

# A folyamatirányítás eszközei

## Beavatkozó szervek – 4.

Dr. Telkes Zoltán

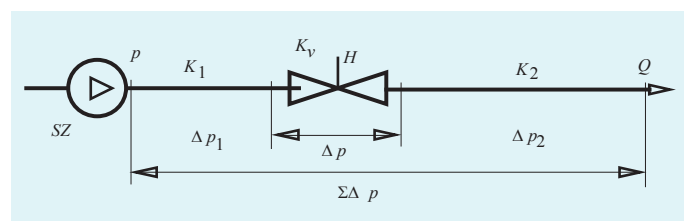
A folyamatirányítás eszközeit bemutató cikksorozat befejező részében a beavatkozó szervek ismertetésére kerül sor. A részletesebb vizsgálatot a szelepek igénylik. Emiatt az alkalmazástechnikai szempontok összefoglalása előtt szükségesnek látszott egy áramlástani összefoglaló, valamint az alapfogalmak definiálása. Az áramlási viszonyok bonyolultsága miatt a pontos és gyors szelepméretezés elképzelhetetlen a bevált számítógépes programrendszerek felhasználása nélkül.

### A szelep elhelyezkedése miatt alkalmazott korrekció

A szelep elhelyezkedése a csővezetékben hatással van a szelepre eső nyomáskülönbségre. Ha a szelep előtt vagy mögött hosszú csőszakasz van, azon nyomásesés jön létre, és a szelepen a közegáram függvényében változik a nyomáskülönbség. A nyomáskülönbség „vesztése” miatt az ilyen szelep kevesebb anyagot enged át, mintha az állandó nyomáskülönbség megmaradt volna. Az elhelyezkedés jellemzésére a 1. ábra szolgál.

Ebben az esetben a számítási eljárás alapja az, hogy a szeleptényezőhöz hasonlóan a szeleppel azonos közegáramú két csőszakaszra (a szivattyúoldalinál pl. a szivattyú belső nyomásesését is beleértve) külön csőtényezőt vezetnek be ( $K_1, K_2$ ).

általában ma még nem adják meg).  $F_p$ -vel jelölik a korrekciós tényezőt (ha ismert a  $d$  átmérőjű szelep veszteségi tényezője, akkor azzal megadva), amely kifejezi a csővezeték áramlásmódosító hatásából adódó korrekciót. A korrekciós tényezők közül ez az *alaktényező*.



1. ábra Szelep elhelyezkedése csővezetékben. Az állandó  $p$  nyomást pl. szivattyú állítja elő

$$Q = K_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_r}{\rho_r}} \quad Q = K_1 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{1r}}{\rho_r}} \quad Q = K_2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{2r}}{\rho_r}}$$

A továbbiakban felhasználják a veszteséges áramlásra vonatkozó Bernoulli-egyenletet, amiben  $\zeta$  a cső hidraulikus ellenállását kifejező veszteségi tényező. Ezzel kifejezve a tényező mindhárom szakaszra meghatározható:

$$\sum \Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \cdot \left( \sum_i \xi_i + \sum_k \xi_k \right)$$

$$Q = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot v_1 = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sum \Delta p}{\rho \cdot \left( \sum_i \xi_i + \sum_k \xi_k \right)}}$$

$$K_v = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\xi_v}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho_0}} = \frac{D^2}{\sqrt{\xi_v}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{8}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho_0}}$$

$$K_1 = \frac{D^2}{\sqrt{\xi_1}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{8}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho_0}} \quad K_2 = \frac{D^2}{\sqrt{\xi_2}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{8}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho_0}}$$

A térfogatáram a teljes szakaszon a csőszakaszok  $\zeta$  veszteségi tényezőivel kifejezhető (bár magára a szelepre  $\zeta_v$ -t a gyártók

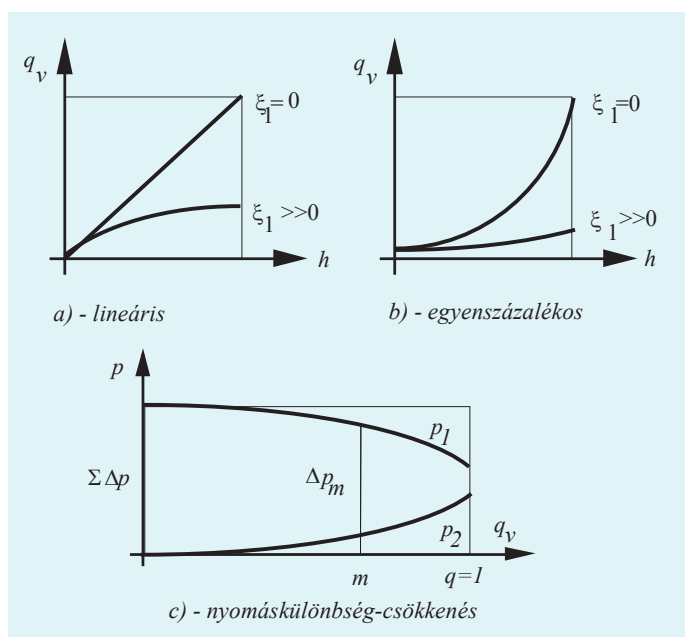
Az ilyen elhelyezkedésű szelepek eredeti karakterisztikája az áramlással csökkenő nyomáskülönbség következtében torzul, az eredetileg lineáris karakterisztika hozzávetőlegesen négyzetgyökössé (2.a ábra), az egyenszázalékos pedig a lineárishoz közelítővé válik (2.b ábra). Az ábrák egyben arra is magyarázatot adnak, hogy mi az oka az egyenszázalékos karakterisztika alkalmazásának. Szabályozástechnikailag ugyanis a  $q=f(h)$  függvény lineáris menete (állandó átviteli tényezője) lenne a legkedvezőbb. Abban az esetben azonban, amikor a csőszakasz torzító hatást fejt ki, az eredetileg exponenciális karakterisztika válik közel lineárisná, ekkor tehát ezt célszerűbb alkalmazni.

$$Q = F_p K_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_r}{\rho_r}}$$

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K_v^2}{D^4 \cdot \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\Delta p_0}{\rho_0}} \xi_1 + \frac{K_v^2}{D^4 \cdot \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\Delta p_0}{\rho_0}} \xi_2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{d}{D} \right)^4 \cdot \left( \frac{\xi_1}{\xi_v} + \frac{\xi_2}{\xi_v} \right)}}$$

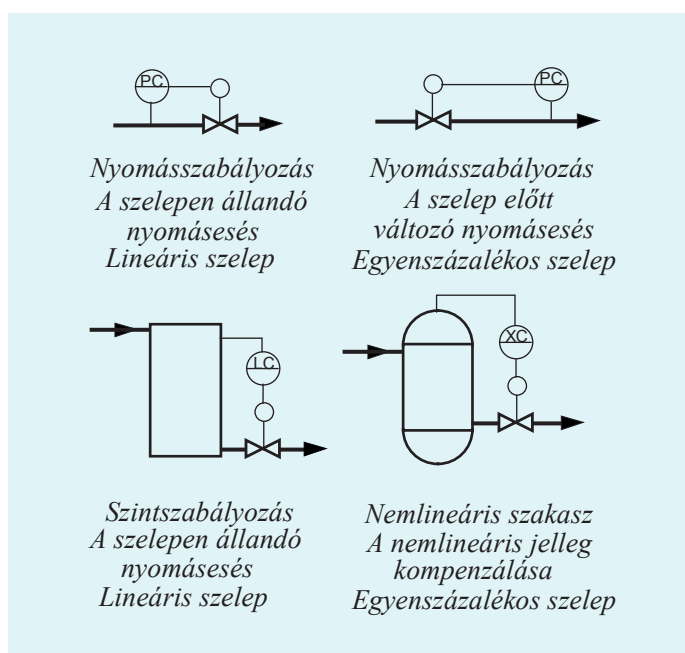
A szelep előtti és utáni csőszakaszok hatására a térfogatáram függvényében a  $p_1$  és  $p_2$  nyomás változása a 2.c ábrán látható. Megállapítható, hogy az áramlásmentes esetből kiindulva (ekkor  $\Delta p = \Sigma \Delta p$ ) a nyomáskülönbség csökken és a teljes nyitási pontjában

(a maximális tömegáramnál) a legkisebb (helytelen méretezésnél zérus), ekkor a két görbe találkozik, és a szelep rövidzárba kerül. A szelep *optimális méretezésének* ez egy jelentős szempontja. Részletes vizsgálódás alapján megállapítható, hogy a névleges térfogatáram által meghatározott  $m$  munkapontban a szelepre jutó  $\Delta p_m$  nyomáskülönbségnek nagyobbak (2-4-szeresnek) kell lenni, mint az előtte és a mögötte levő csőszakaszon létrejövő nyomásesés összege. Mivel a közegáram átáramoltatni kívánt *értéke adott*, és ez meghatározza a csővezeték és a szelep méretét is, ezt a követelményt gyakran csak az áramlást előállító berendezés (szivattyú) kimeneti nyomásának megnövelésével lehet teljesíteni. Más megfogalmazásban a csővezetéken szelep nélkül elérhető térfogatáramnak, a „rövidzárási áramnak” csak egy hányada (fele, negyede) szabályozható szelep közbeiktatásával. Erre az eljárásra az elmúlt időszakban „ököl szabály” is kialakult. Esze-



2. ábra A szelepkarakteristikák torzulása és a csővezeték nyomáscsökkentő hatása

3. ábra Alkalmazási példák lineáris és egyenszázalékos szelepre, ha a szelep után atmoszférikus nyomás van



rint a szelepen eső  $\Delta p_m$  nyomáskülönbségnek a szelep névleges  $q_n$  térfogatáramánál a teljes nyomásesés 50%-át, maximális áramnál ( $Q_{max}, q=1$ ) a teljes nyomásesés 30%-át kell elérnie.

A 3. ábrán néhány olyan szabályozási kör látható, amelyekben a szelep elhelyezkedése meghatározza a karakterisztika jellegét.

**A Reynolds-szám és a viszkozitás figyelembevételére alkalmazott korrekció**

A szelepen való áramlás méretezési eljárásai a *Bernoulli*-egyenlet alapján turbulens áramlásra vonatkoznak. Ha azonban az áramlás laminárisra változik – pl. kis nyomáskülönbség, nagy viszkozitás, kis szeleptényező miatt –, akkor az átfolyás megváltozik. Ezt illusztrálja a 4. ábrán látható közismert áramlástani jelleggörbe, ami a kör keresztmetszetű csővezeték  $\lambda$  ellenállástényezőjét mutatja be mint a *Reynolds*-számtól függő értéket, ami a  $\zeta$  veszteségi tényezőt határozza meg ( $\zeta = \lambda l / d$ ). Jól látható a  $Re=2300$  körüli minőségi változás, a lamináris tartományból a turbulensbe való átlépés jellege.

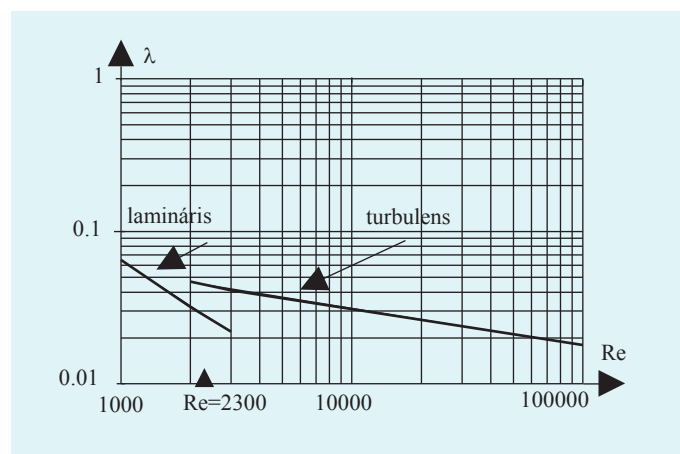
A *Reynolds*-szám hatását a szelep kiválasztására az  $F_R$  szorzótényezővel veszik figyelembe, ami a már említett  $F$  tényezőnek komponense.

**Szelepméretezés számítógépes programmal**

Az első táblázat egyértelművé teszi, hogy hagyományos számítási eljárások a megfelelő szelep kiválasztását igen nehézkesé teszik. Ezért számítógépes méretezéseket fejlesztettek ki. A számítógépes méretező programok igen elterjedtek és a nemzetközi szabványajánlásokon alapulnak. Alkalmazásuk lehetőséget ad a hibamentes, dokumentált eljárás mellett egy probléma többféle megoldásának vizsgálatára és a valóban optimális megoldás kialakítására.

A példaként itt részletezett, több évtizedes fejlesztésű *Conval*<sup>1</sup>-program a méretezést a közegek teljes választékára végzi el. A kiválasztáshoz szükségesek az áramlási, nyomás- és anyagadatok, valamint a javasolt karakterisztikajelleg megadása (továbbá még néhány szükséges adat). Ezek alapján a program az adott esetre érvényes képletek felhasználásával megadja a megfelelő szeleptényezőt. Az adatbázisban található függvények alapján behelyettesíti a konkrét szelepre vonatkozó adatokat (pl.  $F_v, F_D$ ). Sok további kiegészítő szolgáltatást nyújt: szelepszaj-és kavitációs számítás, a kavitáció elkerülése érdekében sorba kapcsolt fojtóelem méretezése és hatása, a szelep előtti konfúzor és az utána következő

4. ábra Lamináris és turbulens áramlás ellenállástényezője csőben



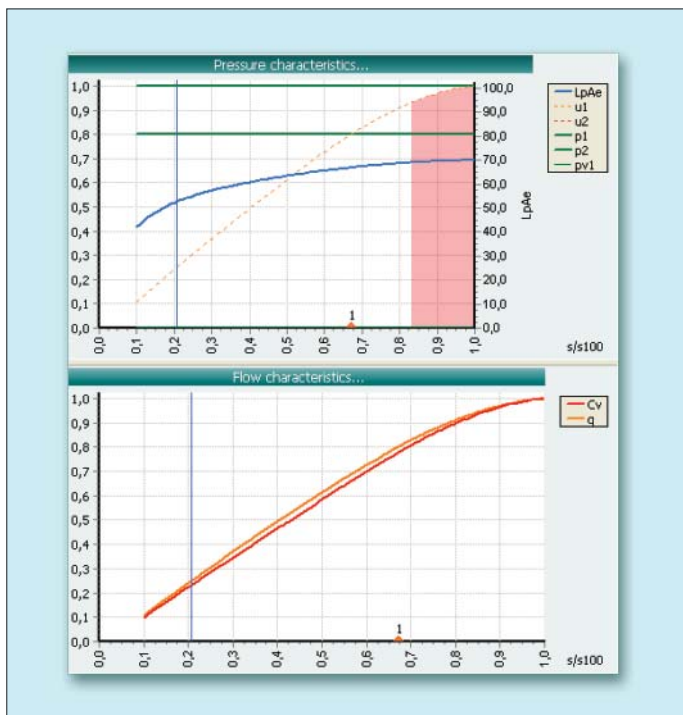
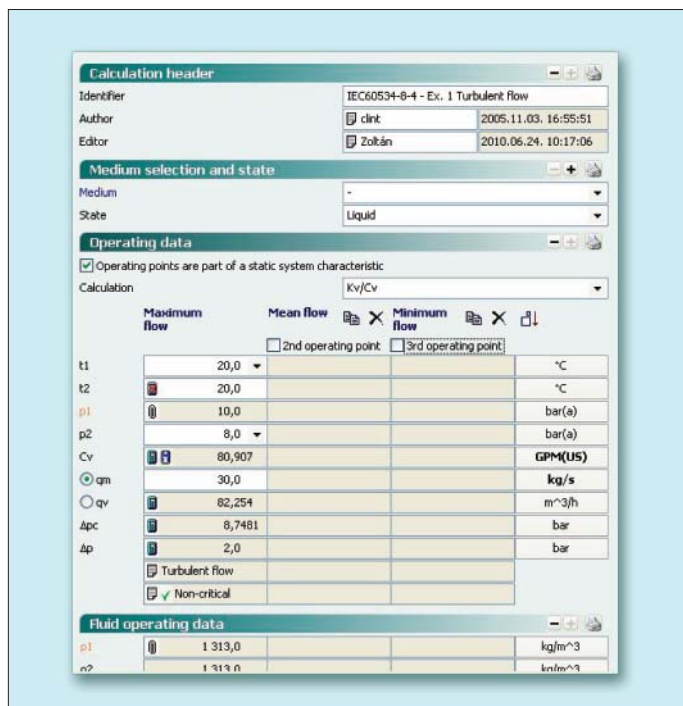
<sup>1</sup> Siemens, H.: CONVAL 3.0a, Computer-aided optimization tools, for final control elements, orifice flow meters and pipeline components. 1979-1994. Conval Demo Version . 8.0 (5.0.8.3) 2010.F.I.R.S.T. GmbH (www.conval.de)

diffúzor hatása, a viszkozitás és a *Reynolds*-szám eltérése következtében megkívánt korrekció, végül szabályozástechnikai optimalizálás végezhető a program segítségével. Valamennyi műveletnél mindaddig hibaüzenetet küld, amíg a megfelelő beállítás nem történt meg. A számítás eredménye egy bőséges adatlista, a beállítástól függően 8-10 grafikusan ábrázolt függvény, valamint a legfontosabb adatok összefoglaló táblázata.

Tévedés lenne ennek alapján azt hinni, hogy ha már van méretező program, akkor annak alapján bárki tudna szelepet méretezni. Szükség van ehhez szabályozástechnikai, áramlástani és számítástechnikai ismeretekre. A következő példák ezt illusztrálják.

A 5. ábrán egy korszerű, a 2010-es változatban megjelent program adattáblájának egy része (a) és a számítás eredményét

5. ábra Adattábla részlet és két jellegző görbe a CONVAL 8.0-jelű programváltozatának egy mintapéldájából

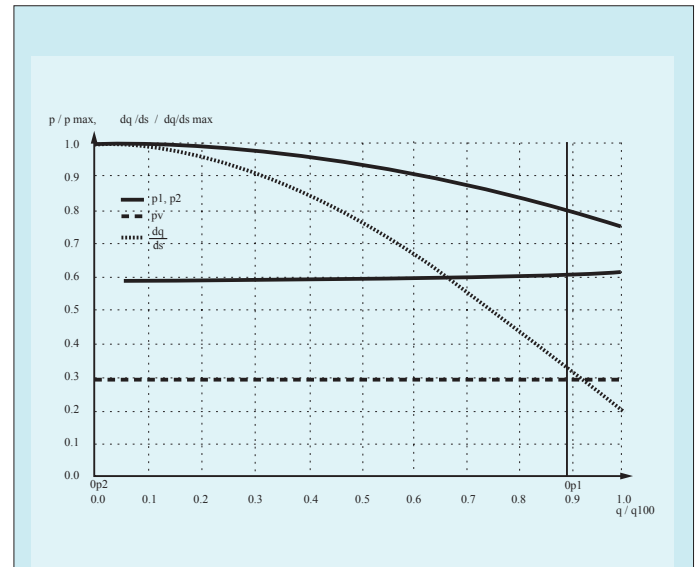


grafikusan is bemutató eredménytábla egy része (b), az adott szelep nyomás- és zajfüggvényének menete látható.

A 2. táblázat valóságos ipari példán<sup>2</sup> alapul, eredeti (nem demo) programmal készült, nagynyomású, két munkaponttal megadott (6., 7. és 9., 10. sor) és magas hőmérsékletű vízáramba (11. sor) való beavatkozást mutat, lineáris karakterisztikájú szelep segítségével. A vizsgálat megmutatta, hogy a kiválasztás nem volt sikeres. A kiválasztható áramlási tartalék (31. sor) 1,35-ra adódik, vagyis az optimalizálással kapcsolatban előzőekben említett szabálynak nem tesz eleget. A szelepen részleges kavitáció

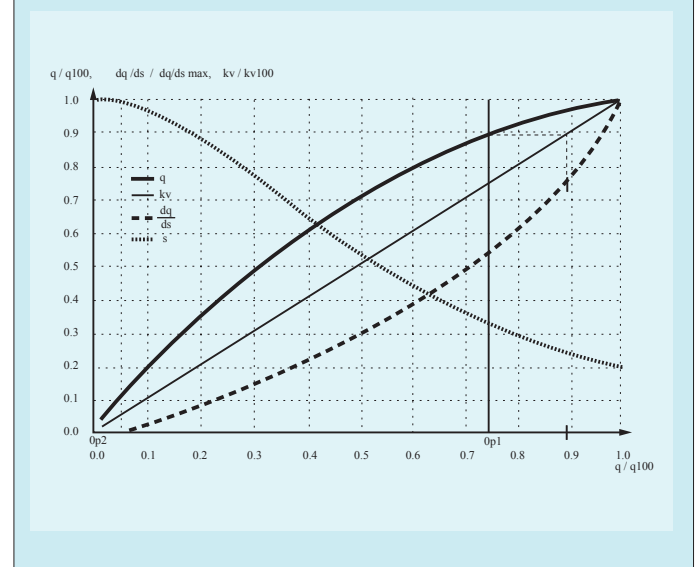
<sup>2</sup> Dr. Telkes Zoltán: Gőzkazán tápvíz kör szabályozó szelepeinek vizsgálata. Tanulmány, 1998. 3. A beépített szabályozószelep üzemi paramétereinek ellenőrzése.

6. ábra A 2. táblázatban megadott szelepméretezési eset legfontosabb jellegző görbéi



Az a) ábrán a relatív térfogatáram függvényében a szelep előtti és mögötti nyomás, valamint a  $dq/ds$  átviteli tényező relatív értéke ( $s=h!$ ),

a b) ábrán az  $s$  relatív szeleplöket függvényében az eredő, relatív térfogatáram, a szeleptényező, az átviteli tényező és a szeleplöket relatív értéke látható



A SZELEPTÉNYEZŐ KIVÁLASZTÁSA:  $K_{vs} = ?$

ÁRAMLÁS	KRITIKUSON ALULI	KRITIKUSON FELÜLI
FELTÉTEL FOLYADÉKRA	$\Delta p < \Delta p_{krit} = F_L^2(p_1 - F_F p_v)$	$\Delta p > \Delta p_{krit} = F_L^2(p_1 - F_F p_v)$
TÉNYEZŐ ÉS KORREKCIÓ FOLYADÉKRA $F = F_b \cdot F_p \cdot F_r$	$K_{vs} = \frac{Q_{max}}{F \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_r \cdot \rho_r}{\rho_r}}}$	$K_{vs} = \frac{Q_{max}}{F \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_r \cdot \rho_r}{\rho_r}}}$
FELTÉTEL GÁZRA	$\Delta p < \Delta p_{krit} = p_1(1 - \tau_{krit})$ $\tau \geq \tau_{krit}$	$\Delta p > \Delta p_{krit} = p_1(1 - \tau_{krit})$ $\tau < \tau_{krit}$
TÉNYEZŐ ÉS KORREKCIÓ GÁZRA $F = F_p \cdot F_E$	$K_{vs} = \frac{Q_{Nmax}}{F p_1 K} \cdot \sqrt{\frac{T_1 \rho_N Z}{x}}$ ahol $K = \sqrt{\frac{\rho_0 T_N}{\Delta p_0 p_N}}$	$K_{vs} = \frac{Q_{Nmax}}{F p_1 K} \cdot \sqrt{2 T_1 \rho_N Z}$ ahol $K = \sqrt{\frac{\rho_0 T_N}{\Delta p_0 p_N}}$
TÉNYEZŐ ÉS KORREKCIÓ SZÁRAZ GŐZRE $F = F_p \cdot F_E$	$K_{vs} = G_{max} \cdot \frac{1}{F} \cdot \sqrt{\frac{v_2}{\Delta p}}$	$K_{vs} = G_{max} \cdot \frac{1}{F} \cdot \sqrt{\frac{2v_2}{p_1}}$
TÉNYEZŐ ÉS KORREKCIÓ NEDVES GŐZRE $F = F_p \cdot F_E$	$K_{vs} = G_{max} \cdot \frac{1}{F} \cdot \sqrt{\frac{v_2 y}{\Delta p}}$	$K_{vs} = G_{max} \cdot \frac{1}{F} \cdot \sqrt{\frac{2v_2 y}{p_1}}$
KORREKCIÓS TÉNYEZŐK KÉPLETEI		
$F_p =$	$\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K_v^2}{D^4 z} \xi_1 + \frac{K_v^2}{D^4 z} \xi_2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^4 \cdot \left(\frac{\xi_1}{\xi_v} + \frac{\xi_2}{\xi_v}\right)}}$	
$F_b =$	$F_L \cdot \sqrt{\frac{p_1 - F_F p_v}{\Delta p}}, F_L = \sqrt{\frac{\Delta p}{p_1 - p_v}}, F_F = 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{p_v'}{p_{krit}}}$	
$F_r =$	$K_r \cdot \sqrt{Re_m \cdot \xi_v}, Re_m = K_{m1} \cdot \frac{F_d}{v} \cdot \sqrt{\frac{Q}{F_L} \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} = K_{m2} \cdot \frac{F_d}{v} \cdot \frac{Q}{\sqrt{K_v F_L}}$	
$F_E =$	$1 - \frac{x}{3 \cdot \frac{\kappa}{1,4} \cdot x_T},$ ahol $x = \frac{\Delta p}{p_1}$	

1. táblázat Képletgyűjtemény a szelepek kiválasztásához

lép fel (32. sor). Ennek alapján a program által a lineáris helyett ajánlott karakterisztika egyenszázalékos. A 6. ábrán látható jelleggörbék alapos tanulmányozása során néhány következtetés levonható. A  $dq/ds$  átviteli tényező természetesen löket- és áramlásfüggő, hiszen az eredő szelepkarakterisztika nemlineáris, és jelentősen eltér a szelepek  $k_v$  katalógus-karakteristikájától, a beépítési hely pedig jól láthatóan megváltoztatta a térfogatáram-függvény jellegét a katalóguskarakteristikához képest. Az 1. munkapontban (Op1) az átviteli tényező a maximumtól távol van. Bár a maximális térfogatáramnál a szelep nincs rövidzárban ( $p_1 > p_2$ ), de közel van ehhez. Az elemzés alapján szelepcserre vált szükségessé.

**Összefoglalás**

A fentiek alapján megállapítható, hogy a szabályozási kör szerveinek tárgyalása során a legutolsónak maradt beavatkozó szervek témakörében a szabályozó szelepek méretezése igen körültekintő, az áramlástani, szabályozástechnikai és számítástechnikai ismeretek igen alapos és igen sok részletre kiterjedő ismeretét igényli.

editor@magyar-elektronika.hu

2. táblázat Számítógépes szelepméretezés adatai

Sz	Bevit/program által számított adat	Jelölés	Mértékegység	1. eset	Sz	Bevit/program által számított adat	Jelölés	Mértékegység	1. eset
1.	Közeg halmazállapota			folyadék	18.	Kézi biztonsági tényező	b	-	1.33
2.	Bemeneti munkaponti adat (Op1)			G	19.	Eredő szeleptényező	b*Kv	m^3/h	159.36
3.	Számítandó érték			kv	20.	Választott szeleptényező	Kvs	m^3/h	160
4.	Tömegáram	G	kg/h	440000	21.	Névleges szeleptátmérő	DN	mm	57
5.	Térfogatáram (0°C, 1013 mbar)	Q	m^3/h	522.08	22.	Szelepkarakterisztika jellege			lineáris
6.	Abszolút nyomás a szelep előtt	p1	bar	65	23.	Áramlási sebesség (p2)	u	m/s	56.835
7.	Abszolút nyomás a szelep után	p2	bar	49	24.	Mach-szám (vena contracta)	Ma	-	-
8.	Tömegáram a 2. munkapontban (Op2)	G	kg/h	1000	25.	Szelep-átmérőarány (kv/kvs=0.43)	Fd	-	-
9.	Abszolút nyomás a szelep előtt a 2. munkapontban (Op2)	p1	bar	81	26.	Módosított Reynolds-szám	Rem	-	-
10.	Abszolút nyomás a szelep után a 2. munkapontban (Op2)	p2	bar	49	27.	Viszkózitás-korrektív tényező	FR	-	-
11.	Közeg			víz	28.	Szeleptényező korrekció nélkül	Kv	m^3/h	-
12.	Üzemi hőmérséklet	t1	°C	221	29.	Hangnyomás-szint (A-szűrő)	LpAe	dB(A)	47.6
13.	Adiabatikus (izentropikus) kitevő	kappa	-	-	30.	Számított rövidzárási tényező	ax	-	1.3836
14.	Normál sűrűség (0°C, 1013 mbar)	rhon	kg/m^3	-	31.	Választott áramlási tartalék	a	-	1.35
15.	Munkaponti sűrűség	rho1	kg/m^3	842.79	32.	Kommentár			Részleges kavitáció
16.	Dinamikus viszkózitás	eta	Pa*s	-	33.	Ajánlott karakterisztika			egyenszázalékos
17.	Szeleptényező	Kv	m^3/h	119.82					