt értéktől eltér. A zavarás megszűnte után bizonyos feltételek teljesülése esetén a kimenet értéke visszaáll. A szabályozás feladata a zavarás kompenzációja. Ez történhet a bemenetre történő beavatkozással, vagy egyéb beavatkozás alkalmazásával.



Döntési cél:

$$C = f_1(X_1, U_1) + \dots + f_j(X_j, U_j) + f_{j+1}(X_{j+1}, U_{j+1}) + \dots + f_N(X_N, U_N) \rightarrow \min!$$

3.13. ábra: Döntési rendszerek zavarásokkal

Ha a zavarás állandósult, a szabályozás is folyamatosan működik. Ha a zavarás következtében a bemenet új értéken stabilizálódik, akkor stabil rendszerek esetében a kimenet értéke is új stabil állapotba kerül. Ha a zavarás állandósult marad, viszont a kimenetet az eredeti értékén kívánjuk tartani, akkor a zavarás kompenzációját folyamatosan fenn kell tartani.

A szabályozás történhet online módon, digitális jelátvitellel, számítógépes folyamatirányítással, a rendszer bemenet – kimenet analízisével, vagy a folyamatok matematikai modellezésével.

3.1.4. Rendszerek szabályozása. A szabályozás leképezése absztrakt rendszerre

A rendszerek definíció szerint valamilyen működési célt valósítanak meg. Működésüket úgy állíthatjuk be, hogy a mérlegegyenletek rendszerén keresztül kiszámítjuk, hogy a megkívánt kimenethez (ez a működési cél) milyen bemenetet és milyen döntéseket kell hoznunk. Ha a rendszert a környezetéből zavarások érik, akkor beavatkozások nélkül a működési cél teljesítése nem lehetséges. A működési cél tehát a kimenet parancsolt értékének helyreállítása, s ennek érdekében a rendszer állapotát szükséges módosítani, amely a bemeneti változók, illetve a döntési változók módosításával érhető el.

A rendszer működésének a zavaró jellemzők ellenében a bemenet és a döntési változó olyan értelmű és mértékű módosítását, amelyekkel a rendszer működésének stabil kimenetét

helyreállítjuk, szabályozásnak nevezzük. A szabályozás technológiáját és szoftverét tartalmazó rendszerelemet a rendszertől viszonylagosan elkülönítve kell ábrázolnunk. Ugyanígy a rendszer műszaki, gazdasági, döntési grájában is módosítást kell végrehajtanunk. A döntési változók csoportjában külön kell választanunk a szabályozóval vezérelt beavatkozó jellemzőket, amelyek a zavarás ellenében az egyéb döntési változók és a bemenetekkel együtt a meghatározott, parancsolt értékű kimenetet biztosítják. A zavarás időbeli változásokon, időbeli függvények szerint valósul meg. Nyilvánvalóan a rendszer szabályozott és stabil működésének, illetve állapotának helyreállítása is csak egy időbeli folyamaton keresztül valósulhat meg.

3.2. Gépészeti rendszerek rendszeranalízise

3.2.1. Az alapfeladat megoldása a gépészeti rendszerekre

Az alapfeladat megoldása során a célkitűzés az, hogy a gépészeti rendszer első elemének bemenetét ismertnek feltételezve meghatározzuk, hogy a rendszer többi elemének kimenetei és a rendszer utolsó elemének kimenete milyen értékű lesz. Ehhez sok esetben természetesen ismerni kell a többi elem környezetéből érkező véletlen vagy tervezett hatásokat. A feladat úgy oldható meg, hogy ismerve minden rendszerelemnek a kimenetét és bemenetét összekapcsoló állapotegyenleteket, minden bemenetből meghatározható a rendszerelem kimenete. Ez a kimenet a következő elem bemenetét képezi, amellyel ismét meg lehet határozni a soron következő elem kimenetét. Ily módon eljuthatunk a rendszer utolsó elemének kimenetéhez.

Ez soros rendszer esetében (3.7. ábra) formálisan a következő képlettel írható le matematikailag:

$$z_N = g_N \left(g_{N-1} \left(g_{N-2} \left(\dots \left(g_2 (g_1(z_1)) \right) \dots \right) \right) \right). \quad (3.1)$$

Az úgynevezett hurkolt rendszereknél azonban többnyire iterációra van szükség, amelyet majd az adott rendszernél ismertetek.

3.2.2. Az inverz feladat megoldása a gépészeti rendszerekre

Ez a leggyakoribb és legtipikusabb feladat. A kérdés ilyenkor az, hogy egy adott fogyasztói igényhez, hőigényhez, energiaigényhez légtechnikai, klimatechnikai igényhez, légállapothoz a rendszer első elemében milyen inputokat kell megvalósítani, tehát milyen hőmennyiséget, hőteljesítményt, milyen levegőáramot, milyen entalpiával, milyen légállapottal kell betáplálni.

Az inverz feladathoz definiálható optimum kritérium. Az inverz feladatot optimálisan kell megoldani, a fogyasztói igényeket optimálisan kell kielégíteni, ami azt jelenti, hogy minimális energiafelhasználással, illetve minimális költség mellett kell kielégíteni a fogyasztói igényeket.

3.2.3. Rendszerelméleti optimalizációs módszerek

Elméletileg sokféle matematikai módszer létezik, de a dolgozatban csak egy dekompozíciós módszert mutatok be, amely azonban nem csak módszer, hanem egyben szemléleti mód is.

A rendszer bemenet-kimenet modelljével írható le, és célfüggvény rendelhető a rendszer működéséhez. Az optimalizációs feladat megoldása azt jelenti, hogy azt kell keresni, hogy milyen döntéseket és milyen bemenetet szükséges alkalmazni a rendszer működését leíró mérlegegyenletekben a célfüggvény szélsőértékének eléréséhez.

A rendszerek optimális üzemeltetési pontjának keresésére leggyakrabban dekompozíciós módszereket alkalmaznak, és ezek közül a diszkrét dinamikus programozást mutatom be. Ennek alkalmazása során először az optimalizációs feladatot, mint diszkrét programozási problémát, szükséges átfogalmazni egy diszkrét, determinisztikus döntési folyamattá, a hálózat elemei kapcsolásának megfelelően.

Egy döntési folyamat döntések sorozatából, döntési fokozatokból áll. Egy döntési folyamatnak az a jellegzetessége, hogy a megelőző döntések sorozata egyértelműen meghatározza az aktuális döntés előtt a rendszer állapotát. Következésképpen minden döntés függ az őt megelőző döntésektől, és befolyásolja az őt követő döntéseket.

Azt a matematikai módszert, amely egymástól függő döntések sorozatát optimalja, dinamikus programozásnak nevezzük. A döntések sorozatában minden döntés számára a döntés kritériuma a dinamikus programozás optimalitási elvének kielégítése.

Az optimalitás elve eredeti megfogalmazásában kimondja, hogy:

„egy optimális döntéssorozat mindig rendelkezik azzal a tulajdonsággal, hogy bármilyen legyen is a kezdeti állapot és a kezdeti döntés, a további döntés, a további döntések optimális döntéssorozatát alkotnak az első döntés és a kezdeti állapot eredményeképpen kialakult új állapothoz képest”.

Tehát az optimalitás elvének értelmében, az egyes fokozatokban a döntéseknek úgy kell létrejönniük, hogy figyelembe kell venni az egész döntési folyamat lehetőségeit, és a rendszer adott állapotához képest ennek optimálisnak kell lennie. Döntéseink matematikai értelemben,

általánosságban egy rekurzív függvényegyenletet¹ elégítenek ki. A függvényegyenlet - az úgynevezett soros rendszerre- az általános döntési folyamat jelöléseivel a következő (3.14. ábra).

$$O(z_M) = \min_{u_M} \{f_M(z_M, u_M) + O(z_{M+1})\}. \quad (3.2)$$

Illetve az adott fokozatot jellemző állapottranszformáció bevezetésével:

$$O(z_M) = \min_{u_M} \{f_M(z_M, u_M) + O(g(z_M, u_M))\}. \quad (3.3)$$

A függvényegyenlet az állapottranszformáció alkalmazásával már csak a kapcsolatváltozó (z_M) és a döntési változó (u_M) függvénye. Az $O(z_M)$ az úgynevezett optimális függvény, amely minden z_M kapcsolatváltozó értékhez tartalmazza a döntési fokozathoz tartozó optimális döntéseket. Tulajdonképpen tehát

$$O(z_M)_{opt} = f_M(z_M, u_{M,opt}) + O(g(z_M, u_{M,opt})). \quad (3.4)$$

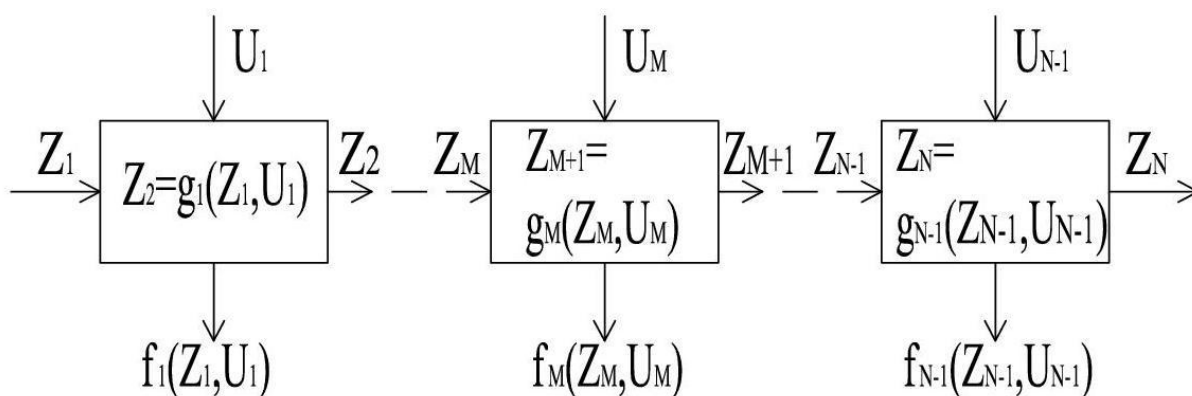
A (3.3) egyenlet megoldása a következő: minden egyes z_M értékhez meghatározzuk azt az u_M -értéket, amellyel a zárójelben lévő két függvény összege minimális. Az optimumkeresés sima, deriválható függvények esetén elméletileg történhet az u_M változó szerinti derivált előállításával, amit zérussal teszünk egyenlővé, és az így kapott egyenletet megoldjuk u_M -re.

A gyakorlati számításokban azonban többnyire csak a numerikus eljárások a célravezetők: például az úgynevezett optimalizációs mátrixok előállításával.

3.3. A soros rendszerek optimalizációja

A soros rendszerek (serial system) absztrakt döntési modelljét az 2.6. ábra mutatja. A döntési modellt white box modellnek is nevezik. A modell tartalmazza a döntési változókat (U_M), a döntési eredményeket (f_M), és a bemenetek-kimenetek közötti összefüggéseket (többnyire mérlegegyenletek) (g_M).

¹ A függvényegyenlet olyan összefüggés, amelyben az egyenlőség nem egy változó konkrét értékére teljesül, hanem egy függvény az ismeretlen. Az egyenlőség egy meghatározott függvényre, illetve a függvény összes lehetséges értékére teljesül.



Döntési cél:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_M + \dots + f_N \rightarrow \min!$$

3.14. ábra: Soros rendszer döntési modellje

Az optimalizáció történhet visszafelé (backward), illetve előrehaladó (forward) rekurzióval. Leggyakrabban a visszafelé haladó rekurzív optimalizálást alkalmazzuk, tekintve, hogy a rendszer kimenete, amely általában valamely fogyasztói igény pl. hőigény, adottnak tekinthető. A visszafelé haladó rekurzióban a függvényegyenlet rekurzive, az utolsó fokozattól kezdve, fokozatonként megoldható. Vagyis az adott fokozatban, a z_m kapcsolatváltozó függvényében, a megvizsgált fokozatok összességére nézve az optimális megoldások halmaza áll elő az U_m döntési változó alkalmas megválasztásával. A rekurzív függvényegyenlet fokozatról-fokozatra történő felírásával és megoldásával a feladat részfeladatok sorozatára bontható.

3.3.1. Soros rendszer optimalizációja visszafelé haladó rekurzióval

Célfüggvény:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_M + f_{M+1} + \dots + f_{N-1} + f_N \rightarrow \min!. \quad (3.5)$$

Az optimalizáció tulajdonképpen feltételes szélsőérték számítás, ahol a feltételi egyenleteket a boxokba írt transzformációs összefüggések képezik. A független változók a döntési változók, amelyek alkalmas megválasztásával a célfüggvény minimalizálható. Az optimalizáció elvileg többféle matematikai módszerrel is elvégezhető, azonban legcélszerűbbnek a (3.2) és (3.3) egyenletekkel megformulázott rekurzív optimalizációt, a dinamikus programozást tartom. Az optimalizáció lépéseit az alábbiakban ismertetem.

▪ **Első lépés**

Felírhatjuk a függvényegyenletet az utolsó döntési fokozatra

$$O_{N-1}(z_{N-1}) = \min_{u_M} \{f_{N-1}(z_{N-1}, U_{N-1}) + f_N(z_N)\}. \quad (3.6)$$

A z_N a fogyasztói igény, ami többnyire adott, ismert érték.

Fennáll, hogy

$$z_N = g_{N-1}(z_{N-1}, U_{N-1}). \quad (3.7)$$

A függvény inverzének segítségével kifejezhető U_{N-1} :

$$U_{N-1} = g_{N-1}^{-1}(z_{N-1}, z_N). \quad (3.8)$$

Ezt behelyettesítjük a (3.6) egyenletbe:

$$O(z_{N-1}, z_N) = \{f_{N-1}[z_{N-1}, g_{N-1}^{-1}(z_{N-1}, z_N)] + f(z_N)\}. \quad (3.9)$$

Ezen lépés után a (3.9) célfüggvény csak a bemeneti és a kimeneti változótól függ. A z_N viszont általában adott, hiszen z_N a kielégítendő igény. Az optimalizáció lehetősége a fokozatban nem adott, mivel az U_{N-1} döntési változót elimináltuk.

▪ **Második lépés**

A soron következő fokozatra is felírható az optimalizációs egyenletet, amiben már szerepel az előző optimum függvény is.

$$O_{N-2}(z_{N-2}, z_N) = \min_{u_{N-2}} \{f_{N-2}(z_{N-2}, U_{N-2}) + O(z_{N-1}, z_N)\}. \quad (3.10)$$

A boxban lévő egyenlet felhasználásával

$$z_{N-1} = g_{N-2}(z_{N-2}, U_{N-2}). \quad (3.11)$$

Ezt behelyettesítjük a (3.10) egyenletbe, és így

$$O_{N-2}(z_{N-2}, z_N) = \min_{u_{N-2}} \{f_{N-2}(z_{N-2}, U_{N-2}) + O_{N-1}(g_{N-2}(z_{N-2}, U_{N-2}), z_N)\}. \quad (3.12)$$

Ennek megoldásával

$$U_{N-2,opt} = \varphi(z_{N-2}, z_N). \quad (3.13)$$

Mivel a (3.12) egyenletet U_{N-2} értékre minimalizáltuk, az U_{N-2} optimális értékének behelyettesítésével csak z_{N-2} és z_N maradt paraméternek.

$$O_{N-2}(z_{N-2}, z_N) = \{f_{N-2}(z_{N-2}, \varphi(z_{N-2}, z_N)) + O(g_{N-2}(z_{N-2}, \varphi(z_{N-2}, z_N)))\}. \quad (3.14)$$

Az optimalizációt tovább folytatva meghatározzuk O_M értéket a fent bemutatott módszer segítségével, majd azt követően eljuthatunk O_1 értékhez, ami az egész rendszer optimumát fogja megadni a z_1 és U_1 függvényében az alábbiak szerint:

$$O_{1opt}(z_1, z_N) = \min_{u_1, z_1} \{O_1(z_1, U_1, z_N)\}. \quad (3.15)$$

Mint említettem, z_N általában adott, ezért annak behelyettesítését követően a rendszer optimális költségének értékét is megkaphatjuk.

A (3.15) egyenlettel tudjuk meghatározni azt az U_1 és z_1 értéket, ami a rendszer optimális működését biztosítja.

Az optimalizáció során, minden közbenső lépésben tároltuk a fokozathoz tartozó optimális döntést, a z állapotváltozó függvényében. Az optimalizációt befejezve azok visszakereshetők.

3.3.2. Soros rendszer optimalizációja előrehaladó rekurzióval

▪ Első lépés

Felírjuk az optimalizációs egyenletet az első fokozatra:

$$O_1(z_2) = \min_{u_1} \{f_1(z_1, u_1)\}. \quad (3.16)$$

A boxban lévő függvény segítségével kifejezzük az u_1 döntési változót. Mivel

$$z_2 = g_1(z_1, u_1), \quad (3.17)$$

ezért

$$u_1 = g_1^{-1}(z_1, z_2). \quad (3.18)$$

A (3.18) egyenletet felhasználva az optimalizációs egyenlet

$$O_1(z_1, z_2) = \min_{u_1} \{f_1(z_1, g_1^{-1}(z_1, z_2))\} = f_1(z_1, g_1^{-1}(z_1, z_2)). \quad (3.19)$$

Mivel a boxban lévő egyenlet segítségével a döntési változót kifejeztük, az optimalizációs függvény csak z_1 és z_2 függvénye.

▪ Második lépés

A z_1 bemenet többnyire ismeretlen. Ekkor az optimalizációs függvényben, mint ismeretlen szerepel (ha ismert az értéke, elhagyható).

$$O_2(z_3, z_1) = \min_{u_2} \{f_2(z_2, u_2) + O_1(z_2, z_1)\}. \quad (3.20)$$

A boxban található g_2 függvényből kifejezzük z_2 állapotváltozó értékét. Mivel

$$z_3 = g_2(z_2, u_2), \quad (3.21)$$

abból

$$z_2 = g_2^{-1}(u_2, z_3). \quad (3.22)$$

Ennek felhasználásával az optimalizációs függvény

$$O_2(z_3, z_1) = \min_{u_2} \{f_2(g_2^{-1}(u_2, z_3), u_2) + O_1(g_2^{-1}(u_2, z_3), z_1)\}. \quad (3.23)$$

Szélsőérték számítást hajtunk végre u_2 szerint. Ha sima, deriválható a függvény, megkeressük a derivált zérushelyét, az ehhez tartozó u_2 értéke az optimális u_2 , vagyis $u_2 = u_{2,opt}$. Az $u_{2,opt}$ visszahelyettesítésével azt kiküszöböljük, de természetesen minden z_3 értékhez más-más $u_{2,opt}$ tartozik:

$$u_{2,opt} = \varphi(z_3, z_1). \quad (3.24)$$

Tehát

$$O_2(z_3, z_1) = f_2(g_2^{-1}((\varphi(z_3, z_1), z_3), \varphi(z_3, z_1)) + O_1(g_2^{-1}((\varphi(z_3, z_1), z_3), z_1). \quad (3.25)$$

A harmadik és a további lépéseket a fenti módszer szerint ismételjük.

▪ **Utolsó lépés**

$$O_{N-1}(z_N, z_1) = \min_{u_{N-1}} \{f_{N-1}(z_{N-1}, u_{N-1}) + f_N(z_N) + O_{N-2}(z_{N-1}, z_1)\}. \quad (3.26)$$

Ha

$$z_N = g_{N-1}(z_{N-1}, u_{N-1}), \quad (3.27)$$

akkor

$$z_{N-1} = g_{N-1}^{-1}(u_{N-1}, z_N). \quad (3.28)$$

A (3.27) egyenlet felhasználásával az optimalizációs függvény:

$$O_{N-1}(z_N, z_1) = \min_{u_{N-1}} \{f_{N-1}(g_{N-1}^{-1}(u_{N-1}, z_N), u_{N-1}) + f_N(z_N) + O_{N-2}(g_{N-1}^{-1}(u_{N-1}, z_N), z_1)\}. \quad (3.29)$$

Ebből

$$u_{N-1,opt} = \varphi(z_N, z_1). \quad (3.30)$$

amit visszahelyettesítünk (3.28) egyenletbe.

Ha z_1 nem ismert, akkor arra nézve is optimalizációt kell végrehajtani

$$O_{N-1}^*(z_N) = \min_{z_1} \{O_{N-1}(z_N, z_1)\}. \quad (3.31)$$

Az $O_{N-1}(z_N)$ a teljes rendszer optimumát adja a z_N függvényében, ami viszont már általában adott.

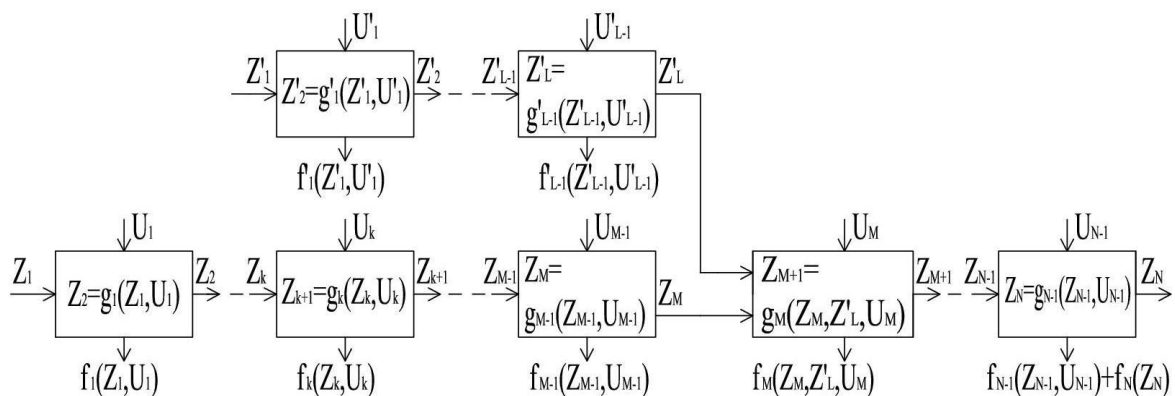
3.4. Nem-soros rendszerek vizsgálata és optimalizációja

A nem-soros rendszerekből csak az összeágazó rendszer vizsgálatát ismertetem, mert a dabasi szennyvízcsatorna-hálózat is ilyen típusú. A nem-soros rendszerek optimalizációja általában felépíthető a soros rendszerekre bemutatott rekurzív függvényegyenletek optimalizációjából. Ugyanis az egyszerűbb nem-soros rendszerek felbonthatóak (felvághatóak) soros rendszerű ágakra, amelyek külön-külön optimalizálhatóak, majd a kapott optimumok egyesíthetők.

3.4.1. Összeágazó rendszer

A keletkező szennyvizeket különböző szállítási útvonalakon – zárt vagy nyitott, gravitációs és/vagy szivattyús szállítással, közbelső gyűjtőpontokon keresztül a végső tározóból tisztítótelepre szállítjuk. A döntési cél a felhasznált energia minimálása.

A szennyvíz csatornahálózatok összeágazó rendszerek. Az összeágazó rendszer vizsgálatához az alapmodellt a 3.15. ábra szemlélteti.



Döntési cél:

$$C = f_1 + f_2 + \dots + f_{L-1} + \dots + f_N \rightarrow \min!$$

3.15. ábra: Összeágazó rendszer döntési modellje

Az összeágazó rendszert az ágak levágásával soros rendszerekre bontjuk, és a soros rendszerekre bemutatott visszafelé haladó rekurzív optimalizációt hajtjuk végre.

▪ **Első lépés a főágon**

$$O_{N-1}(z_{N-1}, z_N) = \min_{u_{N-1}} \{f_{N-1}(z_{N-1}, u_{N-1}) + f_N(z_N)\}. \quad (3.32)$$

Tudjuk, hogy

$$z_N = g_{N-1}(z_{N-1}, u_{N-1}). \quad (3.33)$$

A függvény inverzének segítségével kifejezzük u_{N-1} -et

$$u_{N-1} = g_{N-1}^{-1}(z_N, z_{N-1}). \quad (3.34)$$

Ezt behelyettesítve

$$O_{N-1}(z_{N-1}, z_N) = \{f_{N-1}(z_{N-1}, g_{N-1}^{-1}(z_N, z_{N-1})) + f_N(z_N)\}. \quad (3.35)$$

Ezután a célfüggvényünk optimuma csak a bemeneti és a kimeneti változótól függ. A z_N viszont általában ismert, hiszen z_N a kielégítendő igény. Az optimalizáció lehetősége nem adott.

▪ **Második lépés a főágon**

$$O_{N-2}(z_{N-2}, z_N) = \min_{u_{N-2}} \{f_{N-2}(z_{N-2}, u_{N-2}) + O_{N-1}(z_{N-1}, z_N)\}. \quad (3.36)$$

Tudjuk, hogy

$$z_{N-1} = g_{N-2}(z_{N-2}, u_{N-2}). \quad (3.37)$$

Behelyettesítve a (3.34) egyenletbe

$$O_{N-2}(z_{N-2}, z_N) = \min_{u_{N-2}} \{f_{N-2}(z_{N-2}, u_{N-2}) + O_{N-1}(g_{N-2}(z_{N-2}, u_{N-2}), z_N)\}. \quad (3.38)$$

Meghatározzuk u_{N-2} optimális értékét, ami

$$u_{N-2, opt} = \varphi(z_{N-2}, z_N), \quad (3.39)$$

ezt behelyettesítve a (3.36) egyenletbe, amivel az u_{N-2} változót kiküszöböljük:

$$O_{N-2}(z_{N-2}, z_N) = \{f_{N-2}(z_{N-2}, \varphi(z_{N-2}, z_N)) + O_{N-1}(g_{N-2}(z_{N-2}, \varphi(z_{N-2}, z_N)), z_N)\}. \quad (3.40)$$

A harmadik és a soron következő lépéseket a már ismert módon folytatjuk, amíg eljutunk a csatlakozási fokozatig.

▪ **A csatlakozási fokozatra felírt optimalizációs egyenlet**

$$O_M(z_M, z'_L, z_N) = \min_{u_M} \{f_M(z_M, z'_L, u_M) + O_{M+1}(z_{M+1}, z_N)\}. \quad (3.41)$$

Tudjuk, hogy

$$z_{M+1} = g_M(z_M, z'_L, u_M). \quad (3.42)$$

Ezzel a (3.37) egyenlet

$$O_M(z_M, z'_L, z_N) = \min_{u_M} \{f_M(z_M, z'_L, u_M) + O_{M+1}(g_M(z_M, z'_L, u_M), z_N)\}. \quad (3.43)$$

Az u_M optimális értékét meghatározzuk, ami

$$u_{M,opt} = \varphi(z_M, z'_L, z_N), \quad (3.44)$$

és visszahelyettesítjük a (3.39) kifejezésbe.

$$O_M(z_M, z'_L, z_N) = \{f_M(z_M, z'_L, \varphi(z_M, z'_L, z_N)) + O_{M+1}(g_M(z_M, z'_L, \varphi(z_M, z'_L, z_N)), z_N)\}. \quad (3.45)$$

▪ **Tovább haladva a főágon egy közbenső fokozatra**

$$O_K(z_K, z'_L, z_N) = \min_{u_K} \{f_K(z_K, u_K) + O_{K+1}(z_{K+1}, z'_L, z_N)\}. \quad (3.46)$$

Tudjuk, hogy

$$z_{K+1} = g_K(z_K, u_K). \quad (3.47)$$

Behelyettesítve:

$$O_K(z_K, z'_L, z_N) = \min_{u_K} \{f_K(z_K, u_K) + O_{K+1}(g_K(z_K, u_K), z'_L, z_N)\}. \quad (3.48)$$

Ebből

$$u_{k,opt} = \varphi(z_k, z_N, z'_L). \quad (3.49)$$

Ezt visszahelyettesítjük (3.42)-be, és ezzel

$$O_K(z_K, z'_L, z_N) = f_K(z_K, \varphi(z_k, z_N, z'_L)) + O_{K+1}(g_K(z_K, \varphi(z_k, z_N, z'_L)), z'_L, z_N). \quad (3.50)$$

▪ **Mellékágon az első lépés**

Felírjuk az optimalizációs egyenletet az első boxra.

$$O'_{L-1}(z'_{L-1}, z'_L) = \min_{u'_{L-1}} \{f'_{L-1}(z'_{L-1}, u'_{L-1})\}. \quad (3.51)$$

Tudjuk, hogy

$$z'_L = g'_{L-1}(z'_{L-1}, u'_{L-1}). \quad (3.52)$$

A függvény inverzének felhasználásával:

$$u'_{L-1} = g'^{-1}_{L-1}(z'_L, z'_{L-1}). \quad (3.53)$$

Behelyettesítve az optimalizációs egyenletbe

$$O'_{L-1}(z'_{L-1}, z'_L) = \{f'_{L-1}(z'_{L-1}, g'^{-1}_{L-1}(z'_L, z'_{L-1}))\}. \quad (3.54)$$

A döntési változót ezzel kiküszöböltük.

▪ **Második lépés a mellékágon**

$$O'_{L-2}(z'_{L-2}, z'_L) = \min_{u'_{L-2}} \{f'_{L-2}(z'_{L-2}, u'_{L-2}) + O'_{L-1}(z'_{L-1}, z'_L)\}. \quad (3.55)$$

Tudjuk, hogy

$$z'_{L-1} = g'_{L-2}(z'_{L-2}, u'_{L-2}). \quad (3.56)$$

Ezt behelyettesítve

$$O'_{L-2}(z'_{L-2}, z'_L) = \min_{u'_{L-2}} \{f'_{L-2}(z'_{L-2}, u'_{L-2}) + O'_{L-1}(g'_{L-2}(z'_{L-2}, u'_{L-2}), z'_L)\}. \quad (3.57)$$

Ebből

$$u'_{L-2, opt} = \varphi(z'_{L-2}, z'_L). \quad (3.58)$$

Az optimális u'_{L-2} értéket visszahelyettesítjük (3.51)-be

$$O'_{L-2}(z'_{L-2}, z'_L) = f'_{L-2}(z'_{L-2}, \varphi(z'_{L-2}, z'_L)) + O'_{L-1}(g'_{L-2}(z'_{L-2}, \varphi(z'_{L-2}, z'_L)), z'_L). \quad (3.59)$$

▪ **További lépések a mellékágon**

Folytatva az optimalizációt, eljutunk a kezdő fokozathoz. A fokozat optimalizációs egyenlete

$$O'_1(z'_1, z'_L) = \min_{u'_1} \{f'_1(z'_1, u'_1) + O'_2(z'_2, z'_L)\}. \quad (3.60)$$

Tudjuk, hogy

$$z'_2 = g'_1(z'_1, u'_1). \quad (3.61)$$

Ezt behelyettesítve megkapjuk a mellékág optimalizációs függvényét a bemenet és kimenet, valamint u'_1 függvényében.

$$O'_1(z'_1, z'_L) = \min_{u'_1} \{f'_1(z'_1, u'_1) + O'_2(g'_1(z'_1, u'_1), z'_L)\}. \quad (3.62)$$

Ebből

$$u'_{1,opt} = \varphi(z'_1, z'_L). \quad (3.63)$$

Ezt visszahelyettesítjük a (3.56) kifejezésbe, és megkapjuk a mellékág optimális függvényét a bemenet és kimenet függvényében.

$$O'_1(z'_1, z'_L) = f'_1(z'_1, \varphi(z'_1, z'_L)) + O'_2(g'_1(z'_1, \varphi(z'_1, z'_L)), z'_L). \quad (3.64)$$

▪ **A főágon folytatjuk a visszafelé haladó rekurziót!**

A k-adik fokozattól haladunk a főág első fokozatáig. Az első fokozatra

$$O_1(z_1, z'_L, z_N) = \min_{u_1} \{f_1(z_1, u_1) + O_2(z_2, z'_L, z_N)\}. \quad (3.65)$$

Tudjuk, hogy

$$z_2 = g_1(z_1, u_1). \quad (3.66)$$

Behelyettesítve:

$$O_1(z_1, z'_L, z_N) = \min_{u_1} \{f_1(z_1, u_1) + O_2(g_1(z_1, u_1), z'_L, z_N)\}. \quad (3.67)$$

Meghatározzuk u_1 optimális értékét

$$u_{1,opt} = \varphi(z_1, z'_L, z_N), \quad (3.68)$$

és visszahelyettesítjük a (3.61) kifejezésbe

$$O_1(z_1, z'_L, z_N) = f_1(z_1, \varphi(z_1, z'_L, z_N)) + O_2(g_1(z_1, \varphi(z_1, z'_L, z_N)), z'_L, z_N). \quad (3.69)$$

▪ **Végül a két ág együtt a (3.63) és (3.58) egyenletek egyesítésével**

Az optimalizációs függvény a főág kimenetének és bemenetének a függvénye. Az optimalizációt a mellékág kimenetére és bemenetére hajtjuk végre, az

$$O_1(z_1, z_N) = \min_{z'_1, z'_L} \{O_1(z_1, z'_L, z_N) + O'_1(z'_1, z'_L)\}. \quad (3.70)$$

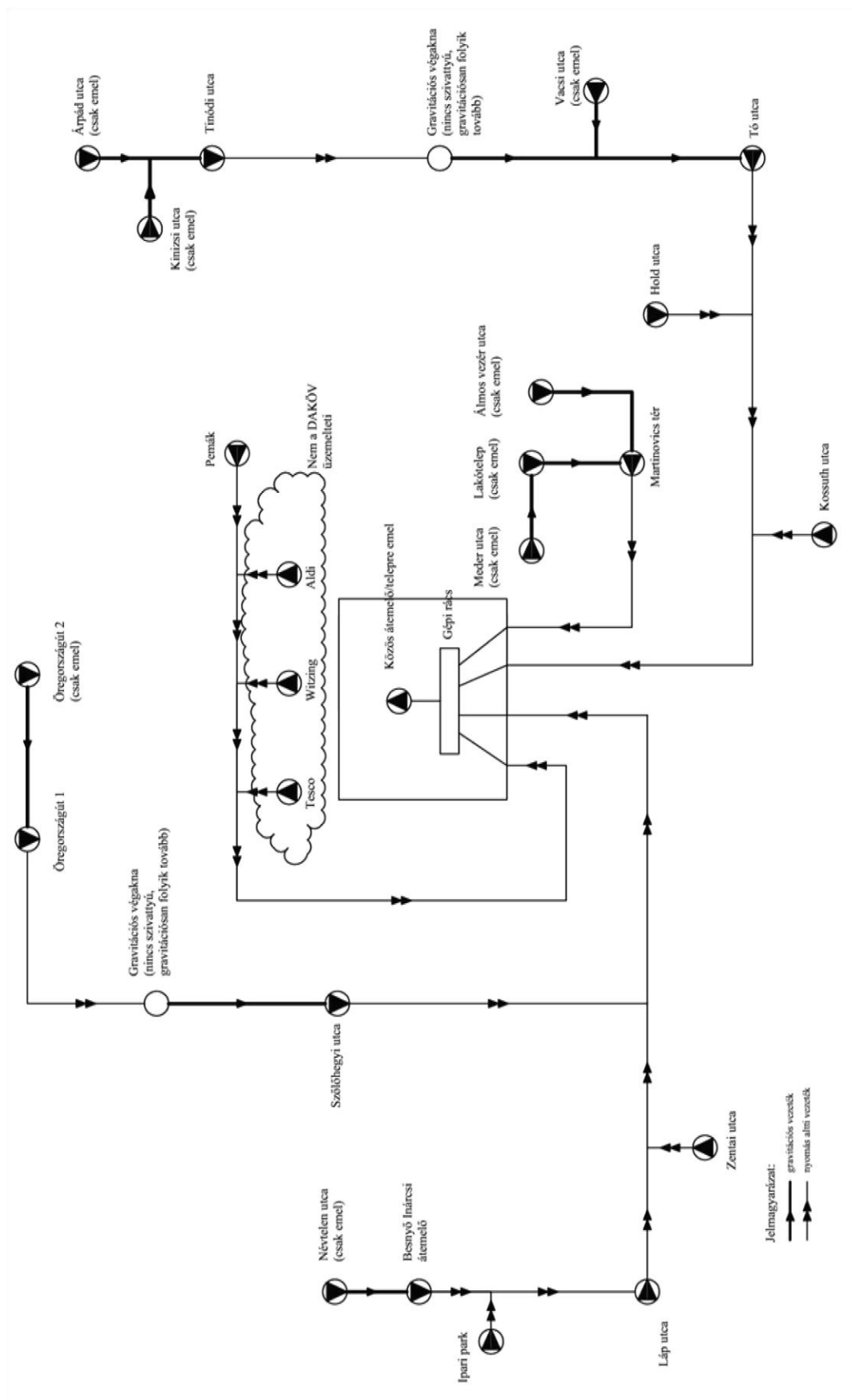
A z_N , amint már többször említettük, általában adott érték. Ha a főág kimenete adott, akkor az optimalizációt a z_1 bemenetre végrehajtjuk

$$O_0(z_N) = \min_{z_1} \{O_1(z_1, z_N)\}. \quad (3.71)$$

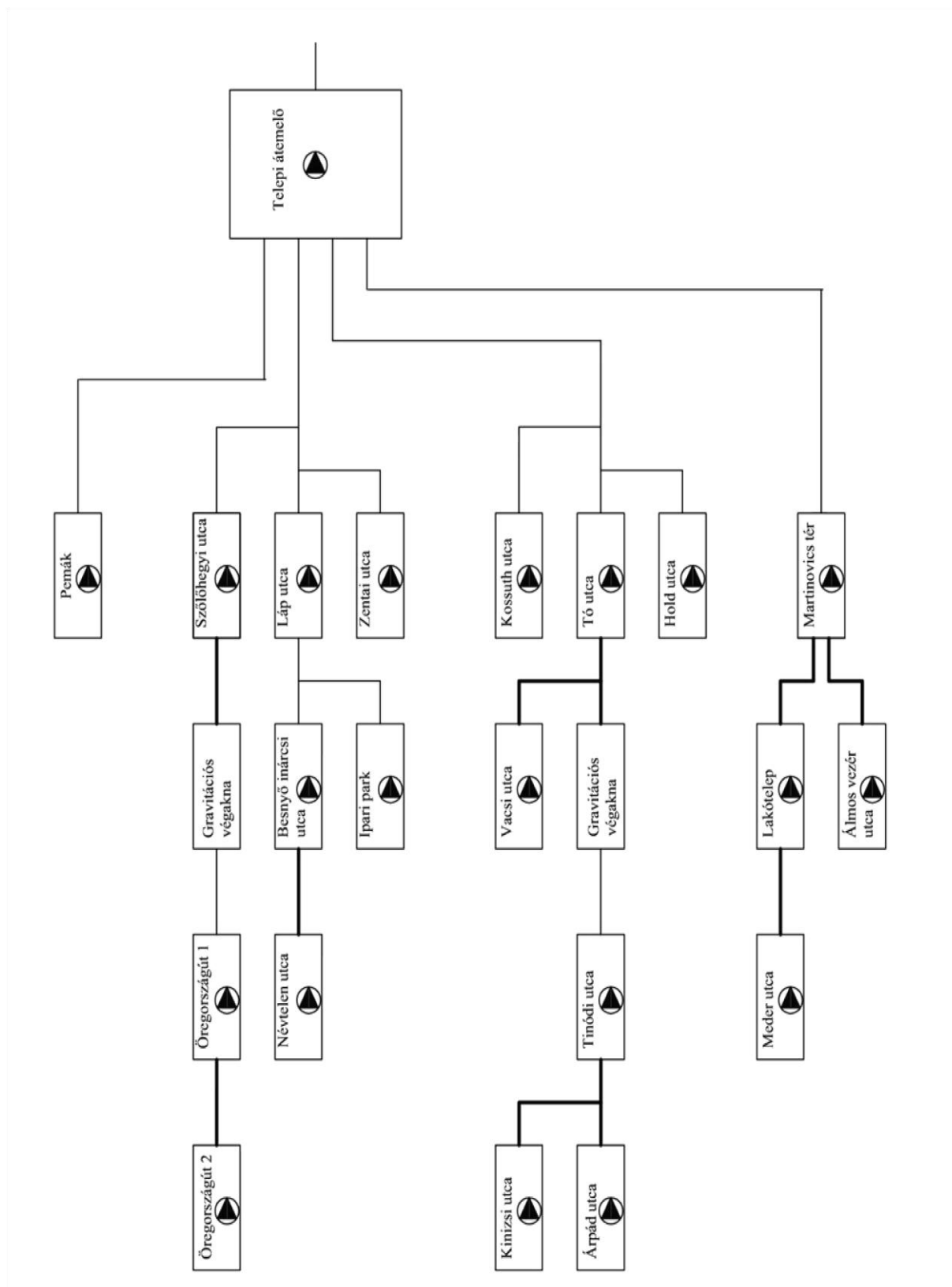
Ezzel a teljes előrecsatolt rendszer optimumát megkaptuk a z_N igény (kimenet), mint paraméter függvényében.

4. A dabasi szennyvízcsatorna-rendszer bemutatása

A dabasi szennyvízhálózat egy összetett, összeágazó rendszer, amely 2 db gravitációs végaknából, 20 db szivattyús átemelő aknából és egy végponti közös telepi átemelő aknából áll. A rendszer alaprajzát a 4.1. ábra és a 4.2. ábra mutatja, s az átemelő aknák műszaki adatai az 1. számú mellékletben találhatóak.



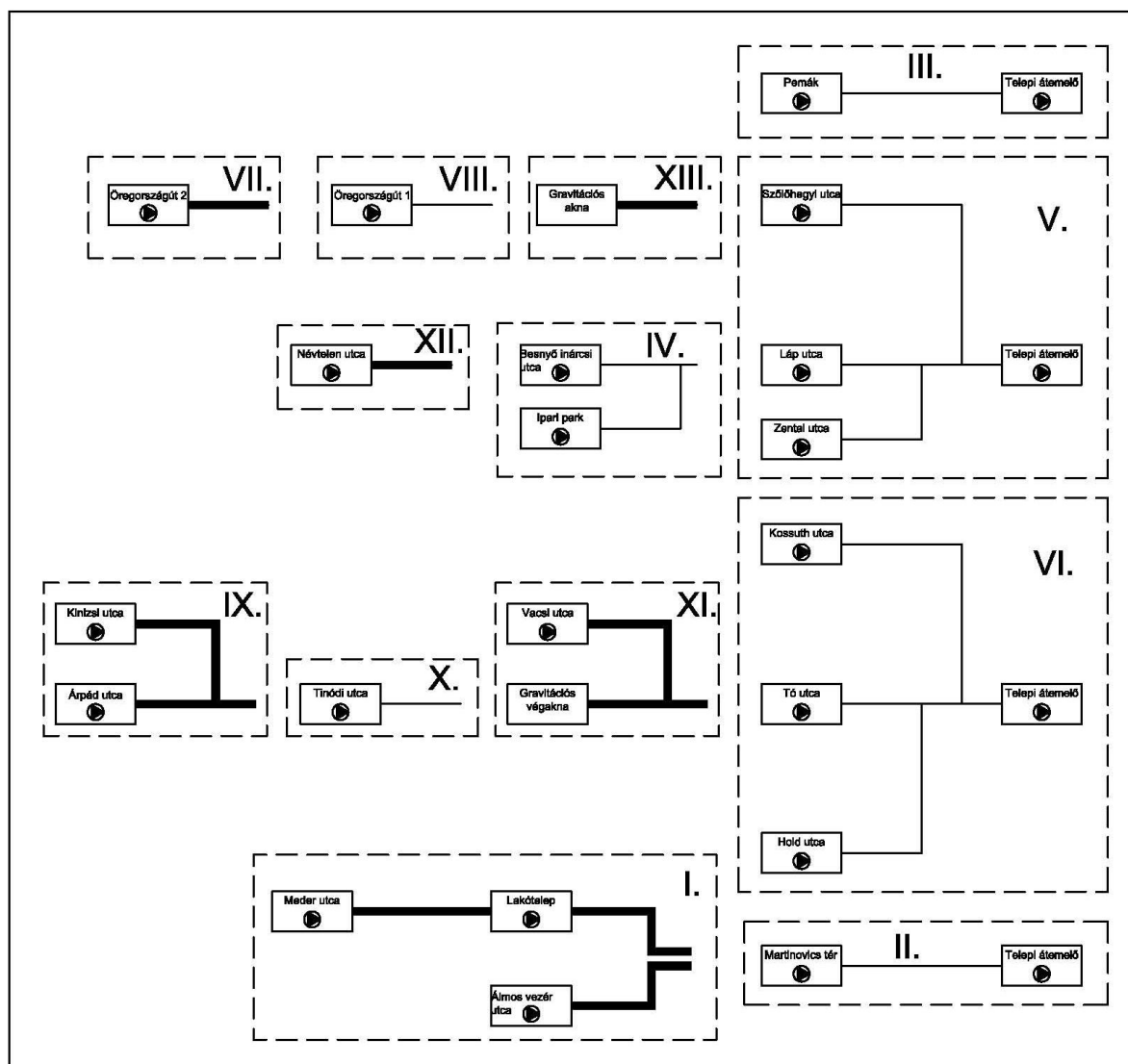
4.1. ábra: Dabasi szennyvízelvezető rendszer topológiája



4.2. ábra: A dabasi szennyvíz csatornarendszer rendszertani modellje (gráfja)

5. A hálózat hidraulikai modellje

Az alaprajz alapján a csatornarendszert kisebb alrendszerekre lehet felbontani, amely rendszerek az 5.1. ábra szerint már matematikailag könnyebben kezelhetők. Az ábrán a vastag vonallal jelölt szakasz gravitációs működésű, a vékony vonalas pedig a nyomás alatt üzemelő szakaszokat jelöli.

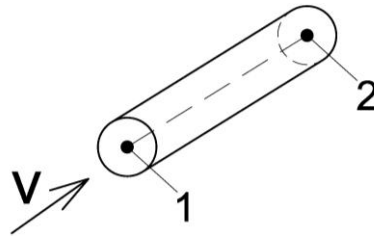


5.1. ábra A dabasi szennyvízhálózat alrendszerekre bontva

5.1. Az áramlást leíró összefüggések állandósult állapotban

A gravitációs üzemű szakaszok méretezése a geodetikus szintkülönbség legyőzését jelenti:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h. \quad (5.1)$$



5.2. ábra Vezetékszakasz

A vezetékszakasz (1) - (2) végpontja között felírható a Bernoulli-egyenlet stacionárius esetben:

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} \right) + g \cdot \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right] dx = 0. \quad (5.2)$$

Ez az összefüggés felírható általános vektoriális alakjában, az áramlási tér két pontját összekötő vonal menti integrálásával:

$$\int_1^2 \text{grad} \frac{v^2}{2} d\underline{s} - \int_1^2 \underline{v} \times \text{rot} \underline{v} d\underline{s} = \int_1^2 g d\underline{s} - \int_1^2 \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad} p d\underline{s}. \quad (5.3)$$

A műszaki gyakorlatban leggyakrabban előforduló áramlások stacionáriusak. Lehet áramvonal mentén integrálni, a sűrűség állandónak tekinthető, s a figyelembe vett erőter a Föld nehézségi erőtere, amely potenciális. Ezek alapján a fenti differenciálegyenlet egyszerűsödik, s valóságos közeg esetén a Bernoulli-egyenlet egy veszteséges taggal bővül:

$$\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 + p_1 + \rho \cdot U_1 = \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 + p_2 + \rho \cdot U_2 + \Delta p'. \quad (5.4)$$

A veszteséges tagot súrlódási veszteségnek nevezzük, és jelentős mértékben befolyásolja az össznyomásnövekedést, amely így nem hanyagolható el:

$$\Delta p' = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2. \quad (5.5)$$

A hidraulikai Ohm-törvény, mint minden áramlástanban, itt is érvényes:

$$\Delta p = R \cdot \dot{V}^2. \quad (5.6)$$

A szivattyú k -adik ágegyenlete általánosan²:

$$p_v - p_e + A_k \cdot \dot{V}^2 + B_k \cdot \dot{V} + C_k = 0. \quad (5.7)$$

A szivattyú szállítómagassága a k -adik ágegyenlet alapján, állandósult üzemben a „jó” hatásfokú környezetében:

$$H \cong a_0 + a_1 \cdot \dot{V} + a_2 \cdot \dot{V}^2. \quad (5.8)$$

A fenti egyenleteket a veszteséges Bernoulli-egyenletbe behelyettesítve, s azt rendezve az alábbi ágegyenlet adható meg:

$$p_0 + (A \cdot \dot{V}^2 + B \cdot \dot{V} + C) - R \cdot \dot{V}^2 = p_0. \quad (5.9)$$

Az egyenletben szereplő konstansok kifejtve:

- hidraulikai ellenállás:

$$R = \frac{8 \cdot \rho}{d^4 \cdot \pi^2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right). \quad (5.10)$$

- szivattyú jelleggörbájéből adódó tagok:

$$A = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_v^2} - \frac{1}{A_e^2} \right) - \rho \cdot g \cdot a_2. \quad (5.11)$$

$$B = \rho \cdot g \cdot a_1. \quad (5.12)$$

- geodetikus szintkülönbség:

$$C = \rho \cdot g \cdot (h_v - h_e - a_0). \quad (5.13)$$

² Itt a v és e az ág tetszőlegesen felvett irányítással definiált végére és elejére utal.

5.2. Az egyszerű alrendszerek hidraulikai egyenletei

5.1. táblázat Az alrendszerek hidraulikai egyenletei

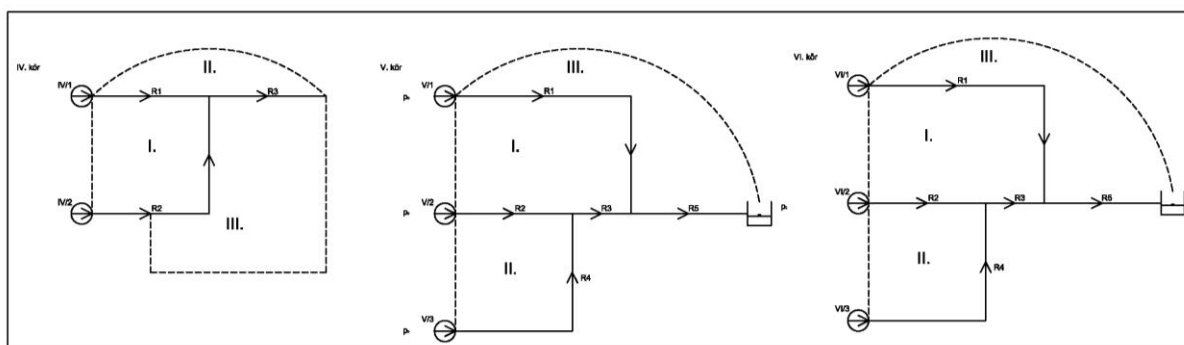
I. kör	Meder u. → Lakótelep u.	$p_{I/1} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{I/1} + p_{I/2}$
	Lakótelep u. → Martinovics u.	$p_{I/2} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{I/2}$
	Álmos vezér u. → Martinovics u.	$p_{I/3} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{I/3}$
II. kör		$p_0 + \left(A_{II} \cdot \dot{V}_{II}^2 + B_{II} \cdot \dot{V}_{II} + C_{II} \right) - R_{II} \cdot \dot{V}_{II}^2 = p_0$
III. kör		$p_0 + \left(A_{III} \cdot \dot{V}_{III}^2 + B_{III} \cdot \dot{V}_{III} + C_{III} \right) - R_{III} \cdot \dot{V}_{III}^2 = p_0$
VII. kör		$p_{VII} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{VII}$
VIII. kör		$p_0 + \left(A_{VIII} \cdot \dot{V}_{VIII}^2 + B_{VIII} \cdot \dot{V}_{VIII} + C_{VIII} \right) - R_{VIII} \cdot \dot{V}_{VIII}^2 = p_0$
IX. kör	Kinizsi u. → Tinódi u.	$p_{IX/1} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{IX/1}$
	Árpád u. → Tinódi u.	$p_{IX/2} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{IX/2}$
X.kör		$p_0 + \left(A_X \cdot \dot{V}_X^2 + B_X \cdot \dot{V}_X + C_X \right) - R_X \cdot \dot{V}_X^2 = p_0$
XI.kör	Vacsi u. → Tó u.	$p_{XI} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{XI}$
XII.kör		$p_{XII} = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h_{XII}$

Minden aknára felírható egy-egy tározó egyenlet:

$$\frac{dM}{d\tau} = (\dot{V}_{be} - \dot{V}_{ki}) \cdot \rho. \quad (5.14)$$

amelyben a $\dot{V}_{be}$ és $\dot{V}_{ki}$ értékei a megfelelő hidraulikai egyenletekből adódik. Az előbbieken megadott egyenletekben a hálózati paraméterek ismertek, s az egyenletrendszerek segítségével a keresett térfogatáramok is könnyen meghatározhatóak.

A hurkot tartalmazó alrendszerek esetében több, kisebb részre bontjuk fel az adott szakaszt:



5.3. ábra Hurkok felbontása

5.2. táblázat Hurkok hidraulikai egyenletei

IV. kör	I. hurok	$p_0 + \left(A_{IV/1} \cdot \dot{V}_{IV/1}^2 + B_{IV/1} \cdot \dot{V}_{IV/1} + C_{IV/1} \right) - R_1 \cdot \dot{V}_{IV/1}^2 =$ $= p_0 + \left(A_{IV/2} \cdot \dot{V}_{IV/2}^2 + B_{IV/2} \cdot \dot{V}_{IV/2} + C_{IV/2} \right) + R_2 \cdot \dot{V}_{IV/2}^2$
	II.hurok	$p_0 + \left(A_{IV/1} \cdot \dot{V}_{IV/1}^2 + B_{IV/1} \cdot \dot{V}_{IV/1} + C_{IV/1} \right) - R_1 \cdot \dot{V}_{IV/1}^2 - R_3 \cdot \dot{V}_{IV/3}^2 = p_0$
	III.hurok	$p_0 + \left(A_{IV/2} \cdot \dot{V}_{IV/2}^2 + B_{IV/2} \cdot \dot{V}_{IV/2} + C_{IV/2} \right) - R_2 \cdot \dot{V}_{IV/2}^2 - R_3 \cdot \dot{V}_{IV/3}^2 = p_0$
	Csomóponti egyenlet	$\dot{V}_{IV/1} + \dot{V}_{IV/2} = \dot{V}_{IV/3}$
V. kör	I.hurok	$p_0 + \left(A_{V/1} \cdot \dot{V}_{V/1}^2 + B_{V/1} \cdot \dot{V}_{V/1} + C_{V/1} \right) - R_1 \cdot \dot{V}_{V/1}^2 - R_2 \cdot \dot{V}_{V/2}^2 -$ $- R_3 \cdot \dot{V}_{V/3}^2 - p_0 = 0$
	II.hurok	$p_0 + \left(A_{V/2} \cdot \dot{V}_{V/2}^2 + B_{V/2} \cdot \dot{V}_{V/2} + C_{V/2} \right) - R_4 \cdot \dot{V}_{V/4}^2 -$ $- \left(A_{V/3} \cdot \dot{V}_{V/4}^2 + B_{V/3} \cdot \dot{V}_{V/4} + C_{V/4} \right) - p_0 = 0$
	III.hurok	$p_0 + \left(A_{V/1} \cdot \dot{V}_{V/1}^2 + B_{V/1} \cdot \dot{V}_{V/1} + C_{V/1} \right) - R_1 \cdot \dot{V}_{V/1}^2 - R_5 \cdot \dot{V}_{V/5}^2 - p_0 = 0$
	Csomóponti egyenletek	$\dot{V}_{V/2} + \dot{V}_{V/4} - \dot{V}_{V/3} = 0$

		$\dot{V}_{V/1} + \dot{V}_{V/3} - \dot{V}_{V/5} = 0$
VI. kör	I.hurok	$p_0 + \left(A_{VI/1} \cdot \dot{V}_{VI/1}^2 + B_{VI/1} \cdot \dot{V}_{VI/1} + C_{VI/1} \right) - R_1 \cdot \dot{V}_{VI/1}^2 - R_2 \cdot \dot{V}_{VI/2}^2 - R_3 \cdot \dot{V}_{VI/3}^2 - p_0 = 0$
	II.hurok	$p_0 + \left(A_{VI/2} \cdot \dot{V}_{VI/2}^2 + B_{VI/2} \cdot \dot{V}_{VI/2} + C_{VI/2} \right) - R_4 \cdot \dot{V}_{VI/4}^2 - \left(A_{VI/3} \cdot \dot{V}_{VI/4}^2 + B_{VI/3} \cdot \dot{V}_{VI/4} + C_{VI/4} \right) - p_0 = 0$
	III.hurok	$p_0 + \left(A_{VI/1} \cdot \dot{V}_{VI/1}^2 + B_{VI/1} \cdot \dot{V}_{VI/1} + C_{VI/1} \right) - R_1 \cdot \dot{V}_{VI/1}^2 - R_5 \cdot \dot{V}_{VI/5}^2 - p_0 = 0$
	Csomóponti egyenletek	$\dot{V}_{VI/2} + \dot{V}_{VI/4} - \dot{V}_{VI/3} = 0$
		$\dot{V}_{VI/1} + \dot{V}_{VI/3} - \dot{V}_{VI/5} = 0$

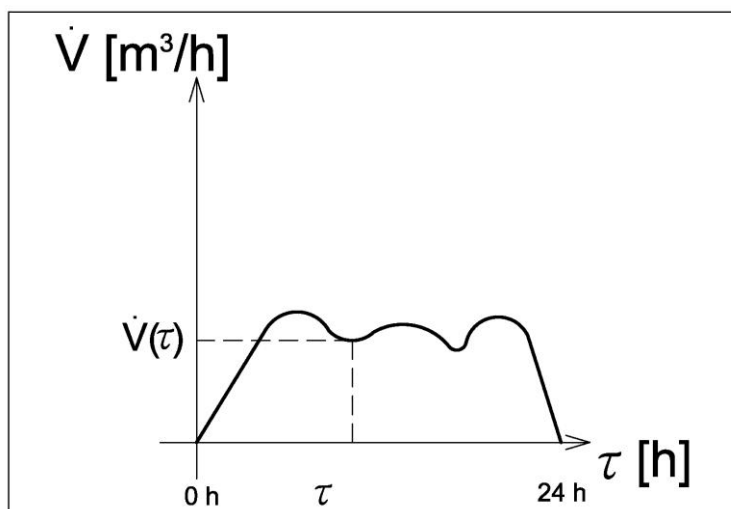
6. A döntési modell

Megállapíthatjuk, hogy a dabasi szennyvíz csatornahálózat viszonylag egyszerű morfológiai gráffal modellezhető. A gráf nem összefüggő, illetve több „szuverén” részgráfra bontható. A részgráfok ún. összeágazó, több gyökerű, fordított fastruktúrájú gráfok. A rajtuk értelmezhető döntési modellek összeágazó döntési rendszereket képeznek. A rajtuk értelmezhető feladatok ún. szállítási feladatok. Sztochasztikusan ismert profilú szennyvizet kell elszállítanunk gravitációsan, illetve gravitációs átemeléssel és nyomás alatti szivattyús áramoltatással a telepi gyűjtőbe.

A feladat kombinált alap-inverz feladat: ismert mennyiségek szállítása során kialakítandó áramlási kép meghatározását kell elvégezni. Miután tározók vannak közbeiktatva, a szivattyúk teljesítménye igazodhat a tárolók töltési és ürítési összehangolásához. Egyedüli erős követelmény a napi mennyiség elszállításának követelménye. A szivattyúk napi teljes energiafelvételének optimalizálása, pontosabban minimum keresés tárgya lehet: egy napi prognosztizált keletkező szennyvízmennyiséget milyen szivattyú üzemmenet-profillal lehet minimális energia felhasználással eljuttatni a tisztítótelepre.

Természetesen tisztában kell lenni azzal, hogy a stratégia prediktív, hiszen prediktív szennyvíz keletkezési profilra tervezzük. Módszert kell találni arra, hogy a profiltól való eltéréseket hogyan vegyük figyelembe a szivattyúüzem-stratégia módosításában.

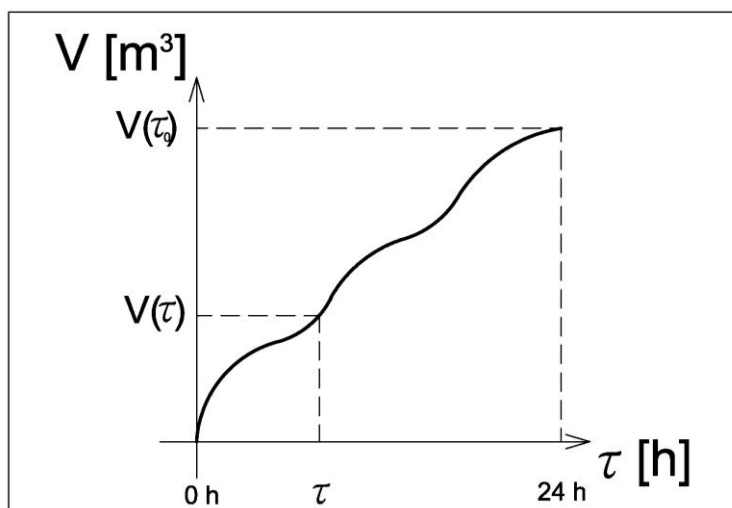
Az aknában lévő átemelő bűvárszivattyúk jelenleg állandó fordulatszámú, szintkapcsolóról üzemelő szivattyúk. A szivattyúk akkor kapcsolnak be, amikor a szennyvíz szintje az aknában eléri az előre beállított értéket, így a hajnali órákban keletkező minimális szennyvíz mennyiségét a reggeli indításkor szállítják el a szivattyúk. Ezért indulhat az alábbi napi jelleggörbe a nulla térfogatáramról.



6.1. ábra A szennyvíztisztító telepre beérkező szennyvízmennyiség napi jelleggörbéje

Tételezzük fel, hogy a szennyvíztározóból nem történik elvétel. Ekkor a töltési görbe alatti terület adja meg a tárolt szennyvíz mennyiségét. A jelleggörbe a valóságot tükrözi; három nagyobb csúcstermelődés fordul elő az átlagos napokon, reggel, dél körül és az esti órákban. Elvétel nélkül a tározó teljes telítettsége a feltételezés szerint a nap 24. órájában következik be.

$$V(\tau) = \int_0^{\tau} \dot{V}(t) \cdot dt \quad (6.1)$$

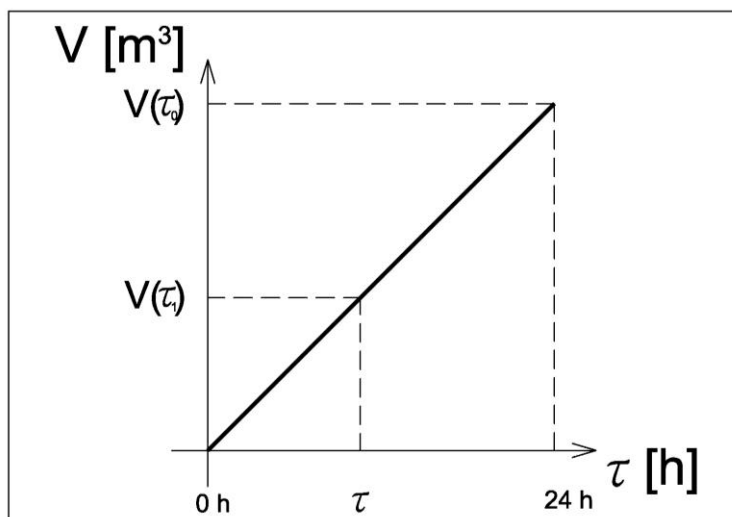


6.2. ábra A szennyvíztermelődés töltési görbéje

6.1. Lineáris töltés

A következő esetben képzeljünk el időben lineáris töltődést. Ez csak elméleti megfontolásban érhető el, viszont a mérnökök számára ez a legjobban kezelhető és legkönnyebben megoldható probléma.

$$\dot{V} = \text{állandó}, V(\tau) = \dot{V}(t) \cdot \tau \quad (6.2)$$



6.3. ábra Lineáris szivattyúzási üzemi jelleggörbe

6.1.1. Az üritéshez alkalmazható stratégiák

Az optimalizációs feladat során valamilyen kitűzött paraméter minimalizálására kell törekedni. Jelen feladatnál ez a minimális költségű üzemeltetés, azaz a szivattyúk minimális ráfordított energiával üzemeljenek úgy, hogy a szennyvízhálózat optimális üzemállapotban maradjon. Logikus elvárás az egyesített rendszerű, szennyvíz és esővíz együtt gyűjtő

szennyvízhálózatoknál, hogy ami szennyvíz keletkezik egy nap alatt, azt teljes térfogatában 24 óra alatt távolítsuk el a hálózathoz, ezzel csökkentve a túltelítődés kockázatát. Azonban azt is meg kell vizsgálni, hogy milyen üzemeltetési paraméterek mellett teljesülne ez optimálisan.

Két ürítési stratégiát mutatok be.

- Egyenletes ürítés

$$\dot{V}_{\text{ürítés}} = \dot{V}_{\text{töltés}}, V(\tau) = 0, \forall \tau \quad (6.3)$$

Ez a célszerű és logikus döntés, hogy ami szennyvíz keletkezik, azt egyből szivattyúzzuk ki a hálózathoz. Ekkor a betárolt mennyiség nulla, mivel nem használjuk ki az időbeli eltolódások enyhítésének lehetőségét.

A szivattyúzáshoz felhasznált energia a szivattyú állandó P teljesítménnyel üzemel τ_0 üzemórában:

$$E = P_{\text{szivattyú}} \cdot \tau = R \cdot \dot{V}^3 \cdot \tau. \quad (6.4)$$

A napi energiamennyiség:

$$E(\tau_0) = R \cdot \dot{V}^3 \cdot \tau_0. \quad (6.5)$$

- Változó intenzitású ürítés, két különböző teljesítménnyel

$$\dot{V}_{\text{ürítés}} = \frac{1}{2} \cdot \dot{V}_{\text{töltés}}, \tau \leq \frac{1}{2} \cdot \tau_0 \text{ és } \dot{V}_{\text{ürítés}} = \frac{3}{2} \cdot \dot{V}_{\text{töltés}}, \frac{1}{2} \cdot \tau_0 \leq \tau \leq \tau_0 \quad (6.6)$$

Ebben az esetben a nap első felében csak a keletkező szennyvízmennyiség felét szivattyúzzuk ki, a másik nagyobb részét pedig a nap hátralevő részében vesszük ki a rendszerből. Ekkor már van létjogosultsága a tározóknak, mivel a kezdeti kisebb intenzitású elvételt kompenzálni kell egy későbbi, nagyobb mennyiségű elvétellel. Ez a kivételi arány tetszőlegesen megválasztható, most az egyszerűség kedvéért fele-háromketted.

$$V(\tau_0) = \frac{1}{2} \cdot \dot{V} \cdot \frac{\tau_0}{2} + \frac{3}{2} \cdot \dot{V} \cdot \frac{\tau_0}{2} = \dot{V} \cdot \tau_0. \quad (6.7)$$

A napi szivattyúzásra felhasznált energia:

$$E = R \cdot \left(\frac{\dot{V}}{2} \right)^3 \cdot \frac{\tau_0}{2} + R \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \dot{V} \right)^3 \cdot \frac{\tau_0}{2} = R \cdot \dot{V}^3 \cdot \tau_0 \cdot \frac{14}{8} = 1,75 \cdot R \cdot \dot{V}^3 \cdot \tau_0. \quad (6.8)$$

Az egyszerű számításból látható, hogy a második esetben a szivattyúzási munka, így az ezzel járó költség is magasabbra adódik, mint az első esetben. Más elvételi arányok mellett is könnyen bizonyítható, hogy az optimális stratégia az, amikor az ürítési térfogatáram megegyezik a töltési árammal.

6.2. Konvex profilú szennyvízbetárolás

A feladatot írjuk fel kétváltozós, két feltételi egyenletes döntési feladattá. $\dot{V}_1$ és $\dot{V}_2$ ürítési teljesítményt alkalmazunk, τ_1 és τ_2 üzemórában.

A mindenkor teljesítendő célfüggvény a minimális szivattyúzási energiára vonatkozik:

$$C = \tau_1 \cdot R \cdot \dot{V}_1^3 + \tau_2 \cdot R \cdot \dot{V}_2^3 \rightarrow \min!. \quad (6.9)$$

A megfelelő elvételek időpontjának és mennyiségének meghatározásához két feltételi egyenletnek kell egyszerre teljesülnie. Az egyik, hogy az elvétel mennyisége megegyezik az összes napi keletkezett szennyvíz mennyiségével, a másik pedig az ürítésre szánt időtartam nem haladhatja meg a 24 órát.

$$\tau_1 \cdot \dot{V}_1 + (\tau_0 - \tau_1) \cdot \dot{V}_2 = V. \quad (6.10)$$

$$\tau_1 + \tau_2 = \tau_0. \quad (6.11)$$

Az optimalizáció elvégzése tetszőleges paraméterre elvégezhető, legyen ez most τ_1 és $\dot{V}_1$. Adottak τ_0 és V értékei, s keressük a megfelelő τ_1 , $\dot{V}_1$ és $\dot{V}_2$ értékeket.

A (6.10) egyenletből kifejezve azt az ismeretlent, amely nem az optimalizálandó érték:

$$\dot{V}_2 = \frac{V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1}{\tau_0 - \tau_1}. \quad (6.12)$$

Ezt behelyettesítve a célfüggvénybe:

$$C = \tau_1 \cdot R \cdot \dot{V}_1^3 + (\tau_0 - \tau_1) \cdot R \cdot \left(\frac{V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1}{\tau_0 - \tau_1} \right)^3 = \tau_1 \cdot R \cdot \dot{V}_1^3 + R \cdot \frac{(V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1)^3}{(\tau_0 - \tau_1)^2} \rightarrow \min!. \quad (6.13)$$

A szélsőérték keresését az optimalizálandó érték ($\dot{V}_1$) szerinti deriválással végezzük.

$$\frac{\partial C}{\partial \dot{V}_1} = 3 \cdot R \cdot \tau_1 \cdot \dot{V}_1^2 + 3 \cdot R \cdot \frac{(V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1)^2}{(\tau_0 - \tau_1)^2} \cdot (-\tau_1) = 0. \quad (6.14)$$

Rendezve az egyenletet:

$$\dot{V}_1^2 = \frac{(V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1)^2}{(\tau_0 - \tau_1)^2}, \quad (6.15)$$

$$\dot{V}_1^2 \cdot (\tau_0 - \tau_1)^2 = (V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1)^2, \quad (6.16)$$

$$[\dot{V}_1 \cdot (\tau_0 - \tau_1)]^2 = (V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1)^2, \quad (6.17)$$

$$\pm \dot{V}_1 \cdot (\tau_0 - \tau_1) = \pm (V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1), \quad (6.18)$$

$$\dot{V}_1 \cdot \tau_0 - \dot{V}_1 \cdot \tau_1 = V - \tau_1 \cdot \dot{V}_1, \quad (6.19)$$

$$\dot{V}_1 = \frac{V}{\tau_0}. \quad (6.20)$$

Ahol a jelleggörbe a lineáris egyenes felett van, ott szennyvízbetározás jelentkezik, ahol pedig alatta halad, ott a szivattyú nem üzemel.

Vizsgáljuk az optimális $\dot{V}$ ürítési térfogatáramtól való pozitív és negatív eltérést, amelyet a ráfordított szivattyúzási munka szempontjából köbre emelve szükséges elemezni. Ekkor már két vagy több eltérő térfogatáramú szivattyúzás szükséges eltérő időtartamokig, amelyek összesen teljesítik a rendszer kiürítését. Egyszerűség kedvéért két eltérő elvételt vizsgálunk.

$$(\dot{V} + \Delta \dot{V}_1)^3 = \dot{V}^3 + 3 \cdot \dot{V}^2 \cdot \Delta \dot{V}_1 + 3 \cdot \dot{V} \cdot \Delta \dot{V}_1^2 + \Delta \dot{V}_1^3 \quad (6.21)$$

$$\begin{aligned} (\dot{V} - \Delta \dot{V}_2)^3 &= \dot{V}^3 - 2 \cdot \dot{V}^2 \cdot \Delta \dot{V}_2 + \dot{V} \cdot \Delta \dot{V}_2^2 - \dot{V}^2 \cdot \Delta \dot{V}_2 + 2 \cdot \dot{V} \cdot \Delta \dot{V}_2^2 + \Delta \dot{V}_2^3 = \\ &= \dot{V}^3 - 3 \cdot \dot{V}^2 \cdot \Delta \dot{V}_2 + 3 \cdot \dot{V} \cdot \Delta \dot{V}_2^2 + \Delta \dot{V}_2^3 \end{aligned} \quad (6.22)$$

Ha a $\Delta \dot{V}_1 \equiv \Delta \dot{V}_2$ feltételezéssel élünk, azaz az egyik időpontban beállított kisebb eltérés azonos a másik elvételi időpontban az ezt kompenzáló, nagyobb mennyiséggel:

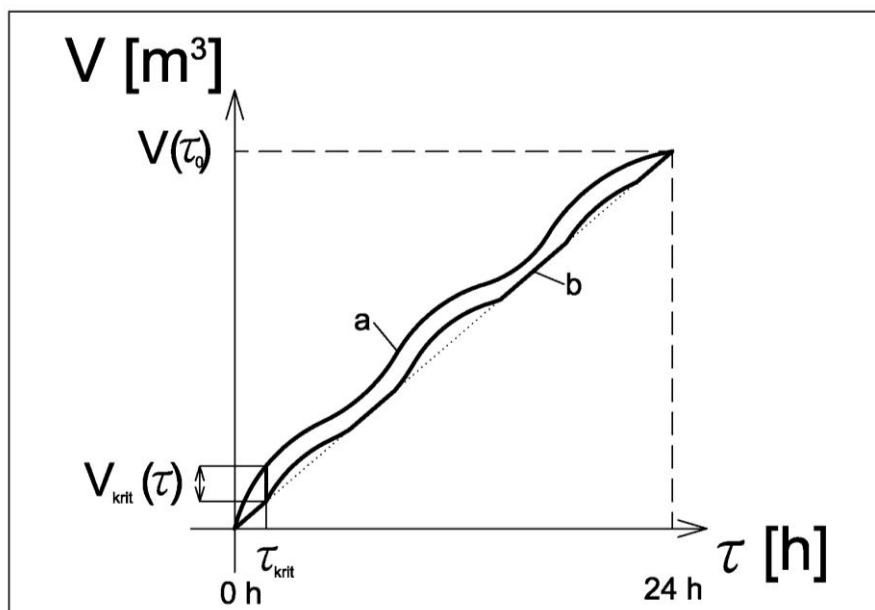
$$(\dot{V} + \Delta \dot{V})^3 - (\dot{V} - \Delta \dot{V})^3 = 6 \cdot \dot{V}^2 \cdot |\Delta \dot{V}| > 0. \quad (6.23)$$

A fenti összefüggés azt mutatja, hogy bármelyik irányban tér el a módosított szivattyúzási több lineáris szakaszból álló függvény az egyszerűen lineárisnak adódott szivattyúzási jelleggörbétől, a különbségek nem egyenlítik ki egymást, hanem összességében pozitív növekményt okoznak a rendszerben. Ebben az esetben az összes keletkezett szennyvíz

menyisége nagyobb szivattyúzási munkával lenne kivehető a hálózathoz, mintha az optimális lineáris elvételt biztosítanánk.

Ezzel a probléma megoldható egyszerű, manuális számításokkal. Arra kell törekedni, hogy a valós telítődési görbét minél jobban, alulról közelítse a szivattyúk üzemelési lineáris jelleggörbéje.

Itt az a kérdés vizsgálendő meg, hogy a betárolódás mértéke nem lépi-e túl a tározó térfogatát. Ha igen, akkor a 6.4. ábra szerint kell eljárni.



6.4. ábra Módosított szivattyú üzemi jelleggörbék esete

Az „a” görbe jelöli a szennyvíz telítődési profilt, míg a „b” függvény a szivattyúzási üzemeltetési jelleggörbe. Ha a keletkező szennyvíz és a szivattyúzással elvitt szennyvíz mennyiségének különbsége, azaz a kritikus térfogat nagyobb, mint a tározó befogadóképessége, akkor a kritikus időtartamtól kezdve a szivattyúk irányítási jelleggörbéjének követnie kell a telítődési profilt a fenti ábra szerint. Ahol pedig ez a különbség kisebb, mint a tározóban tárolható szennyvíz mennyisége, akkor a szivattyúk a lineáris jelleggörbét követik. Ennek az üzemmenetnek a pontos beállítását segítené a dinamikus programozás használatával meghatározott szivattyúk irányítási jelleggörbéje.

6.2.1. Dinamikus programozás használata

Dolgozatomban valószínűsítettem a gyűjtő aknában betárolásra kerülő szennyvíz napi alakulásának profilját, feltevésekkel és matematikai bizonyításokkal éltem az ürítési stratégiák optimumát illetően. Esetlegesen előálló bonyolult összetett napi szennyvíz termelődési profil

esetén az optimális üritési stratégia, ill. szivattyú munkapontok megállapításához általánosan alkalmazható optimalizációs eljárás a dinamikus programozás.

A matematikai leírásnál már az alkalmazható stratégiákat bemutattam, ebben a fejezetben a dinamikus programozás lényegét szeretném magyarázni és hangsúlyozni.

Bármelyik iterációs elvet, a Newton-Raphson vagy a linearizálás módszerét alkalmazzuk, a probléma megoldása nem okoz új eredményt, csak pontosabbat.

A dinamikus programozás olyan szoftveres számítási eljárás, amely különböző valószínűségi lehetőségeket vizsgál, s meghatározza egyes pontokra az optimális továbbhaladási útvonalat.

Könnyebb ennek az alapelvét elképzelni, ha például Budapestről Pécsre szeretnénk eljutni, többféle útvonalat választhatunk. Kitzűzött célunk lehet a minimális üzemanyag-felhasználás, a legrövidebb menetidő, vagy megtett távolság. Legyen ez az utóbbi a célfüggvény. A start és cél közötti lehetséges útvonalak halmazát felosztjuk egyforma távolságú részekre, s ezeken való áthaladási pontokat vizsgáljuk.

Az előrehaladó rekurzió alapján történő dinamikus számításnak a lényege, hogy a kiindulási pontból kezdi vizsgálni a lehetőségeket, és kiválasztja a célnak megfelelő optimális választást. Mindegyik ilyen áthaladási pontra megvizsgálja az összes lehetőséget, s ezek alapján felépíti a teljes hálózatra vonatkozó optimális útvonalat. Ez rengeteg számítást jelent, amely a rácsosztástól és az adódó lehetőségektől függ.

Ennél kedvezőbb a visszafelé haladó rekurzív módszeren alapuló dinamikus programozás. Ilyenkor is megmarad a rácsosztás az azokra adódó lehetőségekkel, viszont a számítás a végcélből kiindulva kezdődik. A céltól visszafelé lépeget a számítás, s mindig a célkitűzésnek megfelelő lépést jegyzi meg külön. Minden áthaladási pontnál megvizsgálja a lehetőségeket, s mindig csak az optimálist tartja meg. A start értékhez érve kiadódik az összefüggő útvonal, amely mindig az optimális. Itt már csak rácsponatok számával arányos mennyiségű számítást kell a szoftvernek elvégeznie. Egy-egy útvonal szakasznál mindig meg tudja határozni úgy a következő optimális lépést visszafelé, hogy figyelembe veszi a céltól az addig a pontig elérő lehetőségek legjobb választását.

A dinamikus számítás az iteráció lépéseit tudja elvégezni, viszont a bemenő paramétereket nekünk kell megadnunk. Ilyen adatokat az előző alfejezetekben meghatározott, rendszert leíró egyenletek segítségével tudunk megadni, kiegészítve a peremfeltételekkel. A szoftver az általunk betáplált szennyvíz telítődési jelleggörbét tudja közelíteni a megadott lineáris szivattyúzási jelleggörbékkel annyi különbséggel, hogy több kisebb egyenes szakasszal

próbálja meg lekövetni a telítődési jelleggörbét. Ezáltal pontosabb szivattyúzási térfogatáramot és működési időtartamot tud meghatározni, de ez a feladat megoldását tekintve csak finomítás, amely fordulatszám szabályozható szivattyúkkal tökéletesen meg is valósítható.

Egyelőre a dabasi szennyvízhálózatban állandó fordulatszámokkal működnek a szivattyúk, viszont a tervek szerint ezekre frekvenciaváltók kerülnek fel a közeljövőben. Addig is elérhetőnek bizonyul az általam vázolt megoldás, mely szerint állandó szennyvíztérfogatáramot kell lineáris jelleggörbével üzemelő szivattyúkkal eltávolítani a hálózathoz. A mérnöki feladat annak a meghatározása, hogy a rendszerben az adott szivattyúknak milyen munkaponton (nyomás, térfogatáram, fordulatszám) kell üzemelniük, hogy minél jobban követni tudják az előírt munkarendet, azaz a célfüggvény teljesüljön.

7. Összegzés, további feladatok

TDK dolgozatomban a dabasi szennyvíztisztító telep konkrét rendszerét vizsgálva mutattam be az összetett, nagy kiterjedésű csatornahálózatok döntéshozatali modelljét. A hidraulikai analízis során az összetett hálózatot alrendszerekre osztottam fel, s a veszteséges Bernoulli-egyenletek és a Kirchhoff-féle hidraulikai összefüggések segítségével írtam fel a rendszerelméleti alapegyenleteket. Ezeket vizsgálva a kutatásom kimutatta, hogy a feltételezett szennyvíz telítési görbe esetén a lineáris egyenletes ürítési stratégia alkalmazásával érhető el a gazdasági célfüggvény optimuma, azaz a szivattyúzási költségek minimalizálása.

A megfelelő üzemirányítás vizsgálatánál a lebontási és tisztítási folyamatokhoz szükséges tartózkodási időt is szükséges biztosítani a csatornahálózatban, amelyet figyelembe véve határozható meg a szivattyúk optimális üzemeltetési profilja.

A dolgozat jelen fázisában a modellezés elvi felírása és a szóba jövő optimalizációs eljárások megfogalmazása volt a cél. A modell adatokkal való feltöltése és a konkrét stratégia kialakítása a kutatás következő fázisában történhet.

Melléklet

1. számú melléklet: Az átemelők adatai

1. Kossuth utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 2,5 m

Mélysége: 6,8 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –46,250 tip. szivattyú H: 14 m Q: 30 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 225 KMPVC 1941 m.

A szennyvíztisztító telepre nyom.

2. Meder utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 5,05 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –20.434. tip. szivattyú H: 3,2 m Q: 23 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 75 KPE 59 m

A lakótelepi gravitációs csatornába nyom.

3. Hold utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 2,0 m

Mélysége: 5,5 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –27.254. tip. szivattyú H: 9 m Q: 14 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 225KMPVC 3255 m

A Tó utcai átemelővel közös nyomóvezetéke van. A Szennyvíztelepre nyom.

4. Tó utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 2,5 m

Mélysége: 7,4 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –66,450. tip. szivattyú H: 22 m Q: 40 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 225 KMPVC 4085 m.

A Szennyvíztelepre nyom.

5. Láp-Petőfi utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 2,5 m

Mélysége: 4,1 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –46,250. tip. szivattyú H: 14 m Q: 30 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 KMPVC 3768 m. Ø225 KMPVC 3656 m

A Szennyvíztelepre nyom.

6. Zentai utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 2,5 m

Mélysége: 4,45 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –47,480 tip. szivattyú H: 15 m Q: 35 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 225 KMPVC 3956

A szennyvíztisztító telepre nyom.

7. Vacsi utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 5,46 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –20.434. tip. szivattyú

Nyomóvezetéke: Ø 90 KPE 117 m

A Vacsi utcai gravitációs csatornába nyom.

8. Kinizsi utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 4,38 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –20.434. tip. szivattyú H: 3,2 m Q: 23 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 90 KPE 476 m

A Kinizsi utcai gravitációs csatornába nyom.

9. Tinódi utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 2,0 m

Mélysége: 5,97 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –26,252. tip. szivattyú H: 12 m Q: 22 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 KMPVC 3005 m

A Vasút utcai gravitációs csatornába nyom.

10. Árpád u.-i átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 3,9 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –20.434. tip. szivattyú H: 3,2 m Q: 23 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 90 KPE 253 m

A Tinódi utcai gravitációs csatornára nyom.

11. Öregországút 1.sz átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 5,12 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –21.430. tip. szivattyú H: 7,5 m Q: 30 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 KMPVC 2041 m

A szőlőhegyi gravitációs csatornába nyom.

12. Öregországút 2.sz átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 3,68 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –20.434. tip. szivattyú H: 3,2 m Q: 23 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 KMPVC 363 m

Az Öregországút gravitációs csatornába nyom.

13. Sári Besnyő Névtelen utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 5,05 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –20.434. tip. szivattyú H: 3,2 m Q: 23 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 90 KPE 528 m

Gravitációs csatornába nyom.

14. Inárcsi utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 3,5 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –22.432. tip. szivattyú H: 5 m Q: 28 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 KMPVC 2401 m

A Láp-Petőfi utcai átemelőbe nyom.

15. Szőlőhegy utcai átemelő

Az átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 2,68 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC –26.252. tip. szivattyú H: 12 m Q: 22 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 KMPVC 1164 m Ø225KMPVC 1140 m

A szennyvíztisztító telepre nyom.

16. Ipari park átemelő

Átemelő akna átmérője: 1,6 m

Mélysége: 3,8 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC 20,434 H: 3,2 m Q: 23 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 KPE 1043 m

Szent János utcai nyomott csatornába nyom

17. Álmos vezér utcai átemelő

Átemelő akna átmérője: 2 m

Mélysége: 4,2 m

Gépészete: 2 db Kontroll AKC 20,434 H: 3,2 m Q: 23 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 90KPE 397m

Álmos vezér utcai gravitációs csatornába nyom.

18. Martinovics téri átemelő

Az átemelő akna átmérője: 2,5 m

Mélysége: 5,7 m

Gépészete: 2 db Ecodan EN 3055.456. tip. szivattyú H: 10 m Q: 13 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 AC 1520m

A szennyvíztisztító telepre nyom.

19. Lakótelepi átemelő

Átemelő akna átmérője: 2,0 m

Mélysége: 5,4 m

Gépészete: 2 db FLYGT 3127.180 H: 5 m Q: 20 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø 160 AC 15 m

A Bartók Béla utcai gravitációs csatornába nyom.

20. PEMÁK átemelő

Átemelő akna átmérője: 3,5 m *3,8 m

Mélysége: 3,2 m

Gépészete: 2 db FLYGT 3080.430 H: 8 m Q: 9 l/sec

Nyomóvezetéke: Ø160 AC 1120 m

A szennyvíztisztító telepre nyom.

Irodalomjegyzék

- [1] Garbai László: Hidraulikai számítások az épületgépészetben és az energetikában, Akadémiai Kiadó, 2007, ISBN 978-963-05-8516-3
- [2] Garbai László: Távhőellátás. Hőszállítás, Typotex Kiadó, 2012, ISBN 978-963-279-739-7
- [3] Aris,S.R. - Nemhauser,G.L. – Wilde,D.J.: Optimization of Multistage Cycle and Branching System by Serial Procedures, A.I.Ch.E. Journal, 1964.
- [4] Bellmann,R.E.: Dinamic Programming, Princeton University Press; Princeton, 1962.
- [5] Bellmann,R.E. and Dreyfus: Applied Dynamic Programming; Princeton University Press; Princeton, 1962.
- [6] Szabó Imre: Gépészeti rendszertechnika, Műszaki könyvkiadó, 1986, ISBN 9631067203