

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem
Gépészmérnöki Kar**

**Pneumatikus teljesítmény-átviteli
rendszerek áramlástanai jellemzői**

Tézisfüzet

Szente Viktor

Témavezető: Dr. Vad János

Budapest, 2008

1. A kitűzött kutatási feladat összefoglalása

Az összetett elektropneumatikus (továbbiakban EP) rendszerek számítógépes modellezése az Áramlástan Tanszéken 1999-ben kezdődött, ezen értekezés kutatási témájaként. A számítástechnika akkori szintje már lehetővé tette, hogy egyes alkatelmek különálló vizsgálata helyett egy teljes rendszert lehessen vizsgálni és viselkedését az idő függvényében modellezni. Ezt a kutatási irányt a Knorr-Bremse céggel akkoriban létrejött kutatási együttműködés alapozta meg. A cég egy évszázados működése során világméretűvé vált, mára a haszongépjárművek, illetve a vasúti járművek fékrendszereinek piacvezető szállítójaként tartják számon. 1999-ben nyitotta meg Budapesten az új kutatás-fejlesztési központját, és bár a K&F tevékenység Magyarországon már 1995-ben elindult, az erre a célra dedikált központ megépítésével kapott új lendületet. Ezen ipari fejlődési folyamat a jelen kutatás fontos hajtóereje volt.

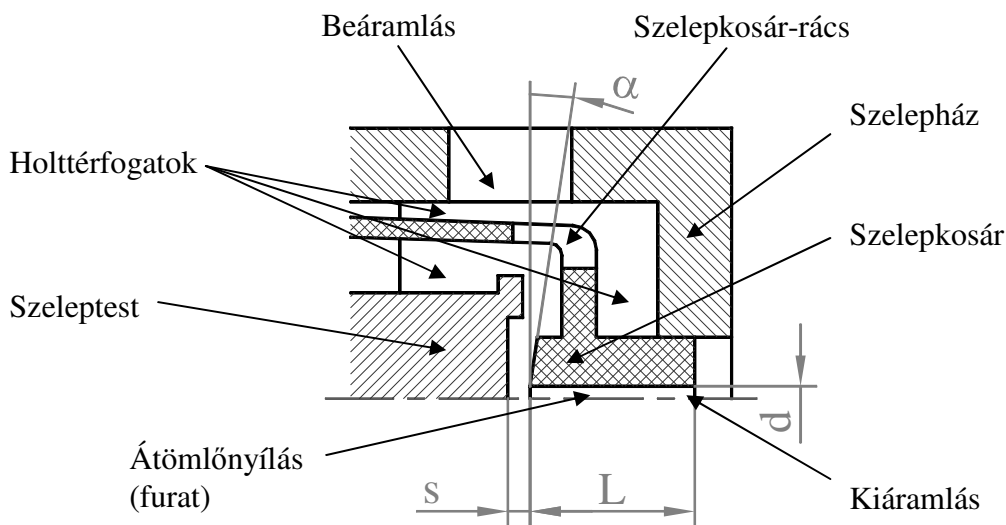
A számítástechnika akkori szintje bizonyos korlátokat jelentett, az akkori jobb gépek kapacitása messze elmaradt egy mai belépő szintű géphez képest is. Komoly probléma volt az összetett rendszerek modellezéséhez szükséges szoftveres környezet kiépítése is. Egy ilyen környezet kialakítása messze meghaladta a tanszék akkori lehetőségeit, azonban épp akkoriban jelent meg az Imagine cég AMESim nevű szimulációs szoftverének egy újabb kiadása, mely már alkalmas volt összetett EP rendszerek modellezésére is. Meglepő volt, hogy még ebben az igen kiterjedt modellkönyvtárral rendelkező szoftverben sem volt olyan szelepmodell, mely alkalmas lett volna az EP rendszerek egyik központi eleme, az EP szelep kellően pontos modellezésére. Ebből kiindulva kutatásaim során arra összpontosítottam, hogy az EP szelepekben lezajló áramlástan folyamatok megismerése után kifejlesszek egy olyan modellt, amely képes az EP szelepek áramlási jellemzőinek kellő pontosságú modellezésére.

A számítógépek rohamos fejlődésének köszönhetően a kísérletezést egyre inkább felváltja a numerikus modellezés, ami azonban csak akkor lehet sikeres, ha megfelelő pontosságú modellek állnak rendelkezésre. Tekintettel arra, hogy napjainkban is egyre nagyobb figyelem terelődik a gépjárművek menetbiztonsági berendezéseire és azóta sem publikáltak megfelelően használható és a korábbiaknál pontosabb EP szelep modellt, ez a kutatási irány még ma is aktuális. Motivációmát tovább erősítette az a tény, hogy az általam vizsgált EP menetbiztonsági rendszerek segítségével balesetek előzhetőek meg, környezeti ill. anyagi károk kerülhetők el.

2. Kutatási eredmények

Vizsgálataim tárgyául egy olyan szelepcsáládót választottam, amely számos EP rendszerben megtalálható, ezen belül kiemelt szerepet tölt be haszongépjárművek fék- és levegőellátó-rendszerében [1]. Céloom az volt, hogy olyan szelepeket vizsgáljak, melyek kellően elterjedtek, melyeket olyan rendszerekben alkalmaznak, ahol fontos a gyors, megbízható és pontos működés, továbbá olyan rendszerekben is felhasználják, melyek fejlesztés alatt állnak. Ezek a szelepek mérsékelt áteresztőképességük miatt sok esetben egy relészelep vezérlőjeként biztosítják a magas tömegáramot gyors reakció mellett [2][3]. E szelepek legfontosabb jellemzői az alábbi felsorolásban, míg vázlatrajza a **1. ábrán** látható:

- Kis méret és kis tömeg a rövid kapcsolási idő és alacsonyabb áramigény érdekében.
- A kapcsolási idő jellemzően ms nagyságrendű.
- Mérsékelt áteresztőképesség (1-2 mm átmérőjű átömlési keresztmetszet).
- Mivel vezérlőszelep, az átáramlási karakterisztika ismerete kiemelt fontosságú a megbízható numerikus rendszermodellezés, ill. rendszertervezés érdekében.
- Bistabil, azaz csak a két végállást tudja stabilan tartani.
- Az alkalmazott nyomástartomány jellemzően 1-13 bar.
- A közeg körkörös palástfelületen, közel radiális irányban lép be, majd kb. 90°-os iránytörés után rövid (jellemzően 5-10 mm), kör keresztmetszetű csövön, axiális irányban lép ki.



1. ábra: Átáramlási geometria

EP szelepek modellezése esetén az áramlástan szempontból fontos jellemzők a nyomás, a hőmérséklet, a tömegáram és az entalpiaáram. Tovább koncentrálna a figyelmet, egy EP szelep legfontosabb jellemzője a tömegáram lesz, ami számos tényezőtől függhet. Általánosságban azonban egy kész rendszerben a tömegáram elsősorban a szelepen kialakuló nyomásviszonytól, ill. a belépőoldali gáz állapotjellemzőitől függ, hiszen a szelep geometriai kialakítása adott, az általánosan használt EP szelepek pedig vagy teljesen zárva, vagy teljesen nyitva vannak, proporcionális szelepek használata az általam vizsgált rendszerekben igen ritka. (A proporcionális szelepek ugyanis jóval költségigényesebbek egy egyszerű kétállású szelepnél, áramfelhasználásuk nagyobb, tömegük és fizikai méretük is nagyobb ugyanakkora áteresztőképesség mellett.) Az egyszerű kétállású szelepeknél az áramlási folyamat időtartamának domináns részében tehát a szeleptest nyugalmi helyzetben van, ezért a

szelepgeometriát időben állandónak tekinthetjük. Izentróp, veszteségmentes, stacioner áramlás koncentrált paraméterű modellezése esetén a tömegáram a következőképpen számítható [4][5][6]:

$$q_m = A \cdot C_m \cdot \frac{p_u}{\sqrt{T_u}} \quad (1)$$

Mivel valóságos (nem sűrűségmentes) közegekben mindig lesz kontrakció, ill. felléphetnek egyéb veszteségek is, azokat az átömlési tényezővel (C_q) vesszük figyelembe:

$$q_m = A \cdot C_q \cdot C_m \cdot \frac{p_u}{\sqrt{T_u}} \quad (2)$$

ahol a szelepen átáramló tömegáram (q_m) a belépőoldali nyomás (p_u) és hőmérséklet (T_u), a legszűkebb geometriai keresztmetszet (A), a tömegáram-paraméter (C_m) és az átömlési tényező (C_q) függvénye. Az átömlési tényező azért szükséges, hogy az analitikusan levezetett összefüggés a valóságban lejátszódó folyamatokat pontosabban írja le. Egy szelep átömlési képességének a megállapításához elsősorban az átömlési tényező meghatározására van szükség.

Az utóbbi évtizedekben számos kutatás célja volt, hogy meghatározza a különféle nyílások, szelepek átömlési karakterisztikáját a nyomásviszony, ill. a geometria függvényében [7][8][9][10][11][12][13][14][15][16][17][18]. Közös jellemzőjük azonban, hogy csak korlátozottan használhatók az általam vizsgált EP szelep modellezésére. Az eddigi modellek egy része konstans átömlési tényezőt javasol, egy része nem vizsgálja a teljes nyomásviszony-tartományt, ill. a legtöbb esetben a geometriában is eltérések tapasztalhatók. A nagy pontosságot igénylő szimulációs modellekhez ezért szükséges egy olyan szelepmo­dell felállítása, amely kellő pontossággal képes visszaadni az átömlési tényezőt a teljes nyomásviszony-tartományon.

Az EP szelep átömlési karakterisztikáját meglehetősen sok paraméter befolyásolja. Vizsgálataim során figyelembe vettem a szelep előtti és utáni nyomást (p_u, p_d), a szelep előtti hőmérsékletet (T_u), a szelepfurat átmérőjét (d), a furat hosszát (L), a furat érdességét (k), a szeleptányér távolságát (s), az áramló közeg jellemzőit (R, κ, ν), a szelepkosár letörési szögét a furatba történő belépésnél (α), illetve az átlagos áramlási sebességet (v).

Mivel ez meglehetősen sok paraméter, amelynek az együttes vizsgálata igen hosszú időt venne igénybe, ezért dimenzióanalízis [19] segítségével kíséreltem meg a változók számát csökkenteni. Az eredményül kapott dimenziótlán változók a következők: a szelepkosár

letörési szöge (α), izentropikus kitevő (κ), nyomásviszony $\left(\frac{p_d}{p_u}\right)$, Reynolds-szám $\left(\frac{v \cdot d}{\nu}\right)$,

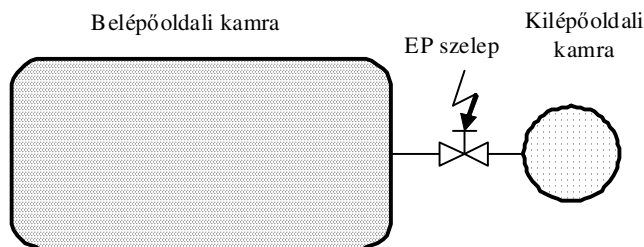
relatív érdesség $\left(\frac{k}{d}\right)$, a furat hossz/átmérő viszonya $\left(\frac{L}{d}\right)$, a szeleptányér-távolság és

furatátmérő viszonya $\left(\frac{s}{d}\right)$ és az átömlési tényező $\left(\frac{q_m}{A \cdot C_m} \cdot \frac{\sqrt{T_u}}{p_u}\right)$. A dimenzióanalízis

legfontosabb megállapításai a füzet végén, az **1. Tézisben** olvashatók.

Az irodalomkutatás és a dimenzióanalízis során arra a megállapításra jutottam, hogy egy jól alkalmazható szelepmo­dell kidolgozásához célszerű először egy analitikus modellt felállítani. Az analitikus modell tartalmazza a lejátszódó fizikai folyamatok alapvető leírását, ezzel egy jól kézbentartható alapot ad a modellezéshez. Az általam kidolgozott modell a Borda-féle átömlőnyílásra felírt impulzustétel­en alapul, és az irodalomban található hasonló modellekhez képest a teljes nyomásviszony-tartományon képes leírni az átömlési karakterisztikát. Az analitikus modell legfontosabb megállapításai a **2. Tézisben** olvashatók.

Modern, magas integráltsági fokú pneumatikus rendszerekben a nagy­nyomású levegő általában egy EP szelepen keresztül áramlik az egyik kamrából a másikba. Továbbá ezek a rendszerek általában rendelkeznek beépített nagysebességű nyomásérzékelőkkel, hogy elláthassák információval a vezérlő elektronikát a rendszer állapotáról, emellett rendelkeznek beépített csatlakozókkal külső vezérlő, hibakereső és adatrögzítő berendezések csatlakoztatására [20]. Ez adta az ötletet arra, hogy valamilyen módon ezt a rendszert fel lehetne használni a szelepkarakterisztika mérésére. Ez azt jelenti, hogy megfelelő módszer alkalmazásával a két kamra között levő EP szelep átömlési karakterisztikája a rendszer megbontása és a szelep kiemelése nélkül meghatározható, ami előnyös az eddig ismert módszerekhez képest [21][22][23][24]. Figyelembe kell venni azonban, hogy a hőmérséklet idő szerinti változásának mérésére EP rendszerekben általában nincs lehetőség, ezért egy olyan módszer megalkotására törekedtem, ahol a hőmérséklet-változás szerepe elhanyagolható. A kamrából-kamrába módszernek megfelelő mérés elvi kialakítása a **2. ábrán** látható, a tömegáram pedig a **(3) képlet** alapján határozható meg. A módszer elemzése során kapott legfontosabb megállapítások a **3. Tézisben** olvashatók.

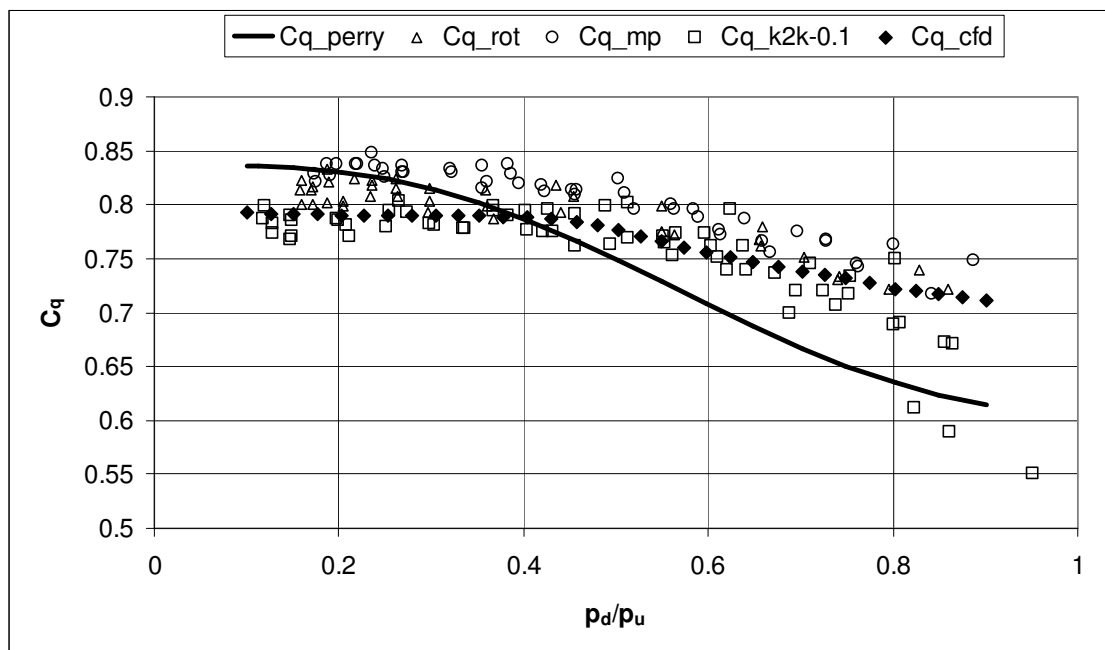


2. ábra: Kamrából-kamrába típusú mérés elvi kialakítása

$$q_m = \frac{V \cdot \frac{dp}{dt}}{R \cdot T \cdot \kappa} \quad (3)$$

A numerikus áramlástani (CFD) vizsgálat számos esetben az egyetlen lehetőség arra, hogy az áramlások részleteiről is információkat kapjunk. A jelenleg rendelkezésre álló mérőeszközök ugyanis nem minden esetben teszik lehetővé a teljes áramlási tér feltérképezését. Rendelkezésre állnak ugyanakkor a belépő és kilépő nyomás és hőmérséklet, továbbá az átáramló mennyiség meghatározására alkalmas műszerek, mellyel a CFD vizsgálatok eredménye validálható. A CFD vizsgálat további előnyei közé tartozik az is, hogy a geometriai változtatások jóval könnyebben végezhetőek el, mint a mérési összeállítás esetében, emellett a mérési hibák bizonytalan­ná teszik a paraméter-változtatások hatásának felismerését. Ezért elkészítettem a szelepcs­alád CFD modelljét a Fluent véges térfogatos diszkretizáción alapuló általános célú CFD program [25] segítségével, majd számos futtatást végeztem különböző nyomásviszonyokon, amelyek eredményeit mérésekkel ellenőriztem. A

vizsgálatok során különféle sűrűségű és kialakítású numerikus hálók alkalmazásával ellenőriztem a hálófüggetlenséget. Az eredmények ismeretében bebizonyosodott, hogy a CFD modell mérnöki szempontból megfelelő pontossággal képes visszaadni a vizsgált szelep átömlési karakterisztikáját. A **3. ábrán** láthatók a rotaméteres (C_{q_rot}), a mérőperemes (C_{q_mp}) és a 0.1 s időtartamú mérési szakaszt alkalmazó kamrából-kamrába ($C_{q_k2k-0.1}$) mérésekből származó, továbbá a CFD szimuláció (C_{q_cfd}) és a Perry-polinom (C_{q_perry}) által számított átömlési karakterisztikák. A CFD vizsgálatok során kapott legfontosabb megállapítások a **4. Tézisben** olvashatók.



3. ábra: Mérési és CFD eredmények összehasonlítása

Kutatási témám egyik elsődleges célja volt egy olyan egyszerűsített 1D szelepmodell felállítása, amely kellő pontossággal képes visszaadni az általam vizsgált szelepcsalád átömlési karakterisztikáját. Az ismertett analitikus modell által adott átömlési karakterisztika nem alkalmas erre a célra, mivel levezetésénél számos elhanyagolást tettem. Ugyanakkor az analitikus modell elméleti alapokon nyugszik és segítségével a karakterisztika expliciten számolható, így jó alapot biztosít egy félempirikus modell létrehozására. A félempirikus modell így analitikus, elméleti összefüggésekre építhet, azok eredményét a mérések és CFD vizsgálatok figyelembevételével, korrekciós függvények használatával módosíthatja, ezzel lehetőséget biztosít az egyes geometriai paraméterek hatásának figyelembevételére. A CFD vizsgálatok előnyei közé tartozik, hogy könnyű megváltoztatni a geometriai paramétereket, míg kísérleti vizsgálatok során az új alkatrészek előállítása nehezebb és költségesebb, a mérési eredmények bizonytalansága pedig megnehezíti a trendek megállapítását, ezért a CFD modell segítségével vizsgáltam egyes paraméterek hatását. Az így kapott legfontosabb megállapítások az **5. Tézisben** olvashatók.

3. Új tudományos eredmények, tézisek

- 1. Tézis:** Az általam vizsgált szeleptípusra az irodalomban fellelhető eseteknél szélesebb körűen, szisztematikusan meghatároztam a kialakuló stacioner tömegáramot befolyásoló jellemzőket. A szakirodalomban publikált módszertant kiegészítettem azzal, hogy dimenzióanalízist alkalmaztam, mely révén az eddigieknél szélesebb körű dimenziótlan csoportokat definiáltam a vizsgált szeleptípusra. Megállapítottam, hogy a dimenziómátrixból származó dimenziótlan jellemzők mellett egyéb dimenziótlan jellemzők is befolyásolják a tömegáramot. Ezért a dimenziómátrixból származó jellemzők mellett egy olyan dimenziótlan jellemző hatását is vizsgáltam, amely a szakirodalomban nem szerepelt (szelepkosár letörési szöge).
- 2. Tézis:** Kidolgoztam egy analitikus modellt az átömlési tényező (C_q) nyomásviszony-függésére (p_d/p_u) Borda-féle kiömlőnyílás és stacioner áramlás esetén, amely az eddigi analitikus modellekhez képest a teljes nyomásviszony-tartományon alkalmazható. Az analitikus modelltől megállapítható trend és a CFD számítások alapján magyarázatot adtam a szakirodalomban fellelhető, teljes nyomásviszony-tartományon érvényes empirikus modellek által mutatott trendre, miszerint az átömlési tényező értékét a nyomásviszony a kritikus alatti tartományon is befolyásolja. Bár a legszűkebb keresztmetszetben a kritikusnak megfelelő viszonyok (nyomás, hőmérséklet) uralkodnak, ugyanakkor a sugár körüli körgyűrűben az ellennyomás is tud érvényesülni a mérőperem-jellegű, ill. a Borda-féle kiömlőnyílásokban. Ennek köszönhetően a mérőperem-jellegű, ill. a Borda-féle kiömlőnyílásokat vizsgáló empirikus modellekben az átömlési tényező kritikus nyomásviszony alatt a nyomásviszony csökkenésével folyamatosan emelkedő tendenciát mutat. Megállapítottam, hogy az általam vizsgált szelepcsoportban az ellennyomás csak korlátozott mértékben képes befolyásolni az átömlési tényezőt kritikus nyomásviszony alatt, mert az átömlőnyílásba történő belépéskor keletkező leválási zóna után az áramlás ismét kitölti a rendelkezésre álló geometriai keresztmetszetet, így az ellennyomás a vena contracta közelében nem képes érvényesülni. Rámutattam, hogy ezek a jelenségek, ill. a CFD számítások eredményei magyarázatot adnak az átömlési karakterisztika konstans trendjére kritikus nyomásviszony alatt, ill. a nyomásviszony növelése esetén folyamatos csökkenésre kritikus nyomásviszony felett.

A szerző kapcsolódó cikkei: [P1],[P2]

3. Tézis: Kidolgoztam egy új mérési módszertant, melynek segítségével pneumatikus szelepek nyomásviszony-függő átömlési karakterisztikája állítható fel a teljes nyomásviszony-tartományon, stacioner áramlás feltételezésével. Bebizonyítottam, hogy a tömegáram meghatározása visszavezethető egy tartály nyomásváltozásának mérésére. Megállapítottam, hogy a hőmérséklet-változás elhanyagolása csak a leürítési folyamat kezdeti, igen rövid szakaszán ad elfogadható közelítést. Kimutattam, hogy módszerem a kritikus alatti nyomásviszony-tartományon mérnöki szempontból megfelelően pontos, emellett a kritikus feletti tartományon is alkalmas közelítő eredmények felállítására. Rámutattam arra, hogy ez a módszer haszongépjárművek pneumatikus rendszerén végzett kutatás-fejlesztés során alkalmazható előnyösen, mivel azokban a rendszerekben gyárilag be vannak építve a mérést lehetővé tevő nagy sebességű és nagy pontosságú nyomástávadók és az adatrögzítéshez szükséges elektronika.

A szerző kapcsolódó cikkei: [P3],[P4],[P5],[P6]

4. Tézis: Az általam vizsgált szelepcsoportra kísérletekkel alátámasztott numerikus áramlástan vizsgálatokat végeztem, melyek során a stacioner áramlás szerkezetét és az átömlési tényező változását az irodalomban talált eseteknél szélesebb körű és részletesebb vizsgálatnak vettem alá. Kimutattam, hogy a leválási zóna által megváltoztatott áramlási keresztmetszet egy virtuális Laval-fúvókát formáz kritikus nyomásviszony alatt, így a szelep belsejében lokálisan hangsebesség feletti áramlás alakul ki. Rámutattam arra, hogy a kialakuló áramkép nagymértékben hasonlít a hangsebesség felett üzemelő konfúzorok után csatlakoztatott csőben kialakulóra. Megállapítottam, hogy a szelepfurat belépő keresztmetszetében kialakuló lökéshullámok, ill. a leválási zóna méretei kritikus nyomásviszony alatt minimális mértékben változnak. Kritikus feletti nyomásviszonyon ugyanakkor a leválási zóna folyamatosan növekszik, csökkentve ezzel az átömlési tényezőt.

A szerző kapcsolódó cikkei: [P1],[P2],[P3],[P6]

5. Tézis: Az általam kidolgozott analitikus modell és a kísérletekkel alátámasztott numerikus áramlástan vizsgálatok alapján felállítottam egy félempirikus modellt. Megállapítottam, hogy az általam kidolgozott analitikus modelltől egyszerű transzformációk révén a vizsgálati körben bármely C_q görbe származtatható úgy, hogy az eredmények legfeljebb 3% relatív eltéréssel követik a CFD módszerrel számított átömlési tényezőt. Igazoltam, hogy kritikus nyomásviszony alatt és felett különböző transzformáció alkalmazása szükséges. Kimutattam, hogy az átömlési tényező korrekciójának függése a szelepkosár letörési szögétől (α) lineáris, ugyanakkor a szeleptányér-távolság – furatátmérő viszonytól (s/d) már másodfokú. Megállapítottam, hogy az átömlési tényező korrekciójának függése az s/d viszonytól különbözik a 0.25 alatti és feletti tartományon, de az összefüggés mindkét esetben másodfokú. Megállapítottam, hogy az s/d viszonyt nem érdemes 0.5 fölé növelni, mert abban a tartományban C_q növekedése s/d függvényében minimális. Rámutattam arra, hogy az általam vizsgált tartományban a hossz-átmérő viszony (L/d) növelése minimális mértékben befolyásolja az átömlési tényezőt, vagyis az áramlás merőleges lökeshullám utáni, ill. kritikus nyomásviszony felett a leválási zóna utáni szakaszában a fali súrlódás hatása a belépésnél kialakuló veszteségekhez képest nem számottevő.

A szerző kapcsolódó cikkei: [P1],[P2],[P6]

4. A tézisekhez közvetlenül kapcsolódó publikációk

A tézisekhez közvetlenül kapcsolódva a következő konferencia- és folyóiratcikkek készültek (zárójelben a publikációhoz kapcsolódó tézis szerepel):

- [P1] 102 V. Szente, J. Vad: *A semi-empirical model for characterisation of flow coefficient for pneumatic solenoid valves*, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering Series, Vol. 47, pp. 131-142, 2003. (2., 4., 5. Tézis)
- [P2] 119 V. Szente, J. Vad: *Félempirikus modell kisméretű pneumatikus mágnesszelepekre*, Gép, Vol. 2, pp. 22-27, 2004. (2., 4., 5. Tézis)
- [P3] 57 V. Szente, J. Vad: *Computational and experimental investigation on the flow characteristics of electropneumatic valves*, Gépészet '02, május 30-31, Budapest, 2002. (3., 4. Tézis)
- [P4] 106 V. Szente, Z. Mózer, Á. Tajti: *Experimental investigation on pneumatic components*, Proc. Conference of Modelling Fluid Flow (CMFF '03), Budapest, 2003. (3. Tézis)
- [P5] 107 V. Szente: *Comparison on different measurement methods on electro-pneumatic valves*, Proc. Gépészet '06, Budapest, 2006. (3. Tézis)
- [P6] 120 V. Szente, J. Vad: *Computational and experimental investigation on the flow characteristics of small-scale pneumatic solenoid valves*, Proc. 2nd International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Victoria Falls, Zambia, 2003. (3., 4., 5. Tézis)

5. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

- [K1]H. Németh, G. Kristóf, V. Szente, L. Palkovics: *Advanced CFD simulation of a compressed air injection module*, Proc. Conference of Modelling Fluid Flow (CMFF '06), Budapest, 2006.
- [K2]B. Istók, J. Vad, V. Szente: *Behavior of a pneumatic pressure regulator valve under leakage circumstances*, Proc. 2nd International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Victoria Falls, Zambia, 2003.
- [K3]V. Szente, J. Vad: *Noise and vibration studies on pneumatic circuit protection valves*, XXXVI. Combined Conference on Heavy Vehicles (BusTruck '05), Budapest, 2005.
- [K4]V. Szente, J. Vad, G. Lóránt, A. Fries: *Computational and Experimental Investigation on Dynamics of Electric Braking Systems*, Proc. 7th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Vol. 1., pp. 263 – 275, Linköping, Sweden, 2001.
- [K5]Cs. Hős, B. Istók, V. Szente, G. Kristóf, J. Vad: *Gas Dynamic Pipe Flow Effects in Controlled Pneumatic Systems - a Simulation Study*, Proc. MICROCAD '01, Miskolc, 2001.
- [K6]Cs. Hős, B. Istók, V. Szente, G. Kristóf, J. Vad: *On the Simulation of Gas Dynamic Pipe Flow Effects in AMESim Environment*, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering Series, Vol. 45, Issue 2, 2001.
- [K7]V. Szente, J. Vad: *Computational and Experimental Investigation on Solenoid Valve Dynamics*, 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italy, 2001.

6. Irodalomjegyzék

- [1] P. Kófalusi: *Elektronikus légfék*, Camion Truck & Bus Magazin 2006/5.
- [2] Knorr-Bremse: *Relay Valves*, 2000.
- [3] E. Bideaux, S. Scavarda: *A Pneumatic Library for AMESim*, Proc. ASME'98 Conference, Anaheim, California, 1998.
- [4] D. McCloy, H.R. Martin: *Control of fluid power: analysis and design*, Chichester, Ellis Horwood, 1980.
- [5] I.E. Idel'Çik: *Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition*, 1-56700-0746, Begell House Inc, 1996.
- [6] LMS Imagine.Lab AMESim Rev. 7. documentation, <http://www.lmsintl.com/Imagine>, 2008.
- [7] A. Busemann,: *Hodographmethode der Gasdynamik*, Zeitschrift für angewandte Math. und Mech., Vol. 17, No. 2, 1937.
- [8] K. Oswatitsch: *Grundlagen der Gasdynamik*, Springer-Verlag, 1976.
- [9] J. A. Perry: *Critical flow through sharp-edged orifices*, Trans. ASME, Vol. 71, 1949.
- [10] H. P. Grace, C. E. Lapple: *Discharge coefficients for small-diameter orifices and flow nozzles*, Trans. ASME, Vol. 73, pp 639-647, 1951.
- [11] D. A. Jobson: *On the flow of a compressible fluid through orifices*, Proc. IME, Vol. 169, pp 767-779, 1955.
- [12] W. B. Brower, E. Eisler, E. J. Filkorn, J. Gonenc, C. Plati, J. Stagnitti: *On the compressible flow through an orifice*, Trans. ASME, Vol. 115, 1993.
- [13] D. H. Tsai, E. C. Cassidy: *Dynamic behavior of simple pneumatic pressure reducer*, J. Basic Eng., Vol. 83, 1961.
- [14] S. D. Morris: *Liquid flow through safety valves: Diameter ratio effects on discharge coefficients, sizing and stability*, J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 9, pp. 211-224, 1996.
- [15] Albert K. Henning: *A Compact, Pressure- and Structure-Based Gas Flow Model for Microvalves*, Proc. 3rd Conference on Materials and device characterization in micromachining, Vol. 4175, pp. 74-81, Santa Clara, CA, USA, 2000.
- [16] J. Ruan, R. Burton, P. Ukrainetz: *Investigation of the characteristics of a 2D pneumatic flow control valve*, Proc. 7th Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP '01), Vol. 1, pp. 429-443, Linköping, Sweden, 2001.
- [17] H. Németh, P. Ailer, K. M. Hangos: *Nonlinear modelling and model verification of a single protection valve*, Periodica Polytechnica Ser. Transportation Eng., Vol. 30, pp. 69-92, 2002.
- [18] H. Németh, L. Palkovics, K. M. Hangos: *Unified model simplification procedure applied to a single protection valve*, Control Engineering Practice, Vol. 13, pp. 315-326, 2005.
- [19] T. Szirtes: *The High Art of Dimensional Analysis and Modeling*, Thomas Szirtes and Associates, Inc. Toronto, Canada, 1997.
- [20] Knorr-Bremse: *A haszonjárműfék története*, www.knorr-bremse.hu, 2007.
- [21] ISO 6358:1989, *Pneumatic fluid power. Components using compressible fluids. Determination of flow rate characteristics*.
- [22] JFPS 2009:2002, *Test method for flow-rate characteristics of pneumatic components using charge method*.
- [23] S. de las Heras: *A new experimental algorithm for the evaluation of the true sonic conductance of pneumatic components using the characteristic unloading time*, International Journal of Fluid Power, Vol. 2, No. 1, pp. 17-24, 2001.
- [24] K. Kawashima, Y. Ishii, T. Funaki, T. Kagawa: *Determination of Flow Rate Characteristics of Pneumatic Solenoid Valves Using an Isothermal Chamber*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 126, Issue 2, pp. 273-279, 2004.
- [25] ANSYS Fluent 6.3 documentation, www.fluent.com, 2008.