

OTKA Nyilvántartási szám: T 038184

ÖSSZEFOGLALÓ, ZÁRÓJELENTÉS

Témavezető neve **Dr. Vad János**
A téma címe **Szabályzott pneumatikus rendszerek dinamikai vizsgálata**
A kutatás időtartama: **2002 - 2005**

Az OTKA projekthez kapcsolódó, általunk készített publikációk időrendi jegyzéke a dokumentum végén található. A Zárójelentésben e publikációkra sorszámuk szerint hivatkozunk.

Különválasztjuk azokat a publikációkat, amelyeket még a jelen OTKA program kezdete előtt, annak előkészítéseként készítettünk a projekt témájában. Bár ezekben még természetesen nem szerepel az OTKA nyilvántartási számra való hivatkozás, fontosnak tartjuk felsorolásukat. Ezzel egyrészt az OTKA program korábbi kutatásba történő beágyazottságát érzékeltetjük. Másrészt a korábbi publikációk hasznos adalékot, esettanulmányokat szolgáltatnak az olvasó számára a projekt eredményeinek hatékonyabb hasznosítása érdekében.

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Az OTKA program szabályozott pneumatikus rendszerelemekre és a belőlük felépített rendszerekre irányuló célkitűzéseit az alábbiakban foglaljuk össze:

A/ Olyan **egydimenziós numerikus modellezési módszertan és szimulációs eszköz** kidolgozása, amelynek révén

- Pneumatikus rendszerek dinamikai viselkedése rendeltetésszerű üzemiállapotokban megbízhatóan előre jelezhető,
- A hibadiagnosztika támogatása érdekében a rendellenes üzemiállapotok modellezhetőek,
- A rendszerek kutatás-fejlesztése során felmerülő új megoldások alkalmazhatósága hatékonyan tesztelhető (konceptió-keresés); már kialakított működési koncepció esetén a konstrukciós módosítások (paraméter-változtatások) dinamikai viselkedésre gyakorolt hatása nagyfokú rugalmassággal vizsgálható.
- „Egydimenziós” (1D) modellezés alatt azt értjük, hogy a rendszer elemekben kialakuló, egyébként bonyolult háromdimenziós (3D) áramlást leegyszerűsítve, de a valóságos viszonyokat még kellő hűséggel visszaadva, 1D áramlásként szemléljük. Például egy szelepnnyílásban fellépő 3D áramlást a szelep funkciója szempontjából reprezentatív átfolyási számmal jellemezzük. Az átfolyási szám a levegősugár összehúzóódását mutatja a geometriai keresztmetszetben. Alkalmazásával az áramlás 3D, súrlódásos jellegét félempirikus módon figyelembe tudjuk venni, és a szelepnnyíláson történő átáramlást 1D áramlásként számítjuk.

- A modellezési módszernek eleget kell tennie annak a követelménynek, hogy különböző fizikai alrendszerek csatolása általa egyszerűen elvégezhető. Ezt a követelményt az a tény kényszeríti ki, hogy egy szabályzott pneumatikus rendszer számos eltérő természetű alrendszerből áll: szilárdtest-mechanikai alrendszerek (pl. mozgó szeleptest, helyretolórugó), áramlástechnikai alrendszerek (pl. áramlás csövezetben, szelepnnyílásban), termodinamikai alrendszerek (pl. hőcsere sűrítettlevegő-tartály és környezete között), elektrodinamikai alrendszerek (pl. vezérlő mágnesszelepek).

B/ Az 1D modellezés pontosítása, a 3D áramlás gyakorlati szempontból lényeges részleteinek feltárása érdekében a szabályzás szempontjából kritikus rendszerelemekre részletes **numerikus áramlástan modellezést** szükséges végezni, és ki kell azt egészíteni **analitikus és félempirikus modellezéssel**.

C/ Megfelelő **méréstechnikai készütséget** kell kiépíteni annak érdekében, hogy a dinamikai modellek alkalmasságát mérési adatokkal alátámasszuk – kísérleti validáció –, valamint hogy a modellezés során adódó bizonytalan paraméterek közelítő értékét mérés-technikai úton állapítsuk meg.

D/ A kísérletileg validált, megfelelően felparaméterezett 1D modellek segítségével az alábbi fejlesztési célkitűzéseket kell megvalósítani:

- A **modellek alkalmazhatóságának igazolása pneumatikus rendszer-elemek és rendszerek K+F tevékenységében**, az ipar igényeinek megfelelően. E feladat végzésekor erőteljesen kidomborodik a numerikus modellezés előnye. Egy a korábbi eszközökhöz képest továbbfejlesztett (pl. miniatürizált) pneumatikus elemet több, pl. öt lépésben fejlesztenek ki, kezdve a még csak jellegre helyesen működő, az alapfunkciót bemutató „deszkamodelltól” a tömeggyártásra is alkalmas végső kivitelig. A közbenső lépésekben elvégzett módosítások sikerességét hagyományosan mérés-technikailag tesztelik. Természetesen az újabb modellek legyártatása és mérése költséges és időigényes feladat, és az egyes megoldásváltozatok csak igen korlátozott számban vizsgálhatóak. Ha a numerikus szimuláció révén pl. az öt fejlesztési lépés során kétfőben elhagyható a mérés-technikai vizsgálat, a termék mintegy fél évvel hamarabb megjelenhet a piacon.
- Különösen fontos mérnöki irányvonalak kidolgozása a szabályzott pneumatikus rendszerek fejlesztése során annak érdekében, hogy a **káros rezonanciajelenségeket elkerülhessük**. A rezonancia általában valamely mechanikai elem, pl. szeleptest nemkívánatos periodikus mozgásához köthető, és mint olyan, a berendezés idő előtti tönkremenetelét okozza. Emellett megghiúsíthatja a berendezés rendeltetés szerű működését. Továbbá sok esetben zavaró rezgés, zaj forrása.

Az OTKA projekt futamideje során együttműködést építettünk ki pneumatikus jármű-fékrendszereket gyártó és fejlesztő vállalatokkal; ezáltal megteremtettük a projekt-eredmények ipari hasznosulásának elvi lehetőségét. A továbbiakban az OTKA program eredményeit elsősorban a jármű-fékrendszerek alkalmazási területen mutatjuk be. Az összefoglalót a fenti célkitűzések szerinti bontásban szerkesztettük, kiemelve a projekt eredményeinek újdonságtartalmát.

2. EGYDIMENZIÓS NUMERIKUS MODELLEZÉSI MÓDSZERTAN ÉS SZIMULÁCIÓS ESZKÖZ

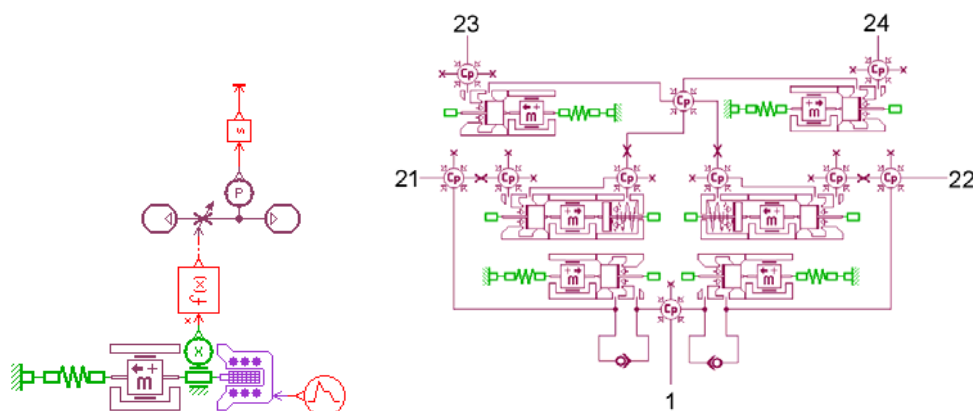
Több fajta szimulációs környezet áttekintése után választásunk az AMESim szimulációs eszközre esett. Elmondható, hogy az AMESim eszközt az OTKA projekt keretében a mi kutatócsoportunk honosította meg. Az AMESim magyarországi alkalmazásában csoportunk egyedülálló tapasztalatokat szerzett, különös tekintettel elektro-pneumatikus rendszerek vizsgálatában. A pneumatikus fékrendszer-szimuláció elvárásainak megfelelően az AMESim környezetben egyedi modelleket fejlesztettünk ki. Az OTKA projekt előtanulmányaként létrehoztuk pneumatikus mágnesszelepek mérésekkel validált AMESim modelljét [1]. Mivel a pneumatikus teljesítmény-átviteli rendszerekben a nyomásviszony a legtöbb esetben jelentősen a kritikus alatti – pl. jármű-fékrendszerekben mintegy 10 – 13 bar (rel) tápnyomás mellett sok esetben a szabad légkörre történik lefúvatás –, szükségessé vált az AMESim környezetben eredetileg nem létező gázdinamikai csőmodell kifejlesztése [2][3]. Kialakítottuk membrános fékkamrák szimulációs modelljét, és a nyomásforrás – modulátor – csővezet – fékkamra rendszer dinamikai modellezésére szimulációs esettanulmányt dolgoztunk ki [4]. Már a kutatás kezdeti stádiumában elvégeztük egy rezonancia szempontjából kritikusnak ítélt egyszerű lefúvatószelep stabilitási vizsgálatát [5]. Az itt gyűjtött tapasztalatok adták azt a módszertant, amelynek révén a paraméter-változtatások hatását szisztematikusan követni tudtuk a modellezés során.

Az AMESim környezetben végzett korábbi modellezés tapasztalatait az OTKA projekt során messzemenőig felhasználtuk. A modellezési technikát továbbfejlesztettük az alábbi szempontok szerint:

- Elektro-pneumatikus vezérlő mágnesszelepek áramlástechnikai hatásokat (szeleptestre ható erők) figyelembe vevő AMESim modellezése [6][10],
- Összetett, realisztikus, rezonanciára hajlamos rendszerek modelljének kidolgozása [13].

A nemzetközi szakirodalmat áttekintve (lásd publikációink irodalomjegyzékeit) megállapítható, hogy az általunk elektro-pneumatikus berendezésekre felépített AMESim modellek összetettsége, és az egyes alkatelmek valóság-hű modellezése alapján modellezési munkánk újdonságtartalommal bír.

Az 1. ábra mutatja a többszintű modellezés két fokozatát, egyetlen mágnesszelep, valamint több szelepből összeépített védőszelep AMESim modelljeinek példáján.

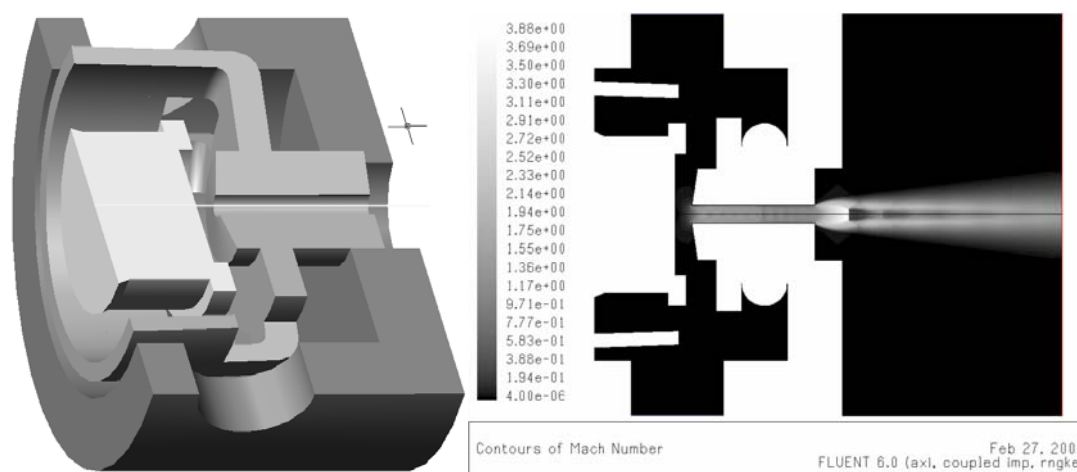


1. ábra. Balra: egyetlen mágnesszelep AMESim modellje [10], jobbra: védőszelep teljes AMESim modellje [13]

3. NUMERIKUS ÁRAMLÁSTANI SZIMULÁCIÓ; ANALITIKUS ÉS FÉLEMPIRIKUS MODELLEZÉS

A szabályozott rendszerekbe beépített vezérlő mágnesszelepek gázdinamikai viselkedésének helyes modellezése kiemelt jelentőséggel bír a teljes rendszer dinamikai modellje szempontjából. Ezért a szelep-áramlás részleteinek tisztázására külön numerikus áramlástanai modelleket dolgoztunk ki, a FLUENT véges térfogatok módszerén alapuló numerikus áramlástanai (Computational Fluid Dynamics, CFD) szoftver segítségével.

Példaként a 2. ábrán mutatjuk be egy vizsgált mágnesszelep geometriai modelljét, és egy reprezentatív üzemállapotban a Mach-szám számított eloszlását.



2. ábra. Modellezett szelepgeometria; a Mach-szám számított eloszlása 1:10 nyomásviszony (ellennyomás/tápnnyomás) esetén [6]

A FLUENT modellezés révén pontosítottuk a szelepáramlást jellemző átfolyási szám (kontrakció) empirikus összefüggését [6][10]. Továbbá a nemzetközi szakirodalomban is hiánypótló módon kompresszibilis közegre, a teljes nyomásviszony-tartományra alkalmaztuk a Borda-féle kiömlőnyílás elméletét, és így analitikus úton származtattuk a gázsugár kontrakcióját leíró összefüggést Borda-féle kiömlőnyílásra. Az analitikus modellt kombinálva a FLUENT számítások eredményeivel félempirikus modellt dolgoztunk ki a kontrakcióra [8][12]. A félempirikus modellt további munkánkban felhasználtuk.

4. MÉRÉSTECHNIKAI FEJLESZTÉS

A szimulációs eszközök kísérleti validációjára az ISO 6358 szabvány által előírt pneumatikus vizsgálóberendezést építettünk ki.

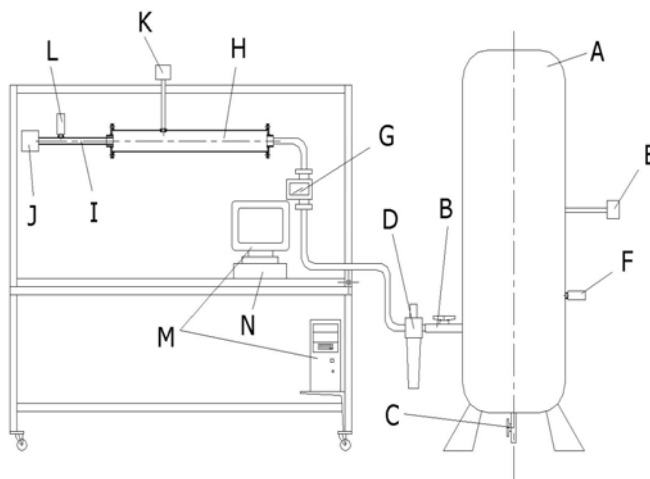
Jelenlegi ismereteink szerint a mérőberendezés ilyen fejlettségi szinten Magyarországon egyedülálló. Igény esetén ezt a mérési kapacitást kutatócsoportunk a magyar ipar számára felajánlja pneumatikus elemek, pl. kalibrációs fűvókák tesztelésére is.

A mérőberendezés tagoltsága – sűrített levegő-forrás (kompresszor és tartály), szűrő, csepleválasztó, állítható nyomásszabályzó, elzárószelep, áramlásmérő, hőmérséklet- és nyomásmérő csövek, mérőkeret – valamint a kiegészítő berendezésekkel (különböző tartályok, csövezetek) való ellátottság lehetővé teszi, hogy egyedi, a szabványostól eltérő mérési

elrendezéseket is kialakíthassunk igény szerint. A mérőberendezés ISO 6358 szabvány szerinti jellegzetes elrendezése a **3. ábrán** látható.

Méréstechnikai módszertani fejlesztés után a berendezésen méréseket végeztünk a szimulációs eszközök kísérleti validációja érdekében [6][7][9][10][14].

- A- Sűrítettlevegő-tartály
- B- Elzárószelep
- C- Lefúvatószelep
- D- Légszűrő és nyomás-stabilizáló
- E- Tartályhőmérséklet-mérő
- F- Tartálynyomás-mérő
- G- Áramlásmérő
- H- Hőmérsékletmérő cső
- I- Nyomásmérő cső
- J- Mért rendszerelem
- K- Hőmérséklet-távadó
- L- Nyomástávadó
- M- Adatgyűjtő PC
- N- Interface



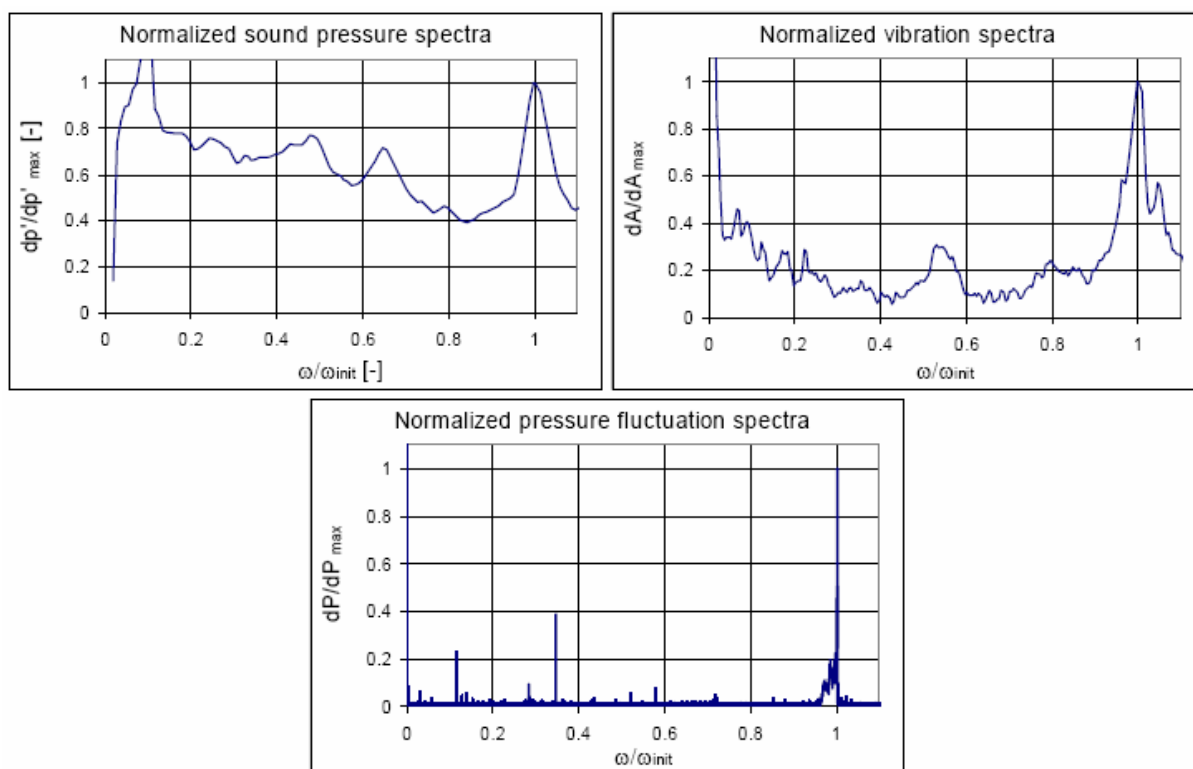
3. ábra. ISO 6358 szerinti mérési elrendezés [7]

5. ÖSSZETETT RENDSZEREK SZIMULÁCIÓJA

A kísérletileg validált szimulációs modelleket összetett pneumatikus rendszerek dinamikus modellezésére használtuk fel. A vizsgálati esettanulmányokat a jármű-fékrendszereket gyártó ipar igényei szerint határoztuk meg. Vizsgáltuk a gyakorlati szempontból kritikus szelepszivárgás hatását, és felfedtük, hogy e viselkedés helyes modellezéséhez valamint mérnöki kézben tartásához a tömítőgyűrű rugalmas hatását figyelembe kell vennünk, és a tömítés keménységét az adott feladathoz illeszkedően kell megválasztanunk [11].

Egy másik esettanulmányban egy zaj és rezgés miatt reklamált szabályzott pneumatikus berendezés kombinált szimulációját valamint hangnyomásszint-, nyomásfluktuáció- és rezgésmérését végeztük el [13]. A szimuláció és a mérések (**4. ábra**) eredményei egyöntetűen a rezonanciára utaló viselkedést mutattak ki. A szimulációs eszköz ismételt, célirányos alkalmazásával kimutattuk, hogy a berendezésben alkalmazott visszacsapó szelep helyretolórugójának keménységét és az előfeszítést csökkentve, valamint a szelepgeometriát megfelelően módosítva a rezonancia elkerülhető. Javaslatlétünk helyességét az utólagos mérések alátámasztották.

Egy másik ipari esettanulmányban – amelyet titoktartási kötelezettségünk miatt az OTKA projekt lezárásáig nem publikálhattunk – egy flexibilis tömítőelemmel ellátott szelep rezonáns viselkedésének oknyomozása és a rezonancia elhárítására irányuló konstrukciós javaslatlét volt a feladatunk. Itt a tömítőelem Shore keménységének, befoglaló méretének és a tömítőél-geometriának a módosítása vezetett célra.



4. ábra. Mért hangnyomásszint-, rezgés- és nyomásingadozás-spektrumok [13]

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az OTKA projekt során az alábbi, nemzetközi szinten érdeklődésre számot tartó, új tudományos eredményeket értük el:

- Többféle fizikai alrendszer tartalmazó, szabályozott pneumatikus rendszerek modellezési módszertanának átfogó kidolgozása AMESim környezetben; speciális új rendszerelem-modellek (gázdinamikai csőmodell, mágnesszelep, membrános fékkamra) kifejlesztése.
- Szelepníylásokban kialakuló áramlás részleteinek feltárása numerikus áramlástani eszközökkel, széles nyomásviszony-tartományban. A szelepekre jellemző átfolyási számot (kontrakció) leíró összefüggések számítási empiria alapján történő pontosítása. Borda-féle kontrakció elméleti levezetése a teljes nyomásviszony-tartományra, analitikus kontrakció-modell. Az analitikus és empirikus modell ötvözése félempirikus összefüggések formájában.
- Méréstechnikai fejlesztés és mérési módszertan kidolgozása, pneumatikus rendszerelemek ISO szabvány szerinti és attól célirányosan eltérő kísérleti vizsgálata érdekében.
- A szimulációs modellek speciális alkalmazása rendellenes üzemállapotok – szivárgás, rezonancia – oknyomozására. A szimuláció alapján mérésekkel igazolt konstrukciós javaslattétel a rendellenes üzem elhárítására.

A projekt összefoglaló eredményeit az International Journal of Heat and Fluid Flow c. nemzetközi folyóiratban tervezzük publikálni, különös tekintettel a pneumatikus szelepek terén végzett munkánkra. Ez a publikációs tevékenység túlmutat az OTKA projekt időkeretén.

IRODALOMJEGYZÉK

Az OTKA projekt kezdete előtt készült publikációink a projekt témájában:

- [1] Szente, V., Vad, J. (2001), "Computational and Experimental Investigation on Solenoid Valve Dynamics", Proc. **2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, Como, Italy, Vol. I., pp. 618-623.
- [2] Istók, B., Hős, Cs., Szente, V., Kristóf, G., Vad, J. (2001), "On the Simulation of Gas Dynamic Pipe Flow Effects in AMESim Environment", Proc. **MICROCAD'2001 Konferencia (International Computer Science Conference)**, Miskolc, Hungary, pp. 41-46.
- [3] Szente, V., Hős, Cs., Istók, B., Vad, J., Kristóf, G. (2001), „Gas Dynamic Pipe Flow Effects in Controlled Pneumatic Systems – A Simulation Study”, **Periodica Polytechnica**, Mechanical Engineering Series, Vol. 45, Issue 2., pp. 239-250.
- [4] Szente, V., Vad, J., Lóránt, G., Fries, A. (2001), "Computational and Experimental Investigation on Dynamics of Electric Braking Systems", Proc. **7th Scandinavian International Conference on Fluid Power**, Linköping, Sweden, Vol. I, pp. 263-75.
- [5] Istók, B., Vad, J., Szabó, Zs., Gáspár, T., Németh, H., Lóránt, G. (2002), „On the Resonance Effects of Pneumatic Unloader Valves”, Proc. **3rd International Fluid Power Conference**, Aachen, Germany, Vol. 2., pp. 581-592.

Az OTKA projekt nyilvántartási számára hivatkozó publikációink:

- [6] Szente, V., Vad, J. (2002), „Computational and Experimental Investigation on the Flow Characteristics of Electropneumatic Valves”, Proc. **GÉPÉSZET'2002 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)**, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary, Vol. 1., pp. 431-435.
- [7] Tajti, Á., Mózer, Z., Szente, V., Vad J. (2003), „Comparative Experimental Studies on the Fluid Mechanical Behavior of a Pneumatic Valve”, Proc. **MICROCAD'2003 Konferencia (International Computer Science Conference)**, Miskolc, Hungary.
- [8] Szente, V., Vad, J. (2003), „A Semi-Empirical Model for Characterisation of Flow Coefficient for Pneumatic Solenoid Valves”, **Periodica Polytechnica**, Mechanical Engineering Series, Vol. 47, Issue 2., pp.131-142.
- [9] Mózer, Z., Tajti, Á., Szente, V. (2003), „Experimental Investigation on Pneumatic Components”, Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03), Budapest, pp. 517-524.
- [10] Szente, V., Vad, J. (2003), "Computational and Experimental Investigation on the Flow Characteristics of Small-Scale Pneumatic Valves", Proc. **2nd International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT)**, Victoria Falls, Zambia (CD-ROM), Proc. Abstracts p. 29.
- [11] Istók, B., Szente, V., Vad, J. (2003), "Behavior of a Pneumatic Pressure Regulator Valve under Leakage Circumstances", Proc. **2nd International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT)**, Victoria Falls, Zambia (CD-ROM), Proc. Abstracts p. 63.

- [12] Szente, V., Vad, J. (2004), „Félempirikus modell kisméretű pneumatikus mágnesszelepekre”, **GÉP**, LV. Évf. 2. szám, pp. 22-27.
- [13] Szente, V., Vad, J. (2005), „Noise and Vibration Studies on Pneumatic Circuit Protection Valves”, **XXXVI. Combined Conference on Heavy Vehicles (BusTruck 2005)**, Budapest, Hungary, Paper No. E-07.
- [14] Szente, V., (2006), „Comparison of Different Measurement Methods on Electro-Pneumatic Valves”, Proc. **GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)**, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary (CD-ROM)