



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK

TDK dolgozat

Fűtési rendszerek hidraulikai beszabályozása a 80-as években

Készítette: Tóth Krisztián Kristóf

MBZM71

Konzulens: Szánthó Zoltán

Budapest, 2023.november.5.

Tartalomjegyzék

1. Jelölések jegyzéke	3
2. Bevezetés	4
3. Az egycsöves fűtési rendszerek beszabályozatlanságának következményei.....	5
3.1. A helység hőmérsékletben mutatkozó hibák	6
3.2. A STÖRMAX-R szeleppel történő beszabályozás problémája.....	8
3.3. Mérő-szabályozó egység	9
3.4. A tömegáram megengedhető hibája	11
4. A beszabályozás problémájának megoldására kidolgozott matematikai modell részletes bemutatása	14
4.1. Épületgépészetben használt párhuzamos áramkörök	15
4.2. A modell végtelen nyomású terek esetén	16
4.3. A matematikai modell valós rendszerek esetén.....	19
4.4. A szivattyú munkapont-változásának szerepe	22
4.5. A számítógépes program	24
5. Ellenőrző mérések és gyakorlati hatások.....	25
5.1. Gyakorlati felhasználás	29
6. Összegzés.....	30
7. Summary.....	31
8. Irodalomjegyzék	32

1. Jelölések jegyzéke

	Megnevezés	Jel	Mértékegység
Jelölések	tömegáram	\dot{m}	kg/s
	nyomásveszteség	Δp	Pa
	sebesség	v	m/s
	sűrűség	ρ	kg/m ³
	csősúrlódási tényező	λ	-
	csőhossz	l	m
	csőátmérő	d	m
	alaki ellenállástényező	ξ	-
	beszabályozási tényező	B	1/m*kg
	keresztmetszet	A	m ²
	csőtípusok összes ellenállása	K	1/m*kg
	nyomás	p	Pa
	a párhuzamos áramkörökön kívül eső nyomásveszteségek	$\Sigma \Delta p$	Pa
	egy adott összekötő vezeték nyomásvesztesége	$\Delta' p$	Pa
	szivattyú jelleggörbéjének jellemzője I	r	-
	szivattyú jelleggörbéjének jellemzője II	s	-
	szivattyú jelleggörbéjének jellemzője III	t	-
	Indexek	egy n tagból álló sor i-dik eleme	i
belépő		be	-
kilépő		ki	-
rendszer		r	-
egy n tagból álló sor n-dik eleme		n	
szelep		SZ	-
ellenállás parabola		I	-
szivattyú parabola		II	-

2. Bevezetés

Manapság egy jól működő, energiatakarékos fűtést megvalósító épület esetében elengedhetetlen a fűtési rendszer megfelelő beszabályozása. A modern beszabályozó szelepeknek hála mindez ma már viszonylag egyszerűen megoldható. Az 1990-es évekig azonban, a kellő pontosságú beszabályozási módszer nélkül az épületgépész mérnököknek komoly fejtörést okozott az épületek beszabályozása. Magyarországon dr. Macskásy Árpád volt az első, aki még az 50-es években komolyabban foglalkozott a beszabályozás kérdéskörével, ám a szakma hazai képviselőinek egészen 1978-ig nem sikerült egyetlen megoldást sem találniuk, amivel a beszabályozást kellő pontossággal el lehetett volna végezni.

Ekkor Csohány Kálmán az abban az évben elkészült diplomamunkájában vezet le egy bonyolult számításon alapuló megoldást, amiben külföldi, elsősorban német szerzők hidraulikával foglalkozó munkáit használja fel kiindulásként. A diplomamunkában bemutatott számítás volt idehaza az első, ami kellő pontossággal megközelítette a tervező által kiszámolt állapotot, így a szükséges számítógépes program elkészülését követően használatát kötelezően előírták.

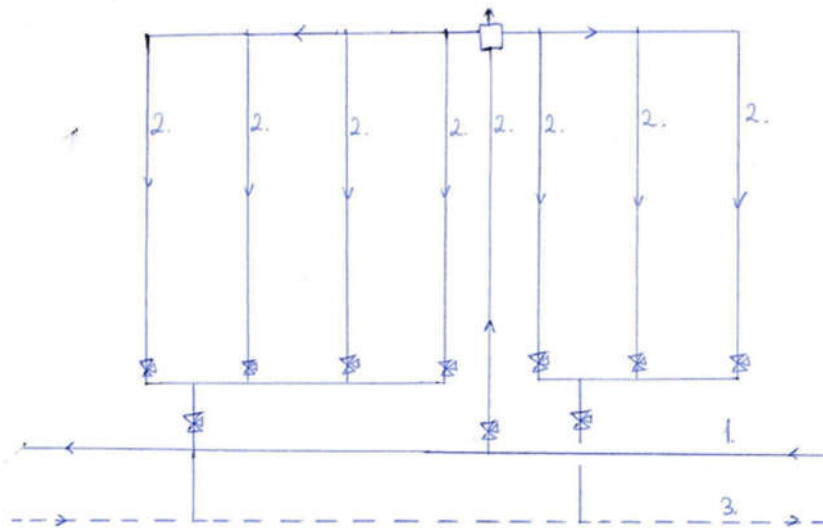
Munkámmal az a célom, hogy az 1980-as évekre elterjedt, új beszabályozási módszer kialakulásának körülményeit megvizsgáljam és a folyamat lépéseit történelemhűen dokumentáljam. Részletesen bemutatom azokat az állapotokat, amik szükségessé tették a módszer kitalálását, összegzem a számítás levezetésénél használt legfontosabb lépéseket, valamint kitérek az új módszer gyakorlati eredményeire is. A papíralapú források feldolgozása mellett többször is hosszasan beszélgettem Csohány Kálmánnal, aki ezek során nem csak az írásos forrásokból kimaró részleteket tárta fel nekem, hanem képet mutatott arról is, hogy mennyivel másképpen zajlottak a dolgok a digitalizáció elterjedése előtt. Az elkészült anyag, mint a hazai épületgépészet egyik fontos szellemi örökségnek a dokumentuma, az Épületgépészeti Múzeum azon célját is szolgálja, hogy a magyar épületgépészek komoly eredményeit jól dokumentáltan összegyűjtse.

3. Az egycsöves fűtési rendszerek beszállítatlanságának következményei

Az 1970-es évek első felében felgyorsuló iparosodás következtében drasztikusan nőtt a városba költözők száma, ami magával hozta a panellakások építésének szükségességét. Az ebben az időszakban épülő lakótelepek épületeire jellemző volt, hogy azokat előre gyártott elemekből állították össze, ami jelentősen felgyorsította az építkezéseket. Ezek közé tartozott többek között a lépcsőház, az erkély és az épületgépészet is. A gyors építkezés és az előre gyártott elemek következtében ezeknél az épületeknél terjedt el az átfolyós egycsöves fűtési rendszer. Ennek hatalmas előnye volt, hogy a szerelése kevés helyszíni munkával járt, legnagyobb hátrányai pedig a borzasztóan nagy csővezetéki ellenállás és a szabályozhatóság hiánya. Az ilyen módon épült úgynevezett házgyári lakóépületek fűtési rendszere a legtöbb esetben felső elosztású, egycsöves fűtési rendszer volt, ahol a hőtermelő a földszinten helyezkedett el. Ezeknél az épületeknél a helyszíni szerelés kimerült a felső elosztóhálózatnak az épület tulajdonságaihoz igazításában és a már felszerelt radiátorokat összekötő U-csövek menetes kötéssel történő beépítésében.

Ha a rendszer minden egyes elemének pontos ellenállása ismert lenne és a kivitelezés során semmi sem térne el a tervezett állapottól, akkor elég lenne készülékeként egy beszállító szelep és ennek pontos beállítása a névleges tömegáramok biztosításához. Mivel már a tervezésnél is csak közelíteni lehet például egy idom vagy egy szelep ellenállását, és a kivitelezés sem követi feltétlenül a tervek, így minden fűtési rendszernél szükség van annak pontos beszállítására. Ennek során a hálózatba erre a célra beépített beszállító szelepek segítségével a fűtési rendszer minden szakaszán be kell állítani a névleges tömegáramot. Manapság erre statikus vagy dinamikus beszállítási eljárások léteznek, melynek módszereit és eszközeit a 1980-as évek végén Robert Petitjean és a Tour&Anderson cég fektette le. Statikus beszállítás során a beszállító szelepen mért nyomáskülönbség alapján biztosítódik a kívánt tömegáram. A rendszer statikussága miatt ez a fajta beszállítás nem képes követni egy változó tömegáramú hálózat változó üzemviszonyait, ami hidraulikai interaktivitáshoz vezet például a szabályozó szelepek mozgása során. A dinamikus beszállításhoz használt nyomásfüggetlen beszállító szelepek alkalmazkodni tudnak a változó üzemi viszonyokhoz a szelepkapacitás (k_v) értékének változtatásával. Ezek a szelepek már nem nyomáskülönbséget, hanem közvetlenül tömegáramot képesek mérni, működésük során pedig a nyomáskülönbségváltozást kompenzálják úgy, hogy a szabályozószelepen eső nyomáskülönbséget állandó értéken tartják. [1]

Az 1. ábrán egyessel jelölt vezeték neve a szakdolgozat során előremenő alapvezeték, a hárommal jelölt csőszakasz neve visszatérő alapvezeték, míg a kettessel jelölt vezetékek az összekötő vezetékek. A gyakori szóismétlések elkerülése érdekében az összekötő vezetékekre helyenként leszállóként vagy strangként fogok hivatkozni.



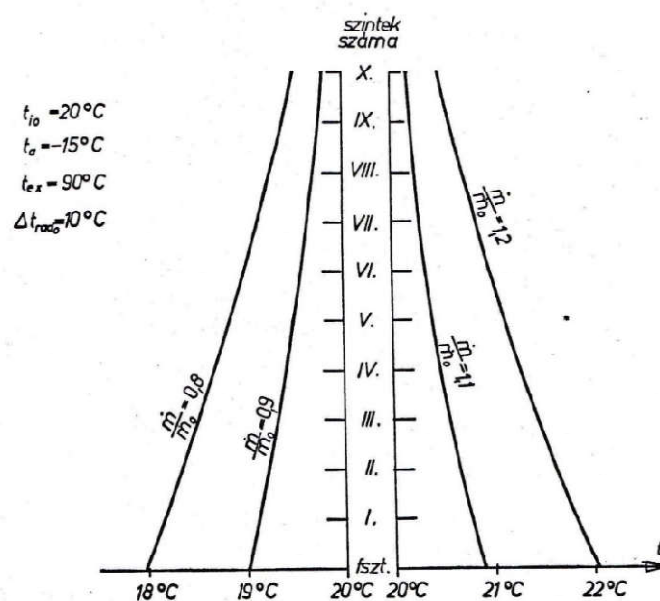
1. ábra – felső elosztású egycsöves fűtési rendszer

Az ilyen típusú épületeknél a hőtermelő által felmelegített vizet párhuzamosan kapcsolt csővezetékrendszerek szállították a fogyasztókhoz (1. ábra), amiknek pontos besabályozása sokáig szinte kivitelezhetetlen volt. A rossz, vagy esetenként el sem végzett besabályozás eredményeképpen a lakások helység hőmérséklete jelentősen eltért az előzetesen megtervezett állapottól. Ez amellet, hogy a lakók komfortját sem elégítette ki, komoly energiapazarlással is járt, amit már abban az időben sem néztek jó szemmel. A rendszer nem megfelelő működését több tényező is befolyásolta. Egyrészt a szakma számára sokáig nem állt rendelkezésre a megfelelő műszaki háttér a kellően kielégítő besabályozás megvalósításához, másrészt pedig az a hőveszteség-számítási módszer, amit a tervezők akkoriban alkalmaztak, nem fedte le teljes mértékben az építmények épületfizikai sajátosságait.

3.1. A helység hőmérsékletben mutatkozó hibák

Már az első lakások átadásánál világossá vált, hogy az épületen belüli hőmérsékleteloszlás közel sem egyenletes. Egy 1980-ban publikált tanulmány [2] arról számolt be, hogy a külső hőmérséklet függvényében a házgyári lakóépületek felső szintjein erőteljes túlfűtés mutatkozik. Mínusz 15°C-os külső hőmérséklet esetén előfordult, hogy az elérni kívánt 20°C-os helység hőmérsékletnél 4-5 fokkal is magasabb értékeket mértek, miközben az alsó szinteken még a

megkívánt 20°C -ot sem lehetett elérni. A felső szinteken az erőteljes túlfűtés ellen a lakók ablaknyitással védekeztek, miközben az alsó szintek alacsony hőmérsékletének kompenzálására megemelték az előremenő vízhőmérsékletet. Ez csak tovább fokozta a felső szintek túlfűtését, így a még gyakoribb ablaknyitás csak növelte az elpazarolt energia mennyiségét. A jelentős hőmérsékleti anomália mellett szinte eltörpültek az olyan apróságok, minthogy a lakáson belüli helységekben különböző hőmérsékleteket kéne tartani. Az akkori előírások kimondták, hogy a fürdőszobában 24°C -ot, a szobában 20°C -ot, míg a konyhában 16°C -ot kell tartani. [3] Erre még egy tökéletesen működő fűtési rendszer sem lett volna képes, ugyanis maga az épületszerkezet sem volt olyan színvonalas, hogy mindez fizikailag lehetséges legyen. A szintek közti eltérő hőmérséklet azért alakulhatott ki, mert a nem megfelelő beszabályozás miatt a tervezettől eltérő mennyiségű víz áramlott a csövekben. Az egycsöves fűtési rendszer sajátossága, hogy egy adott radiátorból kilépő víz a következő radiátor előremenője lesz. Nagyobb tömegáram mellett a hőleadón átáramló víz kisebb mértékben fog lehűlni, így magasabb hőmérséklettel érkezik a következő radiátorhoz, ezért ott jobb lesz a fűtőtest hőleadása. Természetesen a tervezettnél kisebb fűtővíz tömegáram esetén az előzetes számításoknál jelentősebb mértékben hűl le a hőleadón a víz, ami rontja a soron következő fűtőtest hőleadását. Mivel az előremenő vízhőmérséklet a hőtermelő korlátjai miatt csak bizonyos mértékig növelhető, könnyen megállapítható, hogy amíg a felső szintek hőleadását kizárólag a tömegárammal lehet szabályozni, addig az alsóbb szinteken a tervezettől eltérő tömegáram hatására már a fűtővíz hőmérséklete is befolyásolja a hőleadást. Ez a hatás pedig a földszint felé haladva halmozódott. A jelenségről akkoriban konkrét méréseket is végeztek, ahol a névlegestől eltérő tömegáramok helység-hőmérsékletre gyakorolt hatását vizsgálták. Ezt a mérést összegzi a 2.ábra. [2]



2.ábra – a tömegáramváltozás hatása a helység-hőmérsékletre

Az ábra egy 10 emeletes épület egyik összekötő vezetéke mentén mutatja a névlegestől eltérő tömegáramok helység-hőmérsékletre gyakorolt hatását átkötőszakaszos fűtési rendszer esetén. A számításokat -15°C -os külső hőmérséklet és 20°C -os helység-hőmérséklet esetén végezték 90°C -os előremenő hőmérsékletet és 10°C -os hőmérsékletkülönbséget feltételezve a hőleadó előremenő és visszatérő víz-hőmérséklete között. Az eredmények azt mutatták, hogy a névlegestől eltérő tömegáram negatív hatásai elsősorban az alsó szinteken érzékelhetőek, ahol azt lehet mondani, hogy körülbelül 10 %-os tömegárameltérés hatására változik 1°C -ot a belső hőmérséklet. Egycsöves fűtési rendszerek esetében az egyre csökkenő előremenő hőmérséklet kompenzálása érdekében a tervezés során a hőleadó méretét megnövelik ugyan, ez azonban csak részben képes a hőleadás mértékének javítására, különösen akkor, ha a nem megfelelő beszabályozás miatt a névlegesnél alacsonyabb hőmérsékletű víz érkezik a megnövelt felületű hőleadóhoz. Ahhoz, hogy a felső elosztású, egycsöves fűtési rendszerek hőleadóit a tervezés során megfelelően tudják méretezni, szükség van az adott helység hőveszteségének és helység-hőmérsékletének ismeretére. Ezenfelül ismerni kell a külső hőmérséklet értékét, az előremenő és visszatérő fűtővíz hőmérsékletének nagyságát, a tömegáramot és az egyes csőszakaszok átmérőjét is [4]. A fenti alapadatokra támaszkodó méretezés eredménye, hogy az alsó szinteken nagyobb felületű hőleadók lettek beépítve, ugyanis a nagyobb felület segítségével lehetett némileg kompenzálni az egyre csökkenő előremenő hőmérsékletet.

3.2. A STÖRMAX-R szeleppel történő beszabályozás problémája

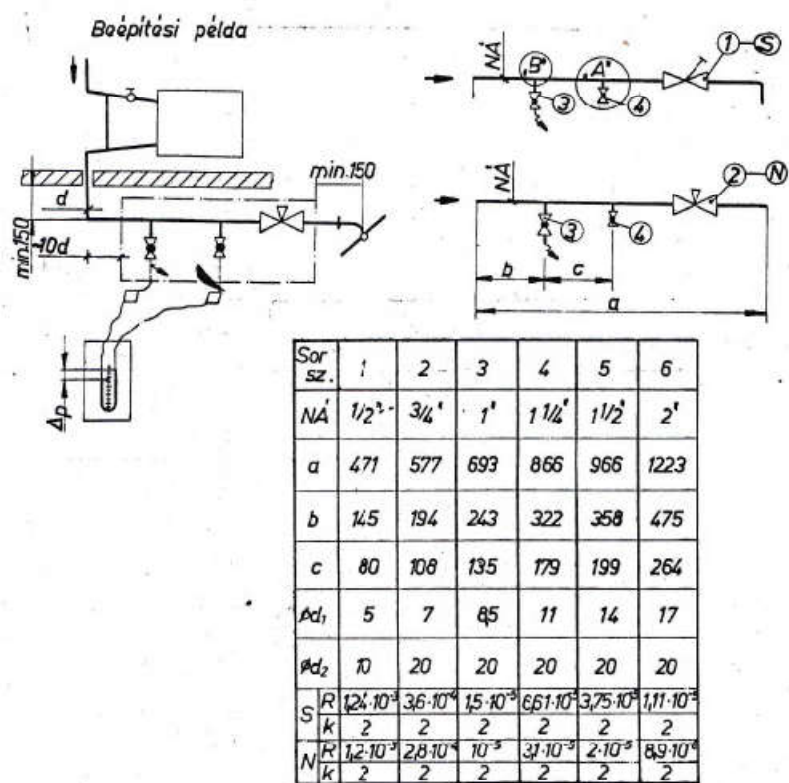
A matematikai modell kidolgozása előtt a kivitelezők a próbálgatás mellett az akkoriban a legjobb szabályozó szelepnek tartott STÖRMAX-R típusú szelep tervező által megadott értékekre állításával végezték a beszabályozást. [2][5] Ilyenkor az sem volt ritka, hogy az egyes csőszakaszokon a névleges tömegáram több mint kétszerese áramlott. Mivel a rendszerek többségénél a szivattyúhoz közel több, míg attól távolabb kevesebb fűtővíz áramlott, érezni lehetett, hogy valamilyen általános hiba okozza a komoly eltéréseket. Mivel a szabályozó szelep csak diszkrét értékekre állítható, így már a tervezőnek is minden esetben kerekítenie kellett, amikor az egyes szelepek ellenállását meghatározta. Ha a beszabályozáshoz szükséges, pontosan kiszámolt ellenállás két szelepállás közé esett, akkor – természetesen – a tervező mindig a biztonság irányába tért el. Ha feltételezzük, hogy minden szelepnél két diszkrét állás közé esett a beállítandó nyomásvesztés, akkor a beszabályozás végére egy olyan rendszer jött létre, aminek ellenállása kevesebb, mint amire a szivattyú munkapontját beállították. Ez volt tehát az, aminek következményeként a szivattyúhoz közel eső strangokon a névleges tömegáram

többszöröse áramlott. A rendszer kisebb ellenállása miatt ugyan valamelyest több vizet szállított a szivattyú, ám mint minden épületgépészeti elemnek, a szivattyúnak is vannak korlátai, ami így nem tudta teljes mértékben pótolni a rendszer végén található összekötő vezetékekből hiányzó tömegáramot.

3.3. Mérő-szabályozó egység

A szakdolgozatban részletezett módszer alkalmazhatóságának legfontosabb lépése az 1976-ra kifejlesztett mérő-szabályozó egység volt, ami képes volt a vizsgált csőszakasz tömegáramát méréssel meghatározni. Az egységet a Csőszer vállalat tervezte és gyártotta. Ők az egész házyári lakásépítés épületgépészeti rendszergazdái voltak és munkájuk kiterjedt többek között az épületben található fűtési vezetékek méretezésre is. [3] Ezt megelőzően Magyarországon egyetlen eszköz sem létezett, ami-

vel az épületek fűtési rendszerének tömegáramát mérni lehetett volna, így a besabályozás során is csupán a hőmérsékletekre tudtak hagyatkozni. A hőmérséklet alapján történő besabályozás azért nem volt kifizetődő, mert a hidraulikai besabályozás hőtechnikai következményei a rendszer tehetetlensége miatt csak órákkal később érzékelhetőek, így egy-egy ilyen munka borzasztóan időigényes volt. Az új eszközt, ami gyakorlatilag egy csőszakasz volt két nyomáskivezetővel és egy szabályozó szeleppel a 3.ábra mutatja be. [2]



Jelmagyarázat:

- ① S Hidraulikai jellemzők STRÖMAX R 4117 szeleppel
 - ② N Hidraulikai jellemzők NORMAL 11 szeleppel
 - ③ Leeresztő csap (kazántöltő csap, csővég csavarzattal) 1/2-os
 - ④ Mérő csap (próbcsap csatl. anyával külső menettel) 3/8"-os
Csővég csavarzat.
- R Jellemző hidraulikai állandó
k Kitevő
 $\Delta p = R \cdot \dot{m}^k \text{ (kp/m}^2\text{)}$

3. ábra – mérő-szabályozó egység

Az egység egyes elemeinek pontos hosszát a mérni kívánt csőszakasz átmérője is befolyásolta. Ezek az előre meghatározott számok láthatóak az ábra után található táblázatban.

Maga a mérő-szabályozó egység nyomáskülönbséget mért, amiből a keresett tömegáramot egy erre a célra készített diagram segítségével lehetett megállapítani. A méréshez az adott belső csőátmérőt szűkíteni kellett. A mérés pontosságához szükséges nyomáskülönbséget a szűkített d_2 -es átmérővel biztosították, aminek pontos meghatározására egy méretezés szolgált. A méretezési egyenlet alapján a d_2 -es átmérő függ a csőben áramló térfogatáramtól, az áramló közeg sűrűségétől, a mérőperemen eső nyomásvesztéstől és egy úgynevezett átömlési számtól, ami megfeleltethető a modern szelepek szelepkapacitásának (k_v). [6]

A kifejlesztett mérő-szabályozó gyártása során minden darabot mérőpadon hitelesítettek, ami során meghatározták az adott egység mérési hibáját. A túrésmezőt úgy állapították meg, hogy a mérésre szolgáló műszer mért tömegárama maximum annyival térhetett el a valóságtól, ami egy lakás helyiségében nem okozott 1°C -nál nagyobb hőmérsékletkülönbséget. [3]

A mérő-szabályozó egység használata tehát lehetőséget adott a szabályozás hatásainak azonnali értékelésére. Maga a szerkezet azonban nem oldotta meg rögtön a beszabályozással járó összes problémát, ugyanis hiába lehetett tudni az adott összekötő vezetékben áramló fűtővíz tömegáramát, arról semmi információval nem szolgált, hogy a mérő-szabályozó egység részét képező, korábban bemutatott STÖRMAX-R típusú szabályozó szelep állítása hogyan befolyásolja a többi strang tömegáramát. Ez a probléma pedig az egész fűtési rendszer beszabályozásának legnagyobb rákfenéje, ugyanis ha a csővezeték rendszer egy pontján megváltozik az ellenállás, az az egész rendszerre hatással van. Így a korábban jó tömegáramra beállított szakaszokon átfolyó víz mennyisége is változni fog.

Az Újpest Városcsopont 303-as épülete volt az első Budapesten, amibe a Csőszer által kifejlesztett mérő-szabályozó egység beépítésre került, így a szakembereknek itt nyílt először lehetőségük arra, hogy a STÖRMAX-R szelep által elvégzett beszabályozás eredményeit mérésrel ellenőrizhessék. [2]

Összekötő vezeték jele	Mérete	p	\dot{m}	p	\dot{m}	\dot{m}
		mm v.o.	l/h	mm v.o.	l/h	l/h
		Nyitott szelepek esetén		beállított szelepekkel		tervezett
4	¾"	8	392	18	588	980
10	¾"	108	1440	24	679	656,5
15	¾"	122	1530	69	1151	651
16	1"	74	2099	62	1921	1005
22	1"	17	1006	8	690	974,5
23	1"	48	1690	46	1654	1100
27	1"	95	2378	80	2182	nincs adat

1.táblázat – a be szabályozás eredménye tervezői számítások alapján

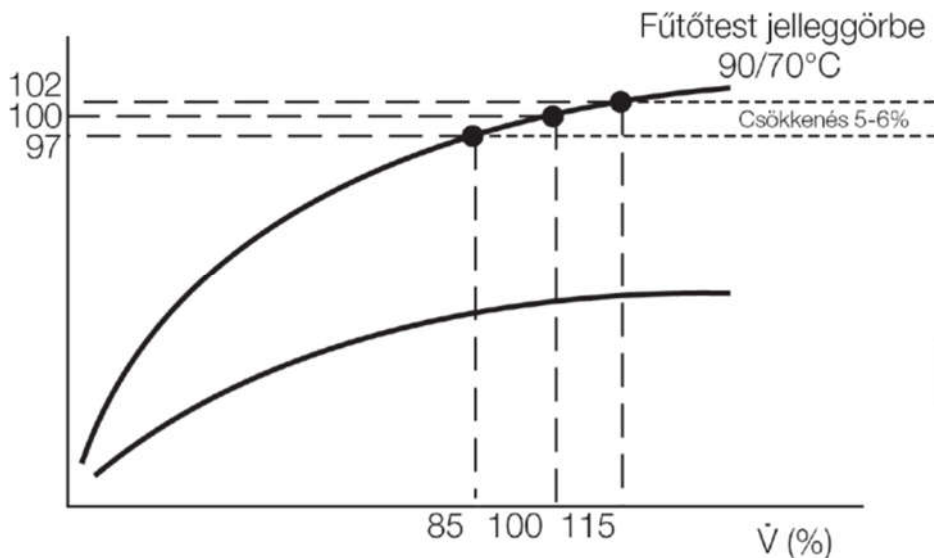
A 1.táblázat mérési eredményei tökéletesen szemléltetik a fent részletezett problémát. A feltüntetett hét összekötő vezeték közül mindössze a 10-es jelű strang tömegárama esett az elfogadható 10 %-os hibahatáron belülre, miközben három leszálló tömegárama is meghaladta a névleges vízmennyiség 160 %-át. A hőleadókat ellátó összekötő vezetékek számozásából arra lehet következtetni, hogy az épületben legalább 27 strangot építettek be. A mérési eredmények alapján egyértelmű, hogy a csővezeték méretétől és a szivattyútól való távolságtól függetlenül a legtöbb összekötő vezetékben nem a kívánt tömegáramok áramlottak. Mivel két diszkrét szelepállás közül a tervező mindig azt adta meg, amivel egy-egy strangot inkább túlméretez, így nem meglepő, hogy a táblázatban feltüntetett strangok többségében a tervezettnél több víz áramlott. Mikor a szelepen beállított ellenállás közel volt a hidraulikai méretezés során kiszámolt ellenálláshoz, akkor fordult elő, hogy az adott leszállóban a tervezettnél kisebb tömegáram jelent meg. Egy ilyen mérési eredmény után próbálgatással persze lehetne még a kialakult rendszeren javítani, ez azonban roppant időigényes, és az egyes strangokon eszközölt ellenállásváltoztatások hatásainak pontos ismerete nélkül könnyen előfordulhat, hogy a teljes rendszer be szabályozottságán semmit sem sikerül javítani.

3.4. A tömegáram megengedhető hibája

Mikor a helység hőmérsékleti anomáliákról szóló eredmények napvilágot láttak és kiderült az is, hogy a mérő-szabályozó egység önmagában nem képes a be szabályozást megoldani, a Csőszer vállalat elkezdte vizsgálni, hogy mi okozhatja a nem megfelelő hőmérsékleteloszlást.

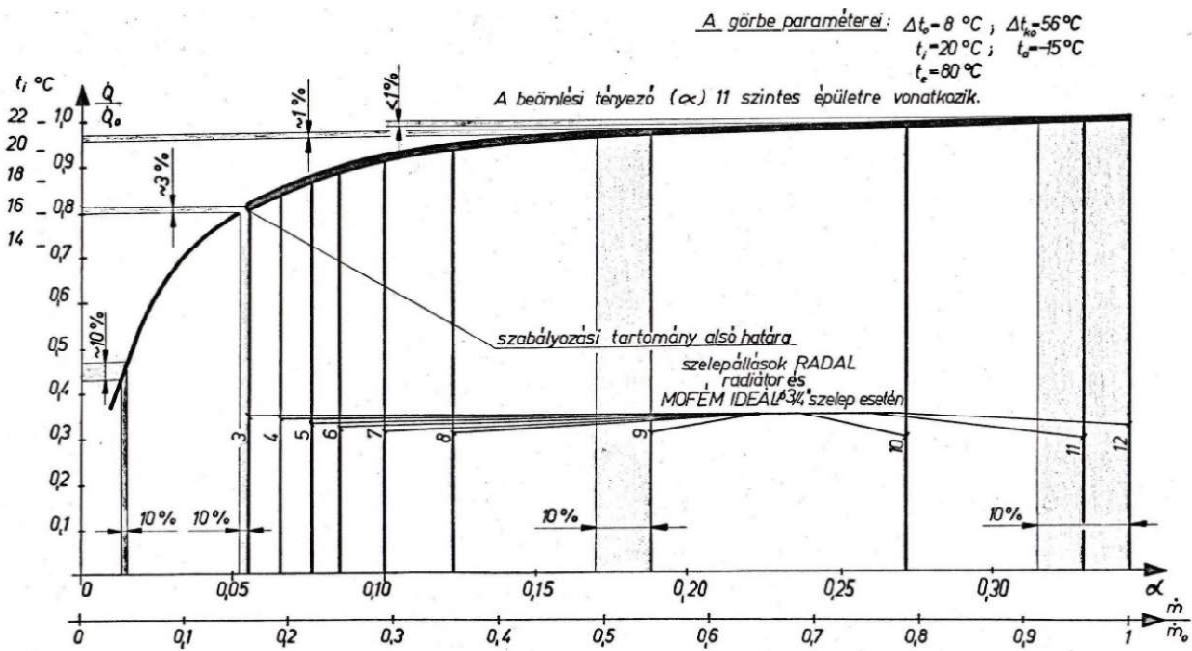
A vállalat Műszaki Fejlesztési Osztálya több dolgot is számításba vett, ugyanis egyáltalán nem volt triviális, hogy a problémákat a nem megfelelő beszabályozás okozza.

Egy átlagos hőleadó jelleggörbéjét a 4.ábra mutatja, ahol az x tengelyen a tömegáramváltozás, míg az y tengelyen a teljesítmény változás látható. [7]



4.ábra – hőleadó jelleggörbe

Egy hőleadó abban az esetben szabályozható kielégítően, ha a tömegáram kismértékű változtatása hasonló mértékben befolyásolja a hőleadást. Mivel a hőleadó jelleggörbéje jelentősen eltér a lineáris karakterisztikától, olyan szelepet kell gyártani, ami saját karakterisztikájával képes kompenzálni a hőleadó jelleggörbéjét és a kettő elemmel együtt már megfelelően működ-hessen a szabályozás. Az akkoriban beszerezhető szelepek karakterisztikája meg sem közelítette a szükséges karakterisztikát, így közel sem lehetett velük megfelelően szabályozni. Ha zárt szelepállásból a nyitás felé mozgatták a szeleptányért, akkor a kezdeti kis szelepelmozdulás relatív nagy vízmennyiség változást okozott. [3] A rendszer jobb szabályozhatóságának érdekében az a megoldás született, hogy az addig többnyire átfolyós rendszerek helyett átkötőszakaszos rendszereket építettek és minden radiátorhoz tettek egy új fejlesztésű szelepet, amivel a szabályozást el lehet végezni. Az így kialakított rendszer 'TR fűtési rendszer' név alatt futott a szakmában. Az új rendszer megjelenésével lehetővé vált a fűtési hálózat minőségi és mennyiségi szabályozása is. [8] A MOFÉM ideál néven piacra dobott kettősbeállítású radiátorszelep ugyan nem működött rosszul, de az rögtön kiderült, hogy a beszabályozás feladatát nem képes kiváltani. Az 5.ábrán látható diagram mutatja egy ilyen szelep és hőleadó együttes karakterisztikáját. [2]



5. ábra – MOFÉM ideál szeleppel szerelt hőleadó jelleggörbéje

A kettős beosztású vízszintes tengelyen a névlegestől eltérő tömegáramok mellett a beömlési tényező (α) is fel lett tüntetve. A beömlési tényező azt mutatja meg, hogy átkötőszakaszos rendszerben az egyes szelepállások esetén a fűtővíz mekkora része áramlik a hőleadó felé. A függőleges tengely is kettős beosztású, ahol a radiátor hőleadásának aránya és a helység-hőmérsékletek kerültek feltüntetésre. Az ábra alapján elmondható, hogy a legtöbb szelepállásnál a 10 %-os tömegárameltérés nem okoz jelentős változást a radiátor hőleadásában. 9-es szelepállás esetén például a 10 %-os hiba mindössze egy százalékkal változtatja meg a hőleadást, aminek eredményeképp a helység-hőmérséklet körülbelül fél fokkal fog változni. Ez az eltérés még bőven belül van azon a tartományon, ami a lakók komfortérzetét befolyásolná. A teljes zárást is megközelítő 3-as szelepállásnál is csupán 3 % az eltérés a hőleadásban. Ennél nagyobb fojtásnál már komolyabban változik a hőleadás is, ez azonban már kívül esik az előbeállítási tartományon, ezért mindez az előbeállítás pontosságát már nem befolyásolja.

Átkötőszakaszos rendszer esetében a keverés miatt a hőmérséklet ugyan kisebb mértékben esik két radiátor között, jól méretezett átkötőszakaszos fűtőt testen a fűtővíz tömegáramának változása sem elhanyagolható a hőleadás szempontjából. Így amíg átfolyós rendszer esetében 1 °C helység-hőmérséklet eltérés 10 %-os tömegáramhibát enged meg, átkötőszakaszos esetben maximum 5-7 %-os hiba fér bele. Bár a keverés miatti magasabb előremenő hőmérsékletből arra lehet következtetni, hogy átkötőszakaszos rendszernél nagyobb tömegáram hiba is megengedhető lehet, a gyakorlatban szerzett tapasztalatok egyértelműen bebizonyították, hogy ez

mégsem így van. Ennek az az oka, hogy az átfolyós esetben körülbelül háromszor nagyobb tömegáram áramlik a rendszerben, mint az átkötőszakaszos rendszer esetében, így előbbinél a névlegestől eltérő tömegáram csak csekély mértékben befolyásolja a fűtőtest hőleadását. Az új szabályozási rendszerrel tehát átfolyós rendszer esetén 10 %-os, míg átkötőszakaszos rendszer esetében 5-7 %-os volt a tömegáram megengedhető hibája. Ilyen kicsi hibahatáron belülre az akkori kivitelezésben alkalmazott próbálgatásos módszerrel lehetetlen volt egy rendszert elfogadható pontossággal beszabályozni, így világossá vált, hogy az igények megfelelő kielégítése érdekében szükségeltetik egy a tervezett kellően megközelítő beszabályozási módszer kidolgozása. [5]

4. A beszabályozás problémájának megoldására kidolgozott matematikai modell részletes bemutatása

A beszabályozás nehézségeinek ismeretében logikus célkitűzés volt egy olyan módszer kidolgozása, ami során minden szabályozó szelepen csak egyszer kell állítani és minden mérőszabályozó egységen csak egyszer kell a tömegáramot megmérni. Egy több tucat összekötővezeték tartalmazó rendszerrel még ez is hosszadalmas tud lenni, azonban egy hálózat pontos működéséhez szükséges minden szelephez legalább egyszer hozzányúlni. Ezt egyáltalán nem könnyű megvalósítani, hisz egy párhuzamos körökből álló rendszer esetében bármilyen változtatás a rendszer minden pontján érezteti hatását. Hogy ez a célkitűzés megvalósítható legyen, egy olyan módszert kellett kidolgozni, ami előre megmondja, hogy egy adott strangon milyen tömegáramot szükséges beállítani ahhoz, hogy az utolsó szabályozó szelep beállítása után minden összekötő vezetékre a tervezett tömegáram jusson. Ehhez a tervezési állapot mellett ismerni kell a kiinduló állapotot is, valamint azt is, hogy az egyes szelepek meghatározott értékre állításakor éppen milyen tömegáram-viszonyok vannak a rendszerben.

A modell kidolgozását nehezíti, hogy bár az épületek többsége egyforma alapelvek alapján épül, sőt két egyforma. Minden épület prototípus, így a kidolgozandó módszernek minden apró különbséget tudni kell kezelnie. A számítás elvégzéséhez ismerni kell a csőszakaszok áramlási ellenállását, a hálózat elrendezését, a megkívánt tömegáramokat, a szelepek különböző állásainak ellenállás tényezőit, valamint a szivattyú jelleggörbét is.

A kidolgozott módszer első lépésében a rendszerben található minden szabályozó szelep teljesen nyitva van. Ez mindenki számára egy kellő pontossággal definiálható alapállapot, amiben

a szelepek nyitott állásához tartozó ellenállástényező és a szivattyú jelleggörbéjének ismeretében meghatározható, hogy a hálózat ilyen állapotában a szivattyú mennyi fűtővizet szállít. Ha szükséges, ekkor be lehet állítani a szivattyúhoz tartozó mérőegység segítségével a szállítandó tömegáramot, ugyanis ennek pontos beállítása nélkül a beszabályozást nincs értelme elkezdeni. A beszabályozás elvégzéséhez először meg kell határozni egy logikus sorrendet, ami mentén a szelepeket az előre meghatározott értékre állítják. Hogy a mérő-szabályozóval ne kelljen a névleges tömegáram töredékét mérni, érdemes a beszabályozást a szivattyúhoz közel kezdeni, mert kis tömegáramoknál a mérőműszer nagyobb hibával képes csak mérni. Az első szabályozó szelep végleges beállításánál még az összes többi szelep teljesen nyitott állapotban van. Ahhoz, hogy ezt a szelepet a megfelelő fojtásra állítsa a kivitelező, a tervezőnek a számítási módszer alapján meg kell adnia azt a tömegáramot, ami a szelepállítás után az adott strangon megjelenik. Ez a tömegáram a többi szelep teljesen nyitott állása miatt kisebb lesz, mint a beszabályozás végén mért tömegáram. Az első beszabályozó szelep beállítását követően a rendszer összes szelepét be kell állítani a tervező által meghatározott tömegáramra, és csakis az utolsó szelep beállítását követően fog a rendszer minden összekötő vezetékében a tervezési tömegáram áramlani. Leegyszerűsítve elmondható, hogy minden összekötő vezetéknél ismert egy 'ellenőrző tömegáram' és egy 'beállítási tömegáram'. Előbbi az a tömegáram, ami az adott strang beállítása előtt áramlik a vezetékben, utóbbi pedig az a mennyiség, ami a szelep megfelelő fojtása után fog áramlani a csőben akkor, mikor a soron következő szelepek még nyitott állapotban vannak. A számítási módszer szempontjából minden szelepállítás egy-egy üzemállapotnak felel meg. A számítást mindegyik üzemállapotra el kell végezni, és még ekkor is csak két összekötő vezetékre releváns a kapott tömegáram. Adott szelepállítás után az első összekötő vezetékben annak *beállítási tömegárama* az érdekes, valamint a következő strang tömegárama, ami annak *ellenőrzési tömegárama* lesz. [5][9][10]

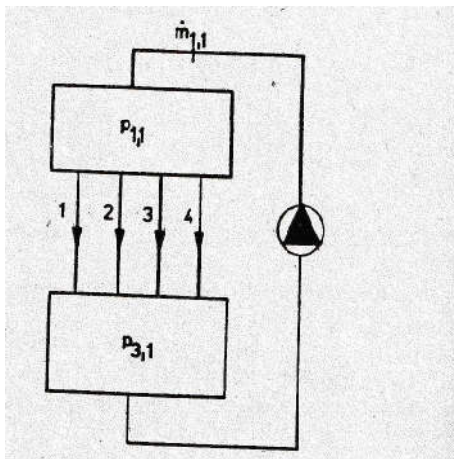
4.1. Épületgépészetben használt párhuzamos áramkörök

A házigyári lakóépületek fűtési hálózatát a matematikai modellben párhuzamos áramkörök segítségével modellezik. Az épületgépészetben nagyon is elterjedt párhuzamos köröknek három alaptípusát lehet megkülönböztetni. [9]

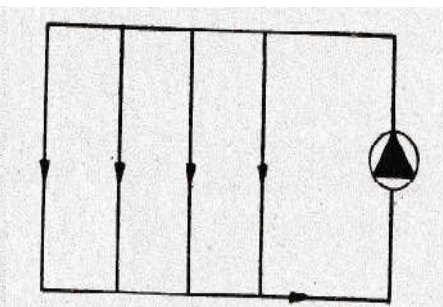
- I. azonos nyomású térből azonos nyomású térbe érkező párhuzamos körök (6.ábra)
- II. különböző nyomású térből induló és különböző nyomású térbe érkező áramkörök azonos oldali csatlakozással (7.ábra)

III. különböző nyomású térből induló és különböző nyomású térbe érkező áramkörök ellentétes oldali csatlakozással (8.ábra)

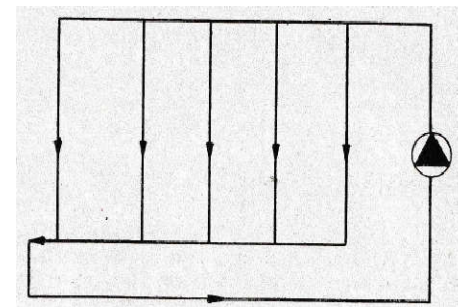
A harmadik alaptípus az úgynevezett Tichelmann kapcsolás, amit 1911-ben publikált Albert Tichelmann német mérnök. A csakis állandó térfogatáramú rendszereknél használható kapcsolást abból a célból kezdték el beépíteni, hogy a bonyolult beszabályozást elkerüljék. Ennél a megoldásnál a csővezetékrendszert úgy alakították ki, hogy az egyes fogyasztókra eső ellenállás megegyezzen. [11]



6.ábra – azonos nyomású térből induló és azonosnyomású térbe érkező párhuzamos áramkörök



7.ábra – különböző nyomású térből induló és érkező párhuzamos áramkör, azonos oldali csatlakozással



8.ábra - különböző nyomású térből induló és érkező párhuzamos áramkör, ellentétes oldali csatlakozással

4.2. A modell végtelen nyomású terek esetén

Az első alaptípus az épületgépészeti gyakorlatban kevésbé elterjedt, ugyanis valós rendszereknél sosem lehet egy áramköri elem áramlási ellenállása zérus. Mégis a modell megalkotásának első lépéseiben a Csohány Kálmán diplomamunkájának alapjául szolgáló irodalomban a szerzők erre a típusra hagyatkoznak, mégpedig azért, mert a kezdeti egyenleteket könnyebb ilyen jellegű rendszerre vizsgálni. [6]

A modell megalkotása során az anyag – és energiamegmaradáson alapuló egyenletekre lehet támaszkodni. Ezek az úgynevezett Kirchoff-egyenletek: a csomóponti egyenlet és a hurok-egyenlet. Előbbi kimondja, hogy bármely csomópontba betorkolló és onnan távozó közeg tömegáramának előjelhelyes összege zérus.

$$\Delta \dot{m} = \sum \dot{m}_{i, be} - \sum \dot{m}_{i, ki} = 0 \quad (1)$$

A hurokegyenlet kimondja, hogy egy rendszer bármely pontjából kiindulva, és a rendszer mentén bármilyen úton haladva a kiindulási pontba történő visszajutáskor az egyes szakaszok nyomásvesztésének előjeles összege zérus.

A modell felállításához bizonyos elhanyagolásokra és feltételezésekre is szükség volt.

- a) $\Delta p_i = R_i \cdot \dot{m}_i^2$, ahol R_i a rendszer szakaszaiban állandó
- b) a rendszerben található közeg sűrűsége állandó
- c) az egyenletek időben állandó áramlásokat írnak le

Az 'a' jelű feltételezésből következik, hogy a rendszerbe épített elemek alakí és súrlódási ellenállástényezői a sebességtől függetlenek, illetve, hogy a rendszerben turbulens áramlás van. Ez utóbbi nem jelent különösebben nagy elhanyagolást, ugyanis az épületgépészeti gyakorlatban legtöbbször turbulens áramlás áll fenn, és csak elvétve lehet lamináris áramlással találkozni. Az állandónak feltételezett sűrűség következménye, hogy a hőmérsékletváltozást a csővezetéki rendszer teljes szakaszán elhanyagoljuk.

A megfelelő beszabályozásra szolgáló modell megalkotásánál az általánosan ismert egyenletből, a csőben áramló közeg nyomásvesztéséből indultak ki.

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right) \quad (2)$$

A kontinuitási tétel segítségével a térfogatáram kifejezhető a sebességből, majd a kapott térfogatáramot a sűrűséggel megszorozva megkapjuk a rendszerben áramló víz tömegáramát. Az így kapott egyenletet vizsgálva azt láthatjuk, hogy a tömegáramot leszámítva minden paraméter állandónak tekinthető, amit ki lehet fejezni egyetlen ismeretlennel, melynek neve legyen beszabályozási tényező.

$$B = \frac{1}{2A^2\rho} \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right) \quad (3)$$

A beszabályozási tényező teljes mértékben a modellt saját diplomamunkájában kidolgozó Csohány Kálmán ötlete. Ő volt az, aki felismerte, hogy a sok állandó ily módon kezelhető egyetlen tagként is. [3]

Így:

$$\Delta p = B \cdot \dot{m}^2 \quad (4)$$

A párhuzamos áramkörök I. alaptípusára igaz, hogy a rendszer egyes csővezetékeiben a nyomásveszteség (Δp) megegyezik, valamint teljesül a csomóponti törvény is, így igaz lesz, hogy a rendszer teljes tömegárama megegyezik az egyes szakaszokban áramló tömegáramok összegével. Így egy n számú vezetékből álló rendszerre igaz lesz, hogy

$$\dot{m}_r = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \quad (5)$$

Mivel a 4-es egyenlet igaz, így léteznie kell egy B_r beszabályozási tényezőnek, ami az egész rendszer tulajdonságát írja le.

$$\Delta p = B_r \cdot \dot{m}_r^2 \quad (6)$$

A 6-os egyenletből a tömegáram kifejezhető, majd az (5) egyenletet felhasználva igaz lesz a következő (7) összefüggés:

$$\frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{B_r}} = \frac{\sqrt{\Delta p_1}}{\sqrt{B_1}} + \frac{\sqrt{\Delta p_2}}{\sqrt{B_2}} + \dots + \frac{\sqrt{\Delta p_i}}{\sqrt{B_i}} + \dots + \frac{\sqrt{\Delta p_n}}{\sqrt{B_n}} \quad (7)$$

Mivel a nyomásveszteség minden szakaszon állandó, így a 7-es egyenlet az alábbi alakra egyszerűsödik.

$$\frac{1}{\sqrt{B_r}} = \frac{1}{\sqrt{B_1}} + \frac{1}{\sqrt{B_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{B_i}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{B_n}} \quad (8)$$

A 8-as egyenletből B_r kifejezhető és a tetszőleges számú szakasszal rendelkező rendszert leíró kifejezést zárt alakra hozva az alábbi összefüggésre jutunk:

$$B_r = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{B_i}}\right)^2} \quad (9)$$

Mivel a nyomásveszteségeket állandónak feltételeztük, igaz lesz a következő összefüggés is.

$$\dot{m}_r^2 \cdot B_r = \dot{m}_i^2 \cdot B_i \quad (10)$$

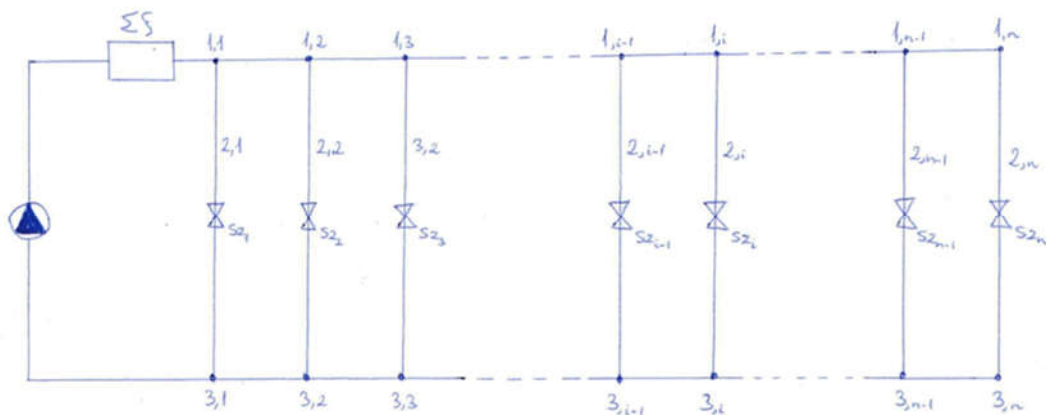
Ebből egy adott szakasz tömegárama már meghatározható:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_r \cdot \sqrt{\frac{B_r}{B_i}} \quad (11)$$

\dot{m}_i , azaz egy adott szakasz tömegáramának kiszámításához először meg kell határozni az egyes körök beszabályozási tényezőit, amik ismeretében 9-es egyenlettel számítható B_r , a rendszer eredő beszabályozási tényezője. \dot{m}_r a 6-os egyenlet megfelelő alakra hozásával meghatározható, így már minden tényező ismert, hogy a 11-es összefüggés segítségével a keresett tömegáramot megkaphassuk.

4.3. A matematikai modell valós rendszer esetén

Mint látható, a fenti összefüggések kiválóan működnek abban az esetben, ha a csőben lévő áramlás ugyanolyan nyomású térbe tér vissza, mint amilyenből indult. Valós épületgépészeti rendszerek esetén azonban az összekötő vezeték két oldalán a nyomások nem egyeznek meg, így az eddigi levezetés során tett megállapítások egy része nem lesz igaz. A modell további levezetéséhez vegyük alapul a 9. ábrán feltüntetett áramköri modellt. [9]



9. ábra – a valós áramköri modell

A modell nyomásviszonyaira igaz, hogy:

$$p_{1,1} - p_{3,1} = (p_{1,1} - p_{1,2}) + (p_{1,2} - p_{1,3}) + \dots + (p_{1,i-1} - p_{1,i}) + (p_{1,i} - p_{3,i}) + (p_{3,i} - p_{3,i-1}) + \dots + (p_{3,3} - p_{3,2}) + (p_{3,2} - p_{3,1}) \quad (12)$$

A modell tartalmaz egy szivattyút, ami a teljes rendszer keringetéséért felel, és egy alaki ellenállástényezőt, ami egy ellenállásba összesíti a rendszer azon szakaszait, amelyek a párhuzamos áramkörökön kívül futnak. Fontos megállapítás, hogy a levezetés során végig az 1-es

index az előremenő alapvezetékre, a 2-es az összekötő vezetékre, a 3-as pedig a visszatérő alapvezetékre utal. A második indexek rendre a különböző strangok sorszámát jelölik.

A statikus nyomáskülönbség az alábbi módon írható fel:

$$p_{1,1} - p_{3,1} = \frac{\rho}{2} v_{3,1}^2 - \frac{\rho}{2} v_{1,1}^2 + \Delta' p \quad (13)$$

ahol $\Delta' p$ tartalmaz minden alaki – és csősúrlódási ellenállást az 1,1 és 3,1 pontok között.

$$\Delta' p = \frac{\rho}{2} v_{1,1}^2 \xi_{1,1} + \frac{\rho}{2} v_{2,1}^2 \xi_{sz} + \frac{\rho}{2} v_{3,1}^2 \xi_{3,1} + \frac{\rho}{2} v_{2,1}^2 \frac{l_{2,1}}{d_{2,1}} \lambda_{2,1} \quad (14)$$

A modell szempontjából az alaki ellenállások közül az áramlást szétválasztó és az azt egyesítő T idomok, valamint az összekötő vezetéken található beszabályozó szelep tényezői a meghatározóak. Jól látható, hogy a 13-as egyenletben különböző sebességértékek is szerepelnek. A modell jó működésének érdekében olyan átalakításokra van szükség, hogy a sebességek helyett a szakaszokon megjelenő tömegáramok szerepeljenek a képletben oly módon, hogy az összekötő vezeték tömegárama ($\dot{m}_{2,1}$) kiemelhető legyen. Ehhez a különböző sebességeket a kontinuitási tétel segítségével kifejezzük a tömegáram és az áramlási keresztmetszet hányadosával, majd ahol ez a kiemeléshez szükséges, ott egyszerre szorzunk és osztunk is az összekötő vezeték tömegáramával.

$$v_{1,1} = \frac{\dot{m}_{1,1}}{\rho A_{1,1}} \cdot \frac{\dot{m}_{2,1}}{\dot{m}_{2,1}} \quad (15)$$

$$v_{2,1} = \frac{\dot{m}_{2,1}}{\rho A_{2,1}} \quad (16)$$

$$v_{3,1} = \frac{\dot{m}_{3,1}}{\rho A_{3,1}} \cdot \frac{\dot{m}_{2,1}}{\dot{m}_{2,1}} \quad (17)$$

A 15-17-es egyenleteket felhasználva az alábbi összefüggésre jutunk:

$$p_{1,1} - p_{3,1} = \dot{m}_{2,1}^2 \left[\frac{1}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_{3,1}^2}{\dot{m}_{2,1}^2} \frac{1}{A_{3,1}^2} - \frac{\dot{m}_{1,1}^2}{\dot{m}_{2,1}^2} \frac{1}{A_{1,1}^2} + \frac{\dot{m}_{1,1}^2}{\dot{m}_{2,1}^2} \frac{1}{A_{1,1}^2} \xi_{1,1} + \frac{1}{A_{2,1}^2} \xi_{sz} + \frac{\dot{m}_{3,1}^2}{\dot{m}_{2,1}^2} \frac{1}{A_{3,1}^2} \xi_{3,1} + \frac{1}{A_{2,1}^2} \frac{l_{2,1}}{d_{2,1}} \lambda_{2,1} \right) \right] \quad (18)$$

Ez írja le az 1,1 és 3,1 pontok közötti nyomásviszonyt oly módon, hogy az egyenlet a statikus nyomások különbségére lett rendezve. A zárójelben szereplő tagok balról jobbra haladva az alábbiakat fejezik ki: a 3,1 pont dinamikus nyomása, az 1,1 pont dinamikus nyomása, az 1,1

pontban található T idomon eső nyomásveszteség, az összekötő vezetéken található szelepen eső nyomásveszteség, a 3,1 pontban található T idomon eső nyomásveszteség és az összekötő vezetéken eső csősúrlódásból származó nyomásveszteség.

A 18-as egyenletet természetesen fel lehet írni tetszőleges számú összekötő vezetékre is, figyelve arra, hogy a modellben fontos ellenállások csak a megfelelő helyen szerepeljenek az összefüggésben.

$$\begin{aligned}
 p_{1,1} - p_{3,1} = \frac{\dot{m}_2 i^2}{2\rho} & \left[\sum_{i=2}^n \left(\frac{\dot{m}_1 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{1,i}^2} - \frac{\dot{m}_1 i_{-1}^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{1,i-1}^2} + \frac{\dot{m}_1 i_{-1}^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{1,i-1}^2} \xi_{1,i} \right. \right. \\
 & + \left. \frac{\dot{m}_1 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{1,i}^2} \frac{l_{1,i}}{d_{1,i}} \lambda_{1,i} \right) + \left(\frac{\dot{m}_3 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{3,i}^2} - \frac{\dot{m}_1 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{1,i}^2} + \frac{\dot{m}_1 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{1,i}^2} \xi_{1,i} \right. \\
 & + \left. \frac{1}{A_{2,i}^2} \xi_{sz,i} + \frac{\dot{m}_3 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{3,i}^2} \xi_{3,i} + \frac{1}{A_{2,i}^2} \frac{l_{2,i}}{d_{2,i}} \lambda_{2,i} \right) \\
 & + \sum_{i=2}^n \left(\frac{\dot{m}_3 i_{-1}^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{3,i-1}^2} - \frac{\dot{m}_3 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{3,i}^2} + \frac{\dot{m}_3 i_{-1}^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{3,i-1}^2} \xi_{3,i} \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\dot{m}_3 i^2}{\dot{m}_2 i^2} \frac{1}{A_{3,i}^2} \frac{l_{3,i}}{d_{3,i}} \lambda_{3,i} \right) \right] \quad (19)
 \end{aligned}$$

A 19-es egyenletben különböző színekkel jelzett tagok írják le az előremenő alapvezetéken, az összekötő vezetéken és a visszatérő alapvezetéken eső veszteségeket.

- piros szín: előremenő alapvezetékre jutó veszteségek
- zöld szín: összekötő vezetékre jutó veszteségek
- kék szín: visszatérő alapvezetékre jutó veszteségek

Ha a három tag mindegyikét beszorozzuk a 19-es képlet elején található $\frac{1}{2\rho}$ -val, akkor kapunk három K-val jelölt tényezőt, ami az egyes csővezeték típusok összes ellenállása.

Innen:

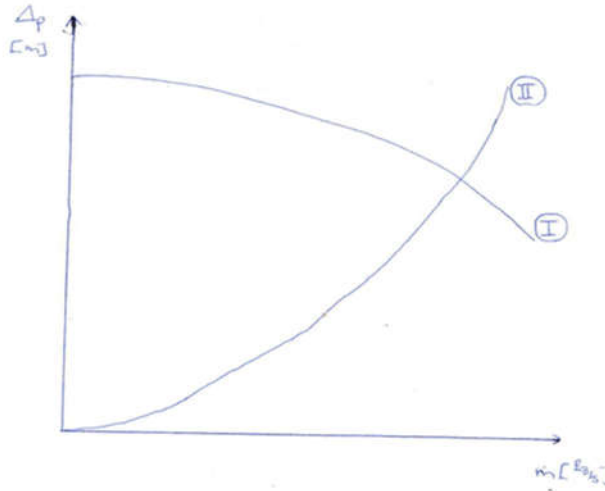
$$B'_i = K_{1,i} + K_{2,i} + K_{3,i} \quad (20)$$

A 20-as képletből már könnyedén számítható a valós rendszer eredő beszabályozási tényezője is a korábban megismerttel teljesen analóg módon.

$$\dot{m}_{2,i} = \dot{m}_{1,1} \cdot \sqrt{\frac{B'_r}{B'_i}} \quad (21)$$

4.4. A szivattyú munkapont-változásának szerepe

Ha a rendszer valamely pontján megváltozik az ellenállás, az értelemszerűen együtt jár az egész rendszer eredő ellenállásának a változásával is. Ennek hatására változik a szivattyú által szállított tömegáram is, amit a kellő pontosság érdekében figyelembe kell venni. A szivattyú



10.ábra – szivattyú (I) és ellenállás (II) jelleggörbéje

munkapontját egy Δp - \dot{m} diagramon az eredő ellenállást leíró görbének és a szivattyú jelleggörbéjének metszéspontja adja ki. Előbbi egy origóból induló másodfokú parabolával írható le, míg a szivattyú jelleggörbéjének az épületgépészetben használt tartományát a derékszögű koordinátarendszer első síknegyedébe eső görbe adja, ami szintén egy másodfokú parabolával közelíthető.

$$\Delta p_1 = r\dot{m}^2 + s\dot{m} + t \quad (22)$$

A 22-es egyenlet írja le a szivattyú jelleggörbéjét, aminek ha ismerjük három pontját, akkor egy háromismeretlenes egyenletrendszer segítségével az egyes paraméterek meghatározhatóak.

$$r = \frac{(\dot{m}_2 - \dot{m}_1)(\Delta p_3 - \Delta p_1) + (\Delta p_2 - \Delta p_1) \cdot (\dot{m}_1 - \dot{m}_3)}{(\dot{m}_2 - \dot{m}_1) \cdot (\dot{m}_3^2 - \dot{m}_1^2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_3) \cdot (\dot{m}_2^2 - \dot{m}_1^2)} \quad (23)$$

$$s = \frac{\Delta p_2 - \Delta p_1 - r(\dot{m}_2^2 - \dot{m}_1^2)}{\dot{m}_2 - \dot{m}_1} \quad (24)$$

$$t = \Delta p_1 - r\dot{m}_1^2 - s\dot{m}_1 \quad (25)$$

Ahhoz, hogy a tömegáram továbbra is számítható legyen, ismerni kell a 9.ábrán feltüntetett ellenállást is. Ennek segítségével már a rendszer teljes ellenállása ismertté válik a szivattyú nyomócsonkjától a szívócsonkjáig.

$$\Sigma \Delta p = \frac{1}{2\rho A_{11}^2} \dot{m}_{11}^2 \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right) \quad (26)$$

Mielőtt a teljes csőhálózat ellenállását egységesen lehetne kezelni, a 26-os képletet olyan alakra szükséges átírni, hogy azt a B_r beszabályozási tényezőhöz hozzá lehessen adni. Az így kapott 'B' lesz az teljes hálózat eredő beszabályozási tényezője.

Ismerve B-t, a rendszer ellenállását jelképező másodfokú parabola egyenlete definiálható:

$$\Delta p_{II} = \frac{1}{2\rho A_{11}^2} B \dot{m}^2 \quad (27)$$

A szivattyú karakterisztikáját is figyelembe vevő \dot{m}_{11} tömegáram meghatározásához felhasználjuk, hogy a 22-es és 27-es egyenletben szereplő nyomásveszteségek megegyeznek, ugyanis a szivattyú munkapontját a két görbe metszéspontja jelöli ki. [9]

Így:

$$r\dot{m}^2 + s\dot{m} + t = \frac{1}{2\rho A_{11}^2} B \dot{m}^2 \quad (28)$$

Az egyenletet \dot{m} -ra rendezve egy másodfokú egyenletre jutunk, aminek megoldásával megkapjuk a keresett tömegáramot.

$$\dot{m}_{11} = \frac{-s \pm \sqrt{s^2 - 4t \left(r - \frac{1}{2\rho A_{11}^2} B \right)}}{2 \left(r - \frac{1}{2\rho A_{11}^2} B \right)} \quad (29)$$

A maximálisan lehetséges két gyök közül azonban csak az egyik megfelelő, így azt kaptuk, hogy a rendszerben keringtetett \dot{m}_{11} tömegáram nagysága:

$$\dot{m}_{11} = \frac{-s - \sqrt{s^2 - 4t \left(r - \frac{1}{2\rho A_{11}^2} B \right)}}{2 \left(r - \frac{1}{2\rho A_{11}^2} B \right)} \quad (30)$$

Ezzel figyelembe vettük a szivattyú által szállított tömegáram változását is, így ha a 30-as képlettel kapott \dot{m}_{11} -el számítjuk ki a 21-es egyenlet keresett tömegáramát, akkor a gyakorlatnak megfelelő pontosságú értéket kapunk az összekötő vezetékben áramló tömegáram nagyságára.

4.5. A számítógépes program

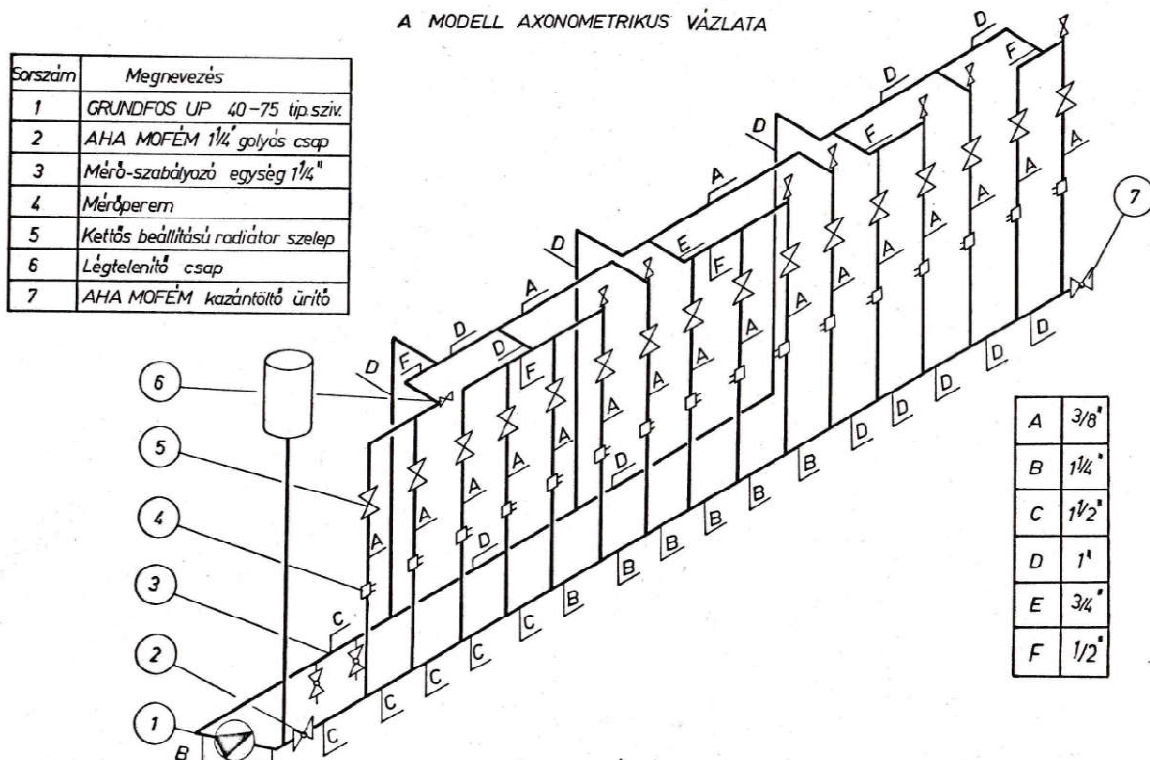
Néhány összekötő vezetéknél többel rendelkező rendszer esetében már feltétlenül szükség volt egy számítógépes programra, ugyanis a tömegáramok csakis iterációval számíthatóak, amit papíron végigszámolni lehetetlen vállalkozás lett volna. Egy több tucat összekötő vezetékből álló hálózat esetén még számítógéppel is nem ritkán 5-10 órába telt mire a program eredményeket szolgáltatott, ami még így is lényegesen gyorsabb volt a kézi számításnál. [12] A túlságosan hosszú programfutást úgy lehetett elkerülni, hogy sugaras rendszerben építették ki a hálózatot egy-egy elzáró szeleppel minden gerincvezetéken, és a program futtatása során mindig csak az egyik elzárószelepet nyitották ki. Az így kialakított sugaras alapvezetéki hálózatok osztották szét, illetve gyűjtötték össze az összekötő vezetékek tömegáramát. Az iterációra azért van szükség, mert bár az $\dot{m}_{2,i}$ -t a 21-es egyenlet segítségével ki lehet számolni, ehhez szükség van a beszabályozási tényezőkre is. Ezen tényezők meghatározásához a 19-es és 20-as képlet összefüggéseit lehet használni, amiben már szerepel a $\dot{m}_{2,i}$ tömegáram. Az iterációt addig kell folytatni, amíg egymást követő két $\dot{m}_{2,i}$ érték nincsen az elvárt hibahatáron belül.

A kidolgozott matematikai modell tehát képes volt arra, hogy bármely szelep tetszőleges állítása esetén kiszámítsa minden strang tömegáramát. Mindez borzasztóan bonyolult volt, így a gyakorlatban is használható program számítógépes algoritmusába végül nem ezt, hanem egy már évek óta használatban lévő modellt tettek be. Az Almásy-Budavári-Vajna számítási módszer nem beszabályozásra készítették, hanem a vízművek használta arra a célra, hogy egy bonyolult hálózat egyes részeiben megjelenő tömegáramot kiszámítsák. Ez a módszer néhány apró átdolgozás után (pl.: a szivattyú jelleggörbéjének figyelembe vétele és a sebességi hatvány kitevőjének 1,85-ra változtatása) ugyanazt tudta, mint a szakdolgozatban részletezett modell, csak sokkal rövidebb futásidővel. [3]

Az elkészült program az országban egyetlen helyre, a típustervező intézet nagy számítógépére lett telepítve, így minden egyes épület építésénél a programot az intézetben futtatták le. Az algoritmus csakis akkor tudta a beszabályozási programot kiadni, ha a tervező minden kiindulási paramétert a megfelelő formában adott meg. Az elkészült típusvégeredményeket küldték el a kivitelezőnek, aki az összeállított dokumentáció alapján már el tudta végezni az épület beszabályozását. [3]

5. Ellenőrző mérések és gyakorlati hatások

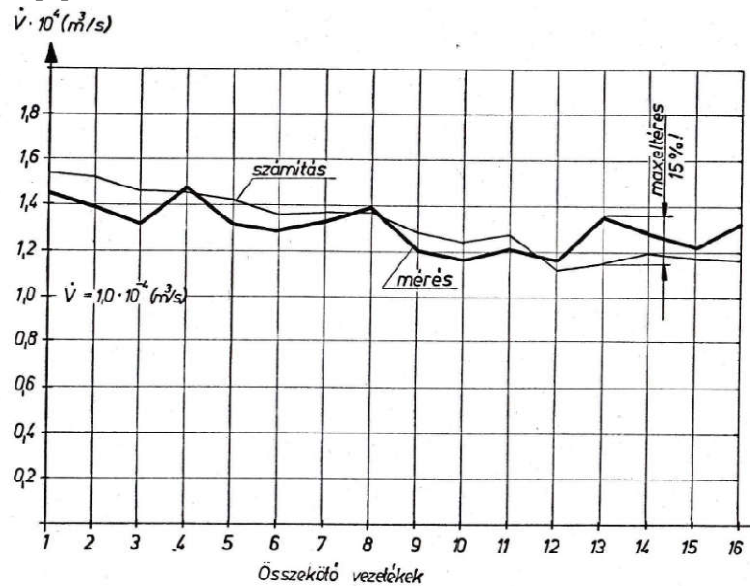
A modell kidolgozását és a számítógépes program megírását követően szükség volt a számított eredmények méréssel történő ellenőrzésére is. [2] Ehhez a Csőszer laborjában kiépítésre került egy 16 összekötő vezetékből álló kísérleti rendszer (11. ábra), ami egy valóságos rendszer minden elemét tartalmazta. Ez egy olyan modell volt, ami mindenben követte a valóságos épületek csőhálózatának kialakítását. Ez azt jelentette, hogy kevesebb felszálló elosztóvezeték (11. ábrán D-vel jelölt függőleges csövek) építettek be, mint ahány összekötő vezeték a rendszer tartalmaz, és minden stranghoz különböző kialakítású csővezetékrendszeren jutott el a víz. [3] A valós rendszertől csupán a nyomáskülönbség alapján dolgozó mérő-szabályozó alkalmazásában tértek el, ezek helyett radiátorszelepeket és mérőperemeket építettek be. Erre azért volt szükség, hogy ezekkel a strangokban áramló víz tömegáramát folyamatosan figyelemmel lehessen kísérni. A különböző ellenőrző mérések szükségesek voltak, hogy a szakma minden szereplője belássa, a kidolgozott módszer valójában működik.



11. ábra – az ellenőrző mérések elvégzésére szolgáló hálózat axonometrikus vázlata

A gyakorlat szempontjából lényeges volt, hogy a számítási módszer teljesen általános, az bármilyen hurkolt rendszerre alkalmazható. Fontos, hogy a számítást csakis a hidraulikai méretezést követően lehetett elvégezni, ugyanis a program megkövetelte a hidraulikai tervezés alapadatait és eredményeit.

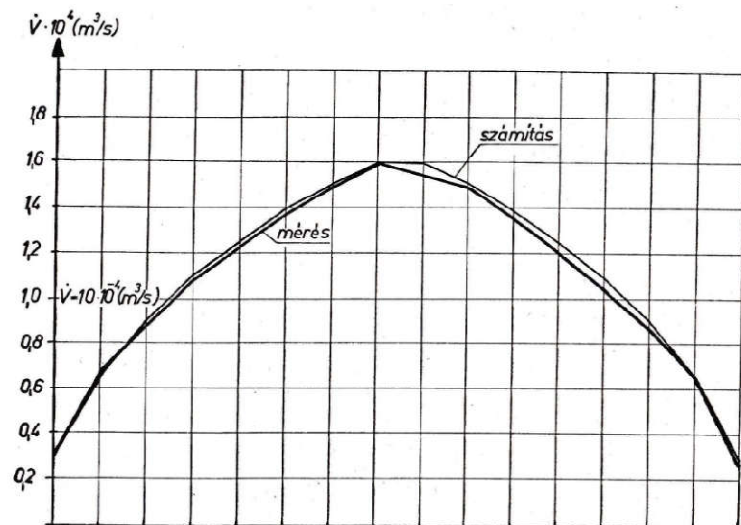
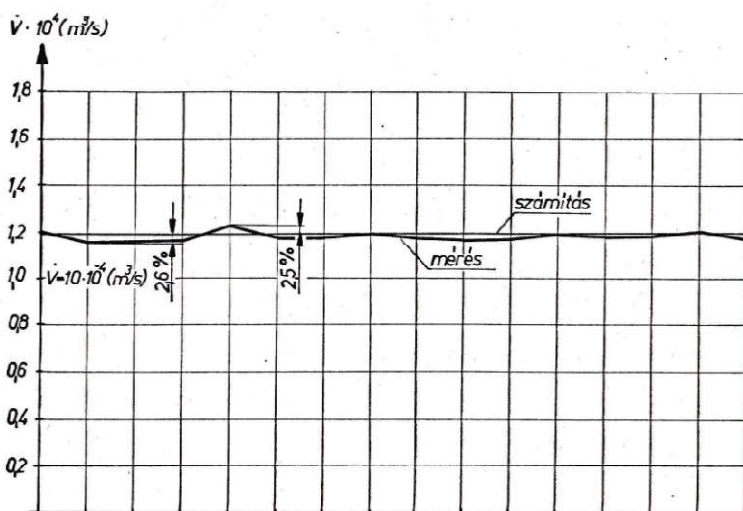
Először teljesen nyitott szelepállásnál ellenőrizték a számításokat, aminek eredményeit a 12. ábra szemlélteti. [2]



12. ábra – mérés teljesen nyitott szelepállásnál

Tisztán látszik, hogy a mért és számított értékek bőven az elvárt hibahatáron kívül mozogtak. Elsőre talán érdekesnek tűnhet, hogy ilyen komoly alapállapotbéli hibák ellenére egy adott állapotra beállított rendszer esetén minden összekötő vezetékben a kívánt mennyiségű víz áramlott.

Az alapállapotot követő mérések során a kialakított modell szelepein különböző fojtásokat állítottak be és összehasonlították a számítógépes program által kiszámított tömegáramokat a valós rendszeren mért tömegáramokkal. [2][5] A 13. ábra két ilyen állapot eredményeit mutatja be. Az ábra vízszintes tengelyén az összekötő vezeték sorszáma, a függőleges tengelyen

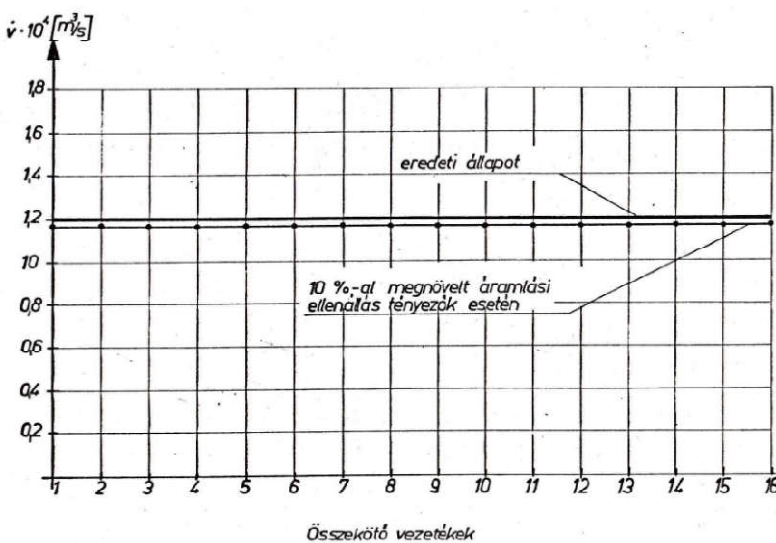


13. ábra – beállított szelepállásoknál mért tömegáramok

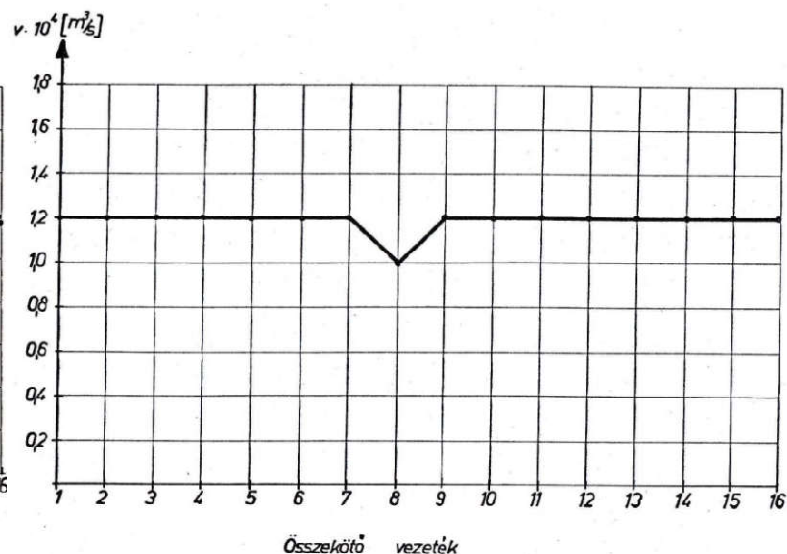
pedig a strangokon mért tömegáramok szerepelnek. Az ellenőrző mérések során kiderült, hogy a rendszer bármilyen állapotban kellő pontossággal megközelíti a számítás során kapott tömegáramokat. Amíg a bal oldali diagramon feltüntetett mérés során mind a 16 összekötő vezetéken azonos tömegáramokat szerettek volna elérni, addig a jobb oldali diagramon bemutatott állapotban azt vizsgálták, hogy milyen módon tér el a számított és a mért tömegáram abban az esetben, ha a szelepek fojtásának beállításakor az egyes összekötő vezetéseken átáramló víz egy parabolagörbét ad ki a kiértékelésnél.

Az alapállapotban elvégzett mérések mindegyike azt az eredményt adta, hogy egyes leszállókban a mért tömegáram akár 15 %-kal is eltért a számított tömegáramtól. A szelepek fojtását követően az az eredmény született, hogy bármilyen beállított állapot esetén a mért és számított értékek csupán néhány százalékban tértek el egymástól. Ennek oka, hogy a számítás során kapott tömegáramot a szelep segítségével állították be a meghatározott értékre. Amíg nyitott szelepállások esetében a számítás a rendszer elemek akkoriban elfogadott ellenállástényezői alapján számította ki a tömegáramot, addig a beszabályozás során már a számított tömegáramot kellett a szelep segítségével beállítani, így a csővezeték által okozott hibákat a szelepállítással korrigálni lehetett. Emellett természetesen az épület valós állapota is eltér a tervezett állapottól annak építészeti sajátosságainak eredményeképpen, aminek kedvezőtlen hatásait a számítás szintén korrigálni tudja. Elmondható tehát, hogy a szelepek beállításával a rendszer hidraulikailag olyan állapotba hozható, ahogyan azt a tervező elképzelte.

Az ellenőrző mérések során azt is megvizsgálták, hogy elképzelt egyedi hibák során a rendszer hogyan fog működni. Ennek során az első esetben az optimálishoz képest 10%-kal növelték minden szabályozott és szabályozatlan csőszakasz ellenállás tényezőjét (14.ábra). A

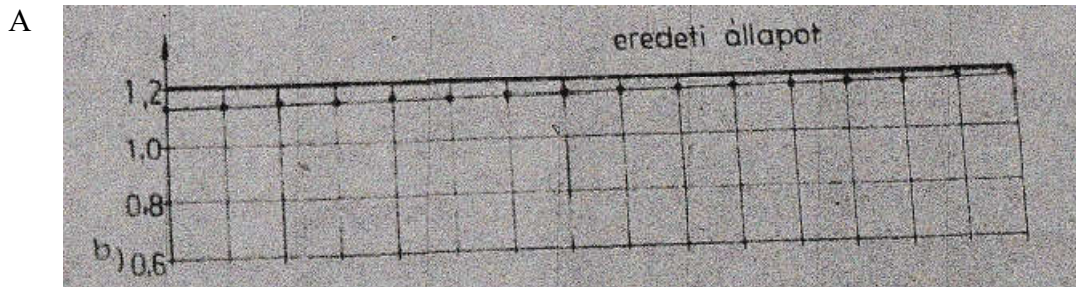


14.ábra – teljes rendszer ellenállástényezőjének 10%-os növelése



15.ábra – egy összekötő vezeték ellenállásának növelése

második esetben csakis a szabályozó szelepek ellenállását növelték 10%-kal (16.ábra). Azt is megvizsgálták, hogy egy összekötő vezeték szelepeinek nagymértékű ellenállásváltoztatása (15.ábra) esetén milyen tömegáramok alakulnak ki a strangokon. [2][5]



16.ábra – minden összekötő vezeték ellenállástényezőjének 10%-os növelése

14.ábrán feltüntetett állapotban az egyenletesség gyakorlatilag nem változik, csakis a tömegáramok értéke csökken valamelyest, ami teljes mértékben előre várható, ha egy rendszer ellenállása megnő. A 16.ábrán az 1,2-es értéknél konstans vonal mutatja a szelepek eredeti besabályozásával kapott tömegáramot, míg a felette található vastagabb egyenes jelenti az itt vizsgált típushiba megvalósulást követő állapotot. Ebben az esetben a korábban tapasztalt egyenletesség már nem áll fent. Ahogyan azt a 2.2-es pontban már részleteztem, az összekötő vezetékek megnövekedett ellenállása esetén a szivattyúhoz közeli strangokon mindig több víz fog áramlani mint a rendszer végén levő leszállókon. Ez a jelenség jelent meg ennél az ellenőrző mérésnél. Amikor csak egy szelep ellenállástényezőjét növelték annak másfélszeresére, akkor az adott összekötő vezeték tömegárama a várakozásoknak megfelelően csökkent, azonban mindez a többi leszállón olyan csekély változásokat okozott, amit a mérés nem mutatott ki. A rendszer jó működése szempontjából kiemelkedően fontos volt, hogy következetes tervezői hiba (például a valóságtól eltérő csősúrlódási tényező (λ) használata) a tömegáram arányokat számottevően ne befolyásolja. Komoly, de egyszeri tervezői vagy kivitelezői hiba esetén pedig a tömegáram csakis abban az összekötő vezetékben változzon jelentősen, amelyikben a hibát vétették. A szakdolgozatban bemutatott legutolsó három mérés szemléltette, hogy a megvalósítás során elkövetett bizonyos hibák valóban nem teszik tönkre az egész besabályozást. A módszer még így is kellő pontossággal produkálja azokat a tömegáramokat, amikkel a házigyári lakóépületek lakásai minden igényt kielégítően kifűthetőek.

5.1. Gyakorlati felhasználás

Miután bebizonyosodott, hogy a modell a valóságnak megfelel minden újépítésű lakóépület fűtési rendszerének beszabályozásán kötelező volt alkalmazni. A tervezők a beszabályozáshoz szükséges információkat az 1980 áprilisában, a Tervezésfejlesztési és Típustervező Intézet által kiadott tervezési segédletben találhatták meg. [12] Amennyiben egy kivitelező nem tudta hiba nélkül megoldani a beszabályozást, úgy a Csőszer emberei mentek terepre és tanították a szakma résztvevőit. [3]

Mint azt láttuk, a beszabályozási módszer kiválóan működött, ám mire használatát kötelezővé tették kiderült, hogy a hőmérsékleti anomáliák legfőbb oka nem a fűtési rendszer beszabályozatlansága volt. Kiderült, hogy a hőveszteségszámítás kiindulási paraméterei nem megfelelőek és a helységek kiszámított hőmérlege nem fedti le a valóságot. Ilyen volt például a lakás erkélyénél lévő fal hőátbocsátási tényezőjének anomáliája. A vizsgált lakásokon ezek az úgynevezett szakipari falak úgy voltak kialakítva, hogy két azbesztlemez közé gyűrtek be ásványgyapot hőszigetelést. Ez a fal és a nyílászárók rossz légzárása szabad utat engedett az áramló meleg levegőnek, ami a lépcsőházban a kéményeffektus elve szerint fölfelé áramlott. Az épületek felső szintjein ez a meleg a gyenge hőátbocsátási tényezőjű erkélyfalon könnyedén átjutott, így gyakorlatilag az alsó szintek fűtötték az épület tetején lévő lakásokat. Mikor erre fény derült, előírták a filtrációs hőveszteségszámítás átdolgozását, amivel Zöld András professzort, a BME II. Épületgépészeti tanszék munkatársát bízták meg. [3]

6. Összegzés

Mennyire volt hasznos a kidolgozott matematikai modell? Egyfelől mindenképpen hasznosnak lehet nevezni, hisz mint láttuk hosszú idő után sikerült vele megoldani az épületgépész szakma egyik legnagyobb kihívását. Másrészt viszont el kell mondani, hogy a modell nem oldotta meg azokat a problémákat, amik szükségessé tették a kidolgozását. Azt sem szabad elfelejteni, hogy egy évtizeddel később előálltak annak a beszabályozási módszernek az alapjaival, amit kisebb változtatásokkal ugyan, de mind a mai napig alkalmaznak, ily módon pedig a szakdolgozatban bemutatott eljárásra nem volt többé szükség. Ezek azonban semmit sem vonnak le a modell kidolgozójának érdemeiből, ugyanis az általa kitalált rendszer minden igényt kielégítően működött és az eljárástól független körülmények eredménye, hogy egy minden részletre kiterjedő és jól működő modellnek nem volt jelentős pozitív hatása.

A szakdolgozat abból a célból készült, hogy bemutassa a hazai épületgépészet egy saját találmányát, amit valószínűleg sehol máshol a világban nem használtak. Részletes bemutatásra kerül a beszabályozatlanság számos negatív hatása és a probléma megoldásának szánt beszabályozási eljárás elméleti levezetése.

Az írás emléket állít azok előtt, akik bármilyen módon részt vettek a munkában és ezáltal megpróbálták elősegíteni sok ezer lakos életkörülményeinek javítását. Mivel mindezidáig a témáról nem készült egyetlen összefoglaló dokumentáció sem, így remélem, hogy ez az írás kellő mélységben összegzi a beszabályozási eljárást és annak körülményeit. Szeretném, ha hozzám hasonlóan más fiatal mérnökök is találkozoznának valamilyen formában a régi idők épületgépészeti megoldásaival. Bár a mai világban ezeknek már viszonylag kevés gyakorlati haszna van, hozzám hasonlóan másnak is segíthet az alapok kellő mélységű megértésében, ami nélkül a napjainkban használatos megoldásokat is sokkal nehezebben lehet megérteni.

7. Summary

How useful was the developed mathematical model? On the one hand, it can definitely be considered useful because, as we have seen, it helped solve one of the major challenges in the field of building engineering. On the other hand, it must be noted that the model didn't solve the problems that necessitated its development. It is also important to remember that a decade later, the basics of a control method developed, which, with minor modifications, are still used to this day, making the procedure presented in the thesis unnecessary. However, this doesn't detract from the merits of the model's creator because the system he designed worked perfectly and it wasn't the model's fault, that a well-detailed and functioning model had no significant positive impact.

The thesis was prepared with the aim of presenting a unique invention of domestic building engineering, which probably hadn't used anywhere else in the world. My writing provides a detailed presentation of the various negative effects of lack of regulation and the theoretical derivation of the regulation procedure intended to solve the problem.

The writing pays tribute to those who participated in the work and therefore tried to improve the living conditions of thousands of residents. Since there hasn't been any documentation that summarise the topic, I hope that this thesis sufficiently summarizes the regulation procedure and its circumstances. I would like other young engineers to encounter the solutions in building engineering from earlier times in some form, just like I did. Although in today's world, they may have relatively little practical use, a complete understanding of the fundamentals can help others understand the solutions of nowadays' problems.

8. Irodalomjegyzék

- [1] Belimo felkészülési mérőssor - épületgépészeti mérések tárgy
- [2] Csőszeripari vállalat Műszaki Fejlesztési osztály: A fűtési rendszerek besabályozási módszere (tanulmány)
- [3] Csohány Kálmán interjú
- [4] Dr. Molnár Zoltán, Csoknyai István, Gelencsér Ferenc: Átfolyó egycsöves melegvíz fűtőberendezés besabályozásának lehetőségei (cikk az épületgépészeti folyóirat 1976-os számából)
- [5] Talpag József: Házgyári lakóépületek fűtési rendszereinek hidraulikai besabályozási módszere (cikk az épületgépészeti folyóirat 1980/3. számából)
- [6] Csohány Kálmán: Párhuzamos folyadékáramkörök besabályozása (a szerző 1978-ban készített diplomamunkája)
- [7] Bokor Balázs: Szivattyús fűtések 1 előadása
- [8] Antal Péter, Pantócsik Jenő: A TRT és a TRT-T fűtési rendszer (cikk az épületgépészeti folyóirat 1984-es számából)
- [9] Csohány Kálmán: Párhuzamos folyadék áramkörök besabályozása (cikk az épületgépészeti folyóirat 1979/5. számából)
- [10] Dr. Vajna Zoltán, Csohány Kálmán: Épületgépészeti rendszerek hurkolt áramköreinek besabályozása (cikk az épületgépészeti folyóirat 1982-es számából)
- [11] <https://docplayer.hu/95827-Tichelmann-rendszeru-csohalozatok-hidraulikaja.html>
- [12] TS-G 76 – átkötőszakaszos egycsöves fűtés