Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjének csökkentése passzív áramlásszabályozási módszerrel

Tézisfüzet

Lukács Eszter

okleveles gépészmérnök

Témavezető: Vad János, egyetemi tanár

Áramlástan Tanszék

BUDAPEST, 2023

1 Motiváció

A napjainkra jellemző népességrobbanás és az emberiség növekvő komfortigénye miatt az energiafogyasztás jelentős méreteket ölt, és soha nem látott mértékben növekszik. A globális energiafogyasztás egyik fő tényezője az építőipar, mely a világ teljes energiafelhasználásához mintegy 30-40%-ban járul hozzá [1]. A mérnöktársadalom növekvő energiatudatosságának köszönhetően az 1970-es évek óta (az első olajválság hatására [2]) számos olyan direktíva látott napvilágot, melyek az épületek energiafelhasználásának általános csökkentését célozzák meg. Az egyre szigorodó előírások azonban nem érik el céljukat, az épületek energiafogyasztása továbbra is növekvő tendenciát mutat [1, 2], ami a már említett népességnövekedésnek és a fokozott kényelmi igényeknek tudható be.

Az újépítésű, légtömör nyílászárókkal felszerelt épületek természetes lélegzése megszűnik, így ezekben nélkülözhetetlen a mesterséges szellőzőrendszerek alkalmazása, mely jelentős mértékben hozzájárul az épület, és ezáltal a globális energiafogyasztáshoz [3]. Következésképpen szükséges kiemelt figyelmet fordítanunk ezen rendszerek energiahatékony tervezésére és üzemeltetésére, például a légcsatornarendszerekben fellépő veszteségek minél pontosabb meghatározásával (a szellőzőventilátor munkapontjának pontos előrejelzése érdekében), valamint az egyes légcsatorna elemek egyedi veszteségeinek csökkentésével.

A gépi szellőzés területe azért különösen érdekes, mert a légcsatornák – a folyadékszállítás esetén megszokott kör keresztmetszetű vezetékektől eltérően – gyakran téglalap keresztmetszetűek. Míg a kör keresztmetszetű légcsatorna elemek ajánlott méreteit a szabványok egyértelműen rögzítik [4], addig a téglalap keresztmetszetű elemeket gyakran a megrendelő egyedi igényei alapján gyártják. A lehetséges geometriák széles skálája miatt a gyártók gyakran nem szolgáltatnak a hidraulikai számításokhoz szükséges adatokat, ezért a téglalap keresztmetszetű légcsatorna elemek esetén különösen hasznos, ha rendelkezésre áll egy megfelelő pontosságú empirikus képlet az adott elemek veszteségének számításához. A légcsatorna-hálózat ellenállását adó számos légtechnikai elem közül jelen tanulmány a hirtelen keresztmetszet-növekedéseket, más néven Borda-Carnot átmeneteket tárgyalja.

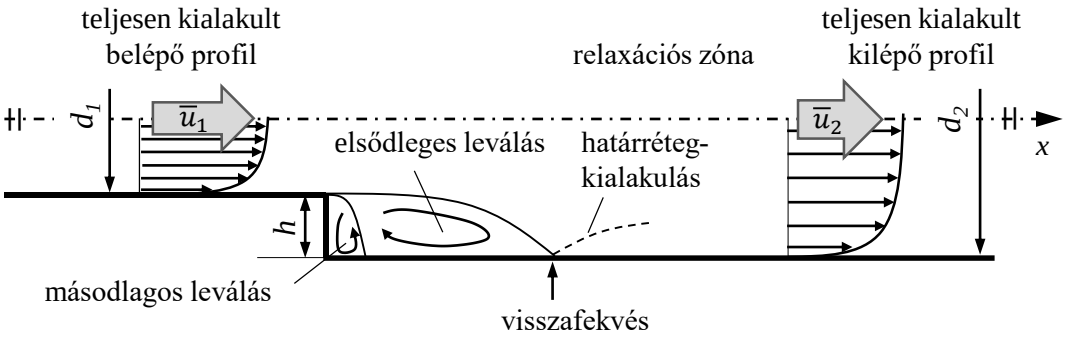
A keresztmetszet-növelő elemek légcsatornában való beépítésének célja kettős: egyrészt csökkenti az áramló levegő sebességét, ezáltal mérsékli a hidraulikai veszteségeket és az áramlás által keltett zajt, másrészt alkalmas a rendszerben uralkodó statikus nyomás növelésére. Az áramlási keresztmetszet növelésének hatékony módja a veszteség szempontjából optimális ~6-12°-os nyílásszögű diffúzorok alkalmazása [5], a gyártok palettáján megtalálhatóak azonban ennél nagyobb nyílásszögű diffúzorok is (13° – 67°), míg a vonatkozó légtechnika szabványok a maximális nyílásszöget 60°-ban rögzítik [4, 6]. Fontos azonban tudnunk, hogy a 40° – 60° nyílásszögű diffúzorok vesztesége nagyobb, mint a Borda-Carnot átmenet – azaz a 180°-os diffúzor – vesztesége [5]. A hirtelen keresztmetszet-növekedések további előnye, hogy kis méretük miatt olyan helyre is betervezhetők, ahol az optimális nyílásszöggel rendelkező, ezáltal hosszú diffúzorok alkalmazásának az épületgépészetre jellemző helyhiány gátat szab.

Jelen disszertáció célja a négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet veszteségének meghatározása és csökkentése. Bár a hirtelen keresztmetszet-növekedéseket tárgyaló szakirodalmi források száma igen magas, a négyzet keresztmetszetű elemekre vonatkozó ismereteink hiányosak, kutatásuk érdekes új eredményekkel bővítheti tudásunkat.

2 Kutatási célok és módszerek

Áramlási jellemzők – #1 kutatási cél

Az 1. ábra kvalitatív módon szemlélteti a kör keresztmetszetű Borda-Carnot átmenetben kialakuló főbb áramlási struktúrákat. A felvízi oldalon az áramlást kialakult turbulens profil jellemzi. A hirtelen keresztmetszet-növekedés éles lépcsője a határréteg geometria által indukált leválását idézi elő. A levált határréteg az alvízi oldalon nyíróréteg formájában jelenik meg, mely kijelöli a főáramlás és a recirkulációs zóna közötti határt. A recirkulációs zóna egy nagyobb mozgási energiájú elsődleges és egy alacsonyabb sebességgel jellemzett, a lépcső tövében kialakuló másodlagos leválási buborékra bontható. Az elsődleges leválás alvízi határa az ún. visszafekvési zóna, melyen túl a folyadékban megszűnik a visszaáramlás. Az áramlás irányában tovább haladva a relaxációs zónában újra kialakul a határréteg, majd további sebesség-átrendeződés következtében az áramlás fokozatosan eléri a teljesen kialakult állapotot.



1. ábra

Fig. 1 Kör keresztmetszetű Borda-Carnot átmenetben kialakuló főbb áramlási struktúrák.

A Borda-Carnot átmenetben kialakuló áramlási tartományt leíró Reynolds-számot (Re_1) az (1) egyenlet, míg az elem geometriáját jellemző keresztmetszet-viszonyt a (n_{AR}) a (2) egyenlet definiálja.

$$Re_1 = \frac{\overline{u}_1 \cdot d_1}{\nu} \tag{1}$$

$$n_{AR} = \frac{A_2}{A_1} \tag{2}$$

, ahol $\overline{u}_1$ az főáramlási irányú sebesség felülettel súlyozott átlaga, d_1 a felvízi oldali cső belső átmérője (négyzetes geometria esetén hidraulikai átmérője), ν a folyadék kinematikai viszkozitása, és A_1 valamint A_2 a felvízi és alvízi oldali csőkeresztmetszetek.

Szellőzőrendszerekben mind az első, mind a másodlagos leválási zóna fontos gyakorlati jelentőséggel bír. A visszafekvési hossz azt keresztmetszet-növekedés síkjától számított minimális távolságot szabja meg, amely alatt – a visszaáramlás elkerülése érdekében – a légvezetékbe sem szabályozó elemek, sem mérőeszközök beépítése nem javasolt. A másodlagos leválási zóna esetében a leválási buborékot kitöltő alacsony sebességű örvény magában tarthatja a légvezetékbe bekerülő szennyezőket, mely a por felhalmozódását és a kórokozók elszaporodását eredményezheti. Következésképpen a légcsatorna-tisztító nyílásokat érdemes a másodlagos leválás határain belülre telepíteni, mely alátámasztja a zóna vizsgálatának szükségességét.

Szakirodalmi források alapján a kör keresztmetszetű Borda-Carnot átmenetben kialakuló visszafekvési hossz 5 – 11h tartományba esik (ahol h a lépcsőmagasság) [7, 8]. A másodlagos leválási zóna jelenlétét és jellemzőit a szakirodalom csak elvétve vizsgálja [9], kiterjedése várhatóan 1 – 2h nagyságrendbe esik. A szakirodalmi források elemzése alapján megállapítható, hogy míg kör keresztmetszetű átmenetekre vonatkozóan jelentős mennyiségű információ hozzáférhető, addig a négyzet keresztmetszetben kialakuló áramlási struktúrák (elsődleges és másodlagos leválási zónák) szisztematikus vizsgálata nem áll rendelkezésre. Ez rávilágít a további kutatások szükségességére, és definiálja az első kutatási célt:

#1 kutatási cél: négyzetes Borda-Carnot átmenetben kialakuló áramlási struktúrák, azaz az elsődleges és másodlagos leválási zónák kiterjedésének szisztematikus vizsgálata a Reynolds-szám és a keresztmetszetviszony függvényében.

Össznyomásveszteség – #2 kutatási cél

A különböző légtechnikai elemek a hálózatban veszteséget generálnak, mely az elem által indukált fokozott örvényképződésnek, sebesség-átrendeződésnek és csősúrlódásnak tulajdonítható. Az elem által okozott, felvízi oldali dinamikus nyomással ($\overline{p}_{dyn,1}$) dimenziótlanított össznyomásveszteség (Δp_{tot}) az ún. veszteségtényező, melyet a (3) egyenlet definiál:

$$\zeta = \frac{\Delta p_{tot}}{\overline{p}_{dyn,1}} \tag{3}$$

A Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjének (ζ_{BC}) meghatározására – a csőszerelvények között egyedülálló módon – létezik egy félempirikus módon levezetett képlet, melyet a (4) egyenlet mutat be. Az egyenlet alapján a hirtelen keresztmetszet-növekedés veszteségtényezője kizárólag az elem keresztmetszetviszonyától függ:

$$\zeta_{BC} = \left(1 - \frac{1}{n_{AR}}\right)^2 \tag{4}$$

A (4) egyenlet gyakorta szerepel áramlástan tankönyvekben [10, 11] és épületgépészeti kézikönyvekben is [12, 13]. Bár a (4) összefüggés egyszerűségéből adódóan igen praktikus, fontos megemlíteni, hogy megalkotása során számtalan egyszerűsítő feltétel került bevezetésre, amelyek adott paramétertartományokon belül jelentős mértékben befolyásolhatják a veszteségtényezőt. Az egyik ilyen egyszerűsítő feltétel a gyakorlat szempontjából irrelevánsnak tekinthető egyenletes beáramlás feltételezése, a teljesen kialakult belépő sebességprofil helyett. Ezen egyszerűsítések hatása, valamint a négyzetes Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjének átfogó tárgyalása a szakirodalomban csak részben fellelhető, mely előre vetíti a második kutatási célt:

#2 kutatási cél: négyzetes Borda-Carnot átmenetek veszteségtényezőjének szisztematikus vizsgálata a Reynolds-szám és a keresztmetszetviszony függvényében; továbbá egy a négyzetes Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjét a (4) egyenletnél pontosabban leíró félempirikus összefüggés kidolgozása, valamint a félempirikus módszer érvényességi tartományának megadása és bizonytalanságának becslése.

Statikus nyomásnövekedés – #3 kutatási cél

Diffúzorokban kialakuló áramlások esetén a terület növekedése miatt az áramlási sebesség, tehát a dinamikus nyomás csökken, mely a statikus nyomásnövekedését eredményezi. A hirtelen keresztmetszet-növekedést – mely lényegében egy 180°-os nyílásszögű diffúzor – ezért gyakran jellemzik statikus nyomásvisszanyerési tényező (c_{SPR}) alapján [5, 11, 13]. A statikus nyomásvisszanyerési tényező ((5) egyenlet) az elem által indukált statikus nyomásnövekedés (Δp_{SPR}) felvízi oldali dinamikus nyomással ($\overline{p}_{dyn,1}$) dimenziótlanított értéke:

$$c_{SPR} = \frac{\Delta p_{SPR}}{\overline{p}_{dyn,1}} \tag{5}$$

A Borda-Carnot átmenet statikus nyomásvisszanyerésének leírására – a veszteség-tényezőhöz hasonlóan – létezik egy széles körben elterjedt, egyszerűsített képlet, amelyet a (6) egyenlet ad meg:

$$c_{SPR,BC} = \frac{1}{n_{AR}}\left(1 - \frac{1}{n_{AR}}\right) \tag{6}$$

Érdemes megvizsgálni a (6) egyenlet által leírt statikus nyomásvisszanyerési tényező értékét a keresztmetszetviszony két szélsőértékére. Abban az esetben, ha n_{AR} = 0, nincs keresztmetszet-növekedés, azaz nem következik be statikus nyomásnövekedés sem. Hasonlóképpen, az $n_{AR} \rightarrow \infty$ esetén – amikor a cső egy végtelen nagynak tekinthető térbe, például a szabadba nyílik – a statikus nyomásnövekedés szintén 0, mivel a csőből kilépő szabadsugárban uralkodó statikus nyomás megegyezik a környezeti nyomással, mely a kilépési keresztmetszettől távolodva nem változik. Következésképpen a statikus nyomásnövekedésnek a nulla és a végtelen keresztmetszetviszonyok közötti tartományon maximuma van. Ez a maximum a (6) egyenlet a

keresztmetszetviszony szerinti parciális deriválásával analitikus könnyedén kifejezhető. Meglepő módon azonban ez a levezetés a szakirodalomban nem fellelhető.

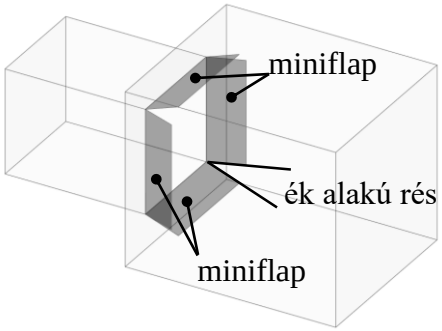
Míg a kör keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet nyomásvisszanyerését a szakirodalom – bár csekély mértékben, de – tárgyalja, addig a négyzetes átmenetek átfogó elemzése hiányzik. Ennek fényében a 3. kutatási cél a következőképpen hangzik:

#3 kutatási cél: négyzetes Borda-Carnot átmenetek statikus nyomásvisszanyerési tényezőjének szisztematikus vizsgálata a Reynolds-szám és a keresztmetszetviszony függvényében; továbbá egy a négyzetes Borda-Carnot átmenet statikus nyomásvisszanyerési tényezőjét a (6) egyenletnél pontosabban leíró félempirikus összefüggés kidolgozása, különös tekintettel a statikus nyomásvisszanyerés optimális keresztmetszetviszony esetén kialakuló maximumára, valamint a félempirikus módszer érvényességi tartományának megadása és bizonytalanságának becslése.

Veszteségcsökkentés – #4 kutatási cél

A Borda-Carnot átmenet geometriájába való beavatkozást általában két fő cél vezérel: egyrészt a visszafekvési hossz csökkentése [14], másrészt az elem energetikai jellemzőinek javítása [15-17]. A geometria módosítása jellemzően terelőelemek beépítését vagy a keresztmetszet-növekedés kontúrjának kismértékű megváltoztatását jelenti. Ezeknek a külső energiaforrást nem igénylő kisebb módosításoknak az összefoglaló neve: passzív áramlásszabályozási módszerek.

A szakirodalomban fellelhető néhány, a kör keresztmetszetű Borda-Carnot átmenetben kialakuló áramlást megcélzó passzív áramlásszabályozási módszer; a négyzetes átmenetek tárgyalása azonban ezúttal is hiányos. Ezt a hiányt pótlandó, kifejlesztettem egy egyszerű, költséghatékony és robusztus passzív áramlási módszert, mely légtechnikai rendszerekben megjelenő négyzetes Borda-Carnot átmenetekbe könnyen telepíthető, és a veszteségtényezőt hatékonyan csökkenti. A javasolt, ún. miniflap módszert a 2. ábra mutatja be.



2. ábra Négyzetes Borda-Carnot átmenet passzív áramlásszabályozása: a miniflap módszer.

A miniflapek rövid, téglalap alakú állítható lemezek a hirtelen keresztmetszet-növekedés konvex sarkához helyezve, a felvízi oldali csatorna anyagából kihajlítva. A lemezek kihajlításával egy a sarkainál felmetszett rövid diffúzort kapunk. Az áramlásszabályozó elemek a csatorna anyagából lemezmegmunkálással könnyen és gazdaságosan előállíthatók. A negyedik kutatási célkitűzés a következő képpen fogalmazható meg:

#4 kutatási cél: négyzetes Borda-Carnot átmenetbe helyezett áramlásszabályozó elemek, ún. miniflapek – veszteségtényezőre gyakorolt hatásának szisztematikus vizsgálata a Reynolds-szám, a keresztmetszetviszony, valamint a miniflapek szögének és hosszának függvényében; továbbá egy a miniflapekkel felszerelt négyzetes Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjét leíró félempirikus összefüggés kidolgozása, valamint a félempirikus módszer érvényességi tartományának megadása és bizonytalanságának becslése.

Módszertan

Az alkalmazott kutatási módszertan kísérleti, numerikus és elméleti módszereket is magába foglalt. Először méréseket végeztem egy nyitott áramú, szívott üzemű szélcsatornában, egy a gyakorlat szempontjából releváns paramétertér szűk tartományán. Az áramlási tér részleteit lézer-Doppler anemométerrel (LDA) térképeztem fel, míg a veszteségek meghatározását fali statikus nyomásmérési adatok alapján végeztem. A vizsgálat paramétertartományt a mérésekhez validált numerikus szimulációk segítségével terjesztettem ki. A numerikus szimulációkat az Ansys Workbench 2021R2 kereskedelmi szoftvercsomaggal végeztem. A vizsgálandó konfigurációk nagy száma miatt két Reynolds-átlagolt Navier-Stokes-turbulenciamodellt alkalmaztam, az általánosított k-ω (generalized k-ω: GEKO) és a Reynolds-feszültségmodell Stress-BSL változatát (RSM Stress-BSL). Félempirikus összefüggéseket alkottam a négyzetes Borda-Carnot átmenet veszteség- és statikus nyomásvisszanyerési tényezőinek meghatározására, miniflap nélküli és minilflapekkel felszerelt esetekre egyaránt, mely összefüggéseket a numerikus szimulációkból származó eredményekkel validáltam, valamint megbecsültem a bizonytalanságukat.

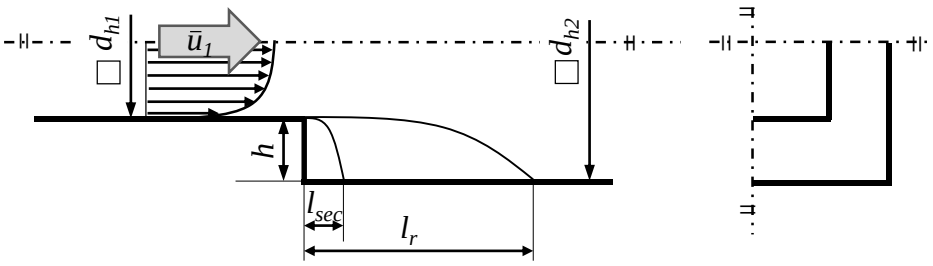
A következő fejezet a fent bemutatott négy kutatási célhoz kapcsolódó új tudományos eredményeket foglalja össze, tudományos tézisek formájában.

3 Tézisek

A szakirodalomban nem állnak rendelkezésre a szellőzőrendszerekben gyakran előforduló négyzetes Borda-Carnot átmenetekben kialakuló áramlási struktúrákat, különösen az elsődleges és másodlagos leválási zónákat szisztematikusan tárgyaló források. A szakirodalom e hiányosságának pótlására kiterjedt LDA- és fali statikus nyomásmérésekhez validált numerikus szimulációkat végeztem négyzetes Borda-Carnot átmenetekben, kialakult turbulens belépő profil esetére. A szimulációk segítségével szisztematikusan vizsgáltam a másodlagos leválási zóna kiterjedését és a visszafekvési hosszt, a szellőzőrendszerekre jellemző n_{AR} *= 1.5 – 6.4 keresztmetszetviszony, és* Re_1 *= (0.09 – 3.0)·10*^{5} *Reynolds-szám tartományban. A visszafekvési hossz azt keresztmetszet-növekedés síkjától számított minimális távolságot szabja meg, amely alatt – a visszaáramlás elkerülése érdekében – a légvezetékbe sem szabályozó elemek, sem mérőeszközök beépítése nem javasolt. A másodlagos leválási zóna esetében a leválási buborékot kitöltő alacsony sebességű örvény magában tarthatja a légvezetékbe bekerülő szennyezőket, mely a por felhalmozódását és a kórokozók elszaporodását eredményezheti. Következésképpen a másodlagos leválási zóna kiterjedése értékes információt nyújt a tisztítónyílások megfelelő elhelyezésével kapcsolatban.*

1. Tézispont – négyzetes Borda-Carnot átmenetben kialakuló áramlási struktúrák

Négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenetben kialakuló áramlás esetén a másodlagos leválási buborék maximális és átlagos kiterjedését, valamint az elsődleges leválási buborék (visszafekvési hossz) minimális, maximális és átlagos kiterjedését a T1.1 táblázat adja meg. A vizsgált geometriát és az áramlási struktúrák sematikus rajzát a T1.1 ábra, a fizikai feltételezéseket és az érvényességi tartományokat a T1.2 táblázat mutatja. A T1.2 táblázatban szereplő változókat a (T1.1) – (T1.3) egyenletek definiálják. A tézisben használt jelöléseket a T1.3 táblázat foglalja össze.



T1.1 ábra Négyzetes Borda-Carnot átmenet geometriája és az áramlási struktúrák sematikus rajza.

T1.1 táblázat A négyzetes Borda-Carnot átmenetben kialakuló áramlási struktúrák jellemző méretei.

	minimum	**maximum**	**átlag**
Másodlagos leválás hossza (l_{sec})		1 – 6h	1 – 2h
Visszafekvési hossz (l_r)	5 – 10h	15 – 42h	8 – 16h

T1.2 táblázat Fizikai feltételezések és érvényességi tartományok.

Elnevezés	**Leírás**
Az áramlás jellege	egyfázisú, stacioner, adiabatikus, turbulens
Az áramló közeg anyagjellemzői	állandó sűrűség és viszkozitás
Reológia	newtoni közeg
Geometria	négyzetes Borda-Carnot átmenet
Csőfalak érdessége	hidraulikailag sima
A hozzááramlás jellemzői	kialakult csőáramlás
n_{AR}	1.5 – 6.4
Re_1	(0.09 – 3.0)·10^5

$$A_1 = d_{h1}^2;\ A_2 = d_{h2}^2 \tag{T1.1}$$

$$n_{AR} = \frac{A_2}{A_1} \tag{T1.2}$$

$$Re_1 = \frac{\overline{u}_1 \cdot d_{h1}}{\nu} \tag{T1.3}$$

T1.3 táblázat Jelölések jegyzéke.

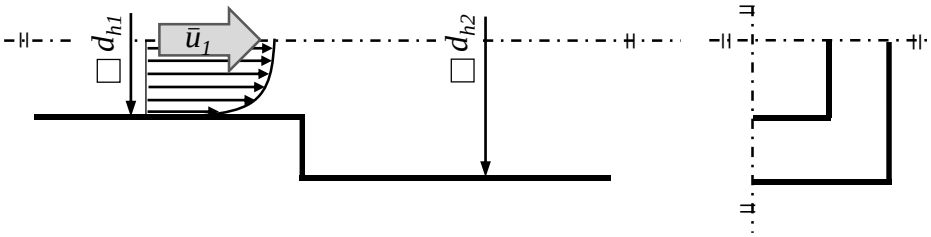
Jelölések		
A	a csatorna keresztmetszete	m^2
d_h	a csatorna hidraulikai átmérője	m
h	lépcsőmagasság	m
l_{sec}	a másodlagos leválás hossza	m
l_r	visszafekvési hossz	m
n_{AR}	keresztmetszetviszony	1
Re	Reynolds-szám	1
$\overline{u}$	tengelyirányú átlagsebesség	m/s
ν	az áramló közeg kinematikai viszkozitása	m^2/s
Alsó indexek		
1	keresztmetszet-bővülés felvízi oldala	
2	keresztmetszet-bővülés alvízi oldala	

Tézisponthoz kapcsolódó publikációk: [P1], [P2], [P3]

Az energetikailag hatékony szellőztető rendszerek kialakításához elengedhetetlen feltétel a légcsatorna-elemek hidraulikai ellenállásának pontos meghatározása. A légtechnikai rendszerekben gyakran előforduló négyzetes Borda-Carnot átmenetek veszteségének kiszámításához rendelkezésre álló félempirikus módszert kritikusan értékeltem, majd átfogó módon kiegészítettem, lehetővé téve ezzel a négyzetes Borda-Carnot átmenetek veszteségének pontosabb meghatározását, és ezáltal szellőzőrendszerek megbízhatóbb tervezését és üzemeltetését. Kiterjedt LDA- és fali statikus nyomásmérésekhez validált numerikus szimulációkat végeztem négyzetes Borda-Carnot átmenetekben, kialakult turbulens belépő profil esetére. A szimulációk segítségével szisztematikusan vizsgáltam a veszteségtényező értékét a szellőzőrendszerekre jellemző n_{AR} = 1.5 – 6.4 keresztmetszetviszony, és Re_1 = (0.09 – 3.0)·10^5 Reynolds-szám tartományban. A félempirikus módszer bizonytalanságát a numerikus szimulációk eredményei alapján becsültem. A javasolt számítási módszer újdonsága abban rejlik, hogy a szakirodalomban korábban kör keresztmetszetű csatornákra szórványosan rendelkezésre álló leíró egyenleteket egy átfogó munkafolyamatban egyesítettem, valamint alkalmazhatóságát kiterjesztettem négyzet alakú csatornákra is. A javasolt félempirikus modell továbbra is egyszerűen alkalmazható, de pontosabb, mint a szakirodalomban rendelkezésre álló összefüggés.

2. tézis – négyzetes Borda-Carnot átmenet veszteségtényezője

Egy négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet veszteségtényezője meghatározható a (T2.8) egyenletben definiált félempirikus modellel, mely becsült abszolút hibáját a T2.2 ábra adja meg. A számításhoz szükséges bemeneti adatokat a (T2.1) – (T2.3) egyenletek, a számítás lépéseit a (T2.4) – (T2.7) egyenletek, a kimeneti adatokat a (T2.8) egyenlet definiálja. A vizsgált geometriát és a bemeneti adatokat T2.1 ábra, a fizikai feltételezéseket és az érvényességi tartományokat a T2.1 táblázat mutatja. A tézisben használt jelöléseket a T2.2 táblázat foglalja össze.



T2.1 ábra Négyzetes Borda-Carnot átmenet geometriája és a veszteségtényező számításához szükséges bemeneti adatok.

BEMENETI ADATOK:	
$A_1 = d_{h1}^2;\ A_2 = d_{h2}^2$	(T2.1)
$n_{AR} = \dfrac{A_2}{A_1}$	(T2.2)
$Re_1 = \dfrac{\overline{u}_1 \cdot d_{h1}}{\nu}$	(T2.3)

A SZÁMÍTÁS MENETE:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} = 2 \cdot log\left(Re_1\sqrt{\lambda_1}\right) - 0.8 \tag{T2.4}$$

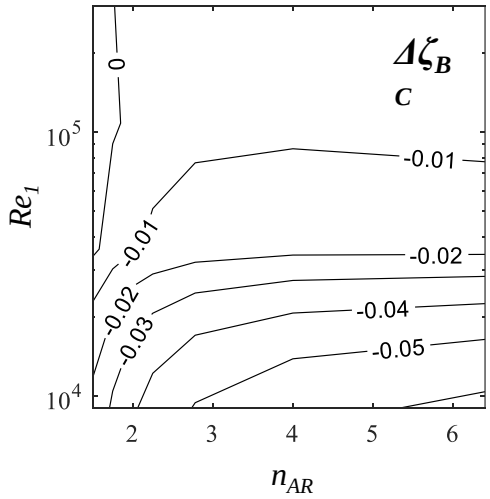
$$\mu \approx \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \tag{T2.5}$$

$$M = \frac{(2\mu+1)^2(\mu+1)}{4\mu^2(\mu+2)} \tag{T2.6}$$

$$N = \frac{(2\mu+1)^3(\mu+1)^3}{4\mu^4(\mu+3)(2\mu+3)} \tag{T2.7}$$

KIMENETI ADATOK:

$$\zeta_{BC} = \frac{\Delta p_{BC}}{\frac{\rho}{2}\bar{u}_1^2} = N - \frac{2M}{n_{AR}} + \frac{2M-N}{n_{AR}^2} \tag{T2.8}$$



T2.2 ábra A félempirikus modellel meghatározott veszteségtényező becsült abszolút hibája.

T2.1 táblázat Fizikai feltételezések és érvényességi tartományok.

Elnevezés	**Leírás**
Az áramlás jellege	egyfázisú, stacioner, adiabatikus, turbulens
Az áramló közeg anyagjellemzői	állandó sűrűség és viszkozitás
Reológia	newtoni közeg
Geometria	négyzetes Borda-Carnot átmenet
Csőfalak érdessége	hidraulikailag sima
A hozzááramlás jellemzői	kialakult csőáramlás
n_{AR}	1.5 – 6.4
Re_1	(0.09 – 3.0)·10^5

T2.2 táblázat Jelölések jegyzéke.

Jelölések		
A	a csatorna keresztmetszete	m^2
d_h	a csatorna hidraulikai átmérője	m
M	impulzuskorrekciós tényező	1
N	kinetikus energiakorrekciós tényező	1
n_{AR}	keresztmetszetviszony	1
Δp_{BC}	Borda-Carnot átmenet nyomásvesztesége	Pa
Re	Reynolds-szám	1
$\overline{u}$	tengelyirányú átlagsebesség	m/s
ζ_{BC}	veszteségtényező	1
$\Delta\zeta_{BC}$	a veszteségtényező abszolút hibája	1
λ	csősúrlódási tényező	1
μ	hatványfüggvény kitevő	1
ν	az áramló közeg kinematikai viszkozitása	m^2/s
ρ	az áramló közeg sűrűsége	kg/m^3
Alsó indexek		
1	keresztmetszet-bővülés felvízi oldala	
2	keresztmetszet-bővülés alvízi oldala	

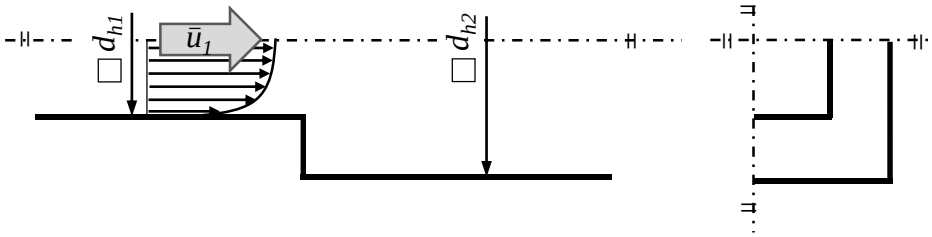
Tézisponthoz kapcsolódó publikációk: [P1], [P2], [P3], [P4]

A légtechnikai rendszerekben gyakran előforduló négyzetes Borda-Carnot átmenetek statikus nyomásvisszanyerésének kiszámításához rendelkezésre álló félempirikus módszert kritikusan értékeltem, majd átfogó módon kiegészítettem, lehetővé téve ezzel a négyzetes Borda-Carnot átmenetek statikus nyomásvisszanyerésének pontosabb meghatározását. Kiterjedt LDA- és fali statikus nyomásmérésekhez validált numerikus szimulációkat végeztem négyzetes Borda-Carnot átmenetekben, kialakult turbulens belépő profil esetére. A szimulációk segítségével szisztematikusan vizsgáltam a veszteségtényező értékét a szellőzőrendszerekre jellemző n_{AR} *= 1.5 – 6.4 keresztmetszetviszony, és* Re_1 *= (0.09 – 3.0)·10*^{5} *Reynolds-szám tartományban. A félempirikus módszer bizonytalanságát a numerikus szimulációk eredményei alapján becsültem. A javasolt számítási módszer újdonsága abban rejlik, hogy a szakirodalomban korábban kör keresztmetszetű csatornákra szórványosan rendelkezésre álló leíró egyenleteket egy átfogó munkafolyamatban egyesítettem, valamint alkalmazhatóságát kiterjesztettem négyzet alakú csatornákra is. A javasolt félempirikus modell továbbra is egyszerűen alkalmazható, de pontosabb, mint a szakirodalomban rendelkezésre álló összefüggés. A kutatást kiegészítettem továbbá a statikus nyomásvisszanyerés számításához használt egyenletek analitikus értékelésével, melyből megállapítható, hogy a maximális nyomásvisszanyerés szempontjából optimálisnak tekinthető keresztmetszetviszony* n_{AR} *= 2. Ez a levezetés a szakirodalomban nem fellelhető.*

3. tézis – négyzetes Borda-Carnot átmenet statikus nyomásvisszanyerési tényezője

Egy négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet statikus nyomásvisszanyerési tényezője meghatározható a (T3.7) egyenletben definiált félempirikus modellel, mely becsült abszolút hibáját a T3.2 ábra adja meg. A számításhoz szükséges bemeneti adatokat a (T3.1) – (T3.3) egyenletek, a számítás lépéseit a (T3.4) – (T3.6) egyenletek, a kimeneti adatokat a (T3.7) egyenlet definiálja. A vizsgált geometriát és a bemeneti adatokat T3.1 ábra, a fizikai feltételezéseket és az érvényességi tartományokat a T3.1 táblázat mutatja. A tézisben használt jelöléseket a T3.2 táblázat foglalja össze.

Egy négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet statikus nyomásvisszanyerési tényezőjének n_{AR} = 2 keresztmetszetviszonynál maximuma van. A statikus nyomás-visszanyerési tényező maximumhelye analitikusan a (T3.7) egyenlet keresztmetszetviszony szerinti parciális deriválásával kapható meg, ahogyan azt a (T3.8) – (T3.9) egyenletek mutatják.



T3.1 ábra Négyzetes Borda-Carnot átmenet geometriája és a statikus nyomásvisszanyerési tényező számításához szükséges bemeneti adatok.

BEMENETI ADATOK:

$$A_1 = d_{h1}^2;\ A_2 = d_{h2}^2 \tag{T3.1}$$

$$n_{AR} = \frac{A_2}{A_1} \tag{T3.2}$$

$$Re_1 = \frac{\overline{u}_1 \cdot d_{h1}}{\nu} \tag{T3.3}$$

A SZÁMÍTÁS MENETE:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} = 2 \cdot log\left(Re_1\sqrt{\lambda_1}\right) - 0.8 \tag{T3.4}$$

$$\mu \approx \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \tag{T3.5}$$

$$M = \frac{(2\mu + 1)^2(\mu + 1)}{4\mu^2(\mu + 2)} \tag{T3.6}$$

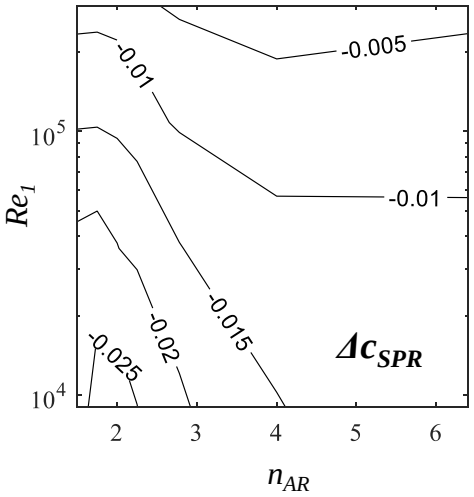
KIMENETI ADATOK:

$$c_{SPR} = \frac{\Delta p_{SPR}}{\frac{\rho}{2}\overline{u}_1^2} = \frac{2M}{n_{AR}} - \frac{2M}{n_{AR}^2} \tag{T3.7}$$

A $c_{SPR,emp}$ MAXIMUMHELYÉNEK ANALITIKUS MEGHATÁROZÁSA

$$\frac{\partial c_{SPR}}{\partial n_{AR}} = 0 \leftrightarrow n_{AR} = 2 \tag{T3.8}$$

$$\left.\frac{\partial^2 c_{SPR}}{\partial n_{AR}^2}\right|_{n_{AR}=2} < 0 \tag{T3.9}$$



T3.2 ábra A félempirikus modellel meghatározott statikus nyomásvisszanyerési tényező becsült abszolút hibája.

T3.1 táblázat Fizikai feltételezések és érvényességi tartományok.

Elnevezés	**Leírás**
Az áramlás jellege	egyfázisú, stacioner, adiabatikus, turbulens
Az áramló közeg anyagjellemzői	állandó sűrűség és viszkozitás
Reológia	newtoni közeg
Geometria	négyzetes Borda-Carnot átmenet
Csőfalak érdessége	hidraulikailag sima
A hozzááramlás jellemzői	kialakult csőáramlás
n_{AR}	1.5 – 6.4
Re_1	(0.09 – 3.0)·10^5

T3.2 táblázat Jelölések jegyzéke.

Jelölések		
A	a csatorna keresztmetszete	m^2
c_{SPR}	statikus nyomásvisszanyerési tényező	1
Δc_{SPR}	a statikus nyomásvisszanyerési tényező abszolút hibája	1
d_h	a csatorna hidraulikai átmérője	m
M	Impulzuskorrekciós tényező	1
n_{AR}	keresztmetszetviszony	1
Δp_{SPR}	statikus nyomásvisszanyerés	Pa
Re	Reynolds-szám	1
$\overline{u}$	tengelyirányú átlagsebesség	m/s
λ	csősúrlódási tényező	1
μ	hatványfüggvény kitevő	1
ν	az áramló közeg kinematikai viszkozitása	m^2/s
ρ	az áramló közeg sűrűsége	kg/m^3
Alsó indexek		
1	keresztmetszet-bővülés felvízi oldala	
2	keresztmetszet-bővülés alvízi oldala	

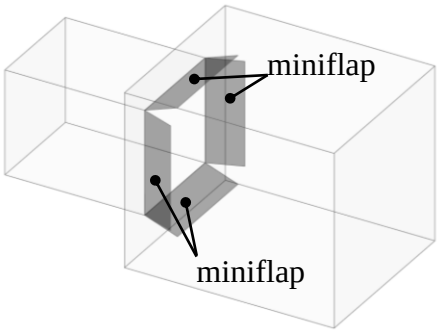
Tézisponthoz kapcsolódó publikációk: [P2], [P3]

Az épületek mesterséges szellőztetése jelentősen hozzájárul az építőipar és ezáltal a globális energiafogyasztáshoz. Következésképpen a szellőztetőrendszerek ésszerű energiafelhasználása fontos szerepet játszik az épületek energiahatékonyságának előmozdításában. Ennek elősegítésére kidolgoztam egy a légtechnikai rendszerekben gyakran alkalmazott négyzetes Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjének csökkentését megcélzó, újszerű passzív áramlásszabályozási módszert, az ún. miniflap módszert. A miniflap módszer hatékonyságának értékeléséhez kiterjedt LDA- és fali statikus nyomásmérésekhez validált numerikus szimulációkat végeztem miniflapekkel kiegészített négyzetes Borda-Carnot átmenetekben, kialakult turbulens belépő profil esetére. A miniflapek hatását szisztematikusan vizsgáltam a következő paramétertartományokban: miniflap hossz l_{mf}/d_{h1} *= 0 – 0.5 →* l_{mf}/h *= 0 – 2.4, miniflap szög* α *= 6° – 18°, négyzetes Borda-Carnot átmenet keresztmetszetviszonya* n_{AR} *= 2 – 6.4, Reynolds-szám* Re_1 *= (0.36 – 3.0)·10*^{5}*. A vizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a miniflap módszer veszteségcsökkentő hatása versenyképessé teszi a négyzetes Borda-Carnot elemet a már használatban lévő négyzetes diffúzorokkal. A miniflappel kiegészített Borda-Carnot elem további előnyei a diffúzrokhoz képest az igen rövid tengelyirányú kiterjedés és könnyű gyárthatóság.*

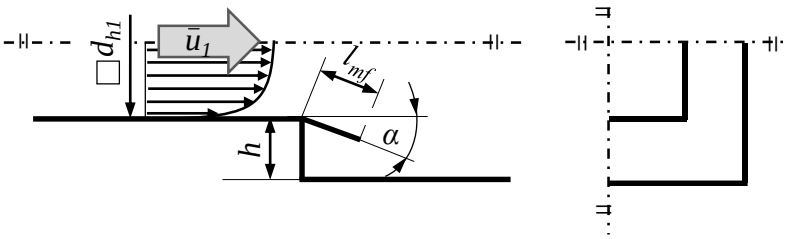
4. tézis – négyzetes Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjének csökkentése

Kidolgoztam egy a négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot elem veszteségtényezőjének csökkentésére alkalmas újszerű, passzív áramlásszabályozási módszert, az ún, miniflap módszert. A miniflapek a hirtelen keresztmetszet-növekedés konvex sarkához illesztett, kisméretű, téglalap alakú áramlásterelő lemezek, melyek sematikus rajzát a T4.1 ábra mutatja. A vizsgált geometriát és a bemeneti adatokat T4.2 ábra mutatja, a fizikai feltételezéseket és az érvényességi tartományokat a T4.1 táblázat definiálja, a használt jelöléseket a T4.2 táblázat foglalja össze.

A minflapek minimális veszteségtényezőhöz tartozó optimális szögbeállítását a (T4.1) egyenlet definiálja. A miniflappel kiegészített négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjét a (T4.2) – (T4.7) egyenletek definiálják, a miniflapek optimális szögállása esetén. A miniflapek optimális hosszát az optimális szögállás esetén a (T4.8) egyenlet definiálja. Az optimális miniflap konfigurációval felszerelt négyzet keresztmetszetű Borda-Carnot átmenet veszteségtényezőjét a (T4.9) egyenlet adja meg.



T4.1 ábra Miniflappel felszerelt négyzetes Borda-Carnot átmenet sematikus rajza.



T4.2 ábra Miniflappel felszerelt négyzetes Borda-Carnot átmenet geometriája és veszteségtényező számításához szükséges bemeneti adatok.

OPTIMÁLIS MINIFLAP SZÖG	
$\alpha_{opt} = 10° \pm 2°$	(T4.1)
VESZTESÉGTÉNYEZŐ SZÁMÍTÁSA $\boldsymbol{\alpha_{opt}}$ ESETÉN	
$\zeta_{MF,\alpha_{opt}} = \zeta_{BC} \cdot \left(a \cdot e^{-b \cdot l_{mf}/h} + c\right)$	(T4.2)
$a = 0.0217 \cdot Re_1^{0.200}$	(T4.3)
$b = 0.253 \cdot Re_1^{0.246}$	(T4.4)
$c = 1.56 \cdot Re_1^{-0.0602}$	(T4.5)
$\zeta_{BC} = N - \frac{2M}{n_{AR}} + \frac{2M - N}{n_{AR}^2}$	(T4.6)
$Re_1 = \frac{\bar{u}_1 \cdot d_{h1}}{\nu}$	(T4.7)
OPTIMÁLIS MINIFLAP HOSSZ	
$l_{mf,opt} = 1h$	(T4.8)
VESZTESÉGTÉNYEZŐ SZÁMÍTÁSA $\boldsymbol{\alpha_{opt}}$, $\boldsymbol{l_{mf,opt}}$ ESETÉN	
$\zeta_{MF,opt} = \zeta_{BC} \cdot 1.56 \cdot Re_1^{-0.0602}$	(T4.9)

T4.1 táblázat Fizikai feltételezések és érvényességi tartományok.

Elnevezés	**Leírás**
Az áramlás jellege	egyfázisú, stacioner, adiabatikus, turbulens
Az áramló közeg anyagjellemzői	állandó sűrűség és viszkozitás
Reológia	newtoni közeg
Geometria	négyzetes Borda-Carnot átmenet
Csőfalak érdessége	hidraulikailag sima
A hozzááramlás jellemzői	kialakult csőáramlás
n_{AR}	1.5 – 6.4
Re_1	$(0.09 – 3.0)\cdot 10^5$
l_{mf}/h	0 – 2.4

T4.2 táblázat Jelölések jegyzéke.

Jelölések		
a, b, c	a modellegyenlet paraméterei	m^2
d_h	a csatorna hidraulikai átmérője	m
h	lépcsőmagasság	m
l_{mf}	miniflap hossz	m
M	impulzuskorrekciós tényező	1
N	kinetikus energiakorrekciós tényező	1
n_{AR}	keresztmetszetviszony	1
Re	Reynolds-szám	1
$\overline{u}$	tengelyirányú átlagsebesség	m/s
α	miniflap szögállás	fok
ζ	veszteségtényező	1
ν	az áramló közeg kinematikai viszkozitása	m^2/s
Alsó indexek		
1	keresztmetszet-növekedés felvízi oldala	
2	keresztmetszet-növekedés alvízi oldala	
BC	Borda-Carnot átmenet miniflap nélkül	
MF	Borda-Carnot átmenet miniflappel	
opt	optimális	

Tézisponthoz kapcsolódó publikációk: [P1], [P2], [P3], [P4], [P5], [P6], [P7]

4 IRODALOMJEGYZÉK

[1] "The critical role of buildings; Perspectives for the clean energy transition", International Energy Agency (IEA), 2019. https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings (accessed Jul. 1, 2023).

[2] A. M. Papadopoulos, "Forty Years of regulations on the thermal performance of the building envelope in Europe: Achievements, Perspectives and challenges," *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 942–952, 2016. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.051

[3] M. González-Torres, L. Pérez-Lombard, J. F. Coronel, I. R. Maestre, and D. Yan, "A review on Buildings Energy Information: Trends, end-uses, fuels and drivers," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 626–637, 2022. doi:10.1016/j.egyr.2021.11.280

[4] *Ventilation for buildings. Sheet metal air ducts and fittings with circular cross section. Dimensions*. EN 1506:2007, 2007.

[5] I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd edition, Mumbai: Jaico Publishing House, 2008.

[6] *Ventilation for buildings. Sheet metal air ducts and fittings with rectangular cross section. Dimensions*. EN 1505:1997, 1997.

[7] A. Nouri-Borujerdi and A. Shafiei Ghazani, "Simulation of compressible and incompressible flows through planar and axisymmetric abrupt expansions," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 141, no. 11, 2019. doi:10.1115/1.4043497

[8] W. J. Devenport and E. P. Sutton, "An experimental study of two flows through an axisymmetric sudden expansion," *Experiments in Fluids*, vol. 14, no. 6, pp. 423–432, 1993. doi:10.1007/bf00190197

[9] R. P. Durrett, W. H. Stevenson, and H. D. Thompson, "Radial and axial turbulent flow measurements with an LDV in an axisymmetric sudden expansion air flow," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 110, no. 4, pp. 367–372, 1988. doi:10.1115/1.3243565

[10] P. M. Gerhart and R. J. Gross, *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1985.

[11] F. M. White and H. Xue, *Fluid Mechanics*. 9th edition. New York: McGraw-Hill education, 2021.

[12] *2001 Ashrae Handbook: Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2001.

[13] E. Recknagel, E. Sprenger, and E.-R. Schrameck, *Fűtés- és klímatechnika 2000* [Heating and air-conditioning technology], Budapest-Pécs: Dialóg Campus Kiadó, 2000.

[14] N. Benard, P. Sujar-Garrido, J.-P. Bonnet, and E. Moreau, "Control of the coherent structure dynamics downstream of a backward facing step by DBD plasma actuator," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 61, pp. 158–173, 2016. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.04.009

[15] Y. Bae and Y. I. Kim, "Prediction of local pressure drop for turbulent flow in axisymmetric sudden expansions with chamfered edge," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 2, pp. 229–239, 2014. doi:10.1016/j.cherd.2013.07.016

[16] D. Mandal, S. Bandyopadhyay, and S. Chakrabarti, "A numerical study on the flow through a plane symmetric sudden expansion with a fence viewed as a diffuser," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 8, pp. 210–233, 1970. doi:10.4314/ijest.v3i8.18

[17] S. Ghosh, D. K. Pratihar, B. Maiti, and P. K. Das, "Optimum design of a two step planar diffuser: A hybrid approach," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 4, no. 3, pp. 415–424, 2010. doi:10.1080/19942060.2010.11015328

5 A SZERZŐ TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI

[P1] E. Lukács and J. Vad, “Flow topology and loss analysis of a square-to-square sudden expansion relevant to HVAC systems: A case study”, *Journal of Building Engineering*, vol. 41, p. 102802, 2021. doi:10.1016/j.jobe.2021.102802

[P2] E. Lukács, “Turbulens áramlás numerikus szimulációja négyzet keresztmetszetű csatornában” (Numerical simulation of turbulent flow in a duct of square cross-section), In: *Tavaszi Szél 2022 / Spring Wind 2022 II*., Pécs, Hungary, 2022, pp. 423-438. ISBN 978-615-6457-13-4

[P3] E. Lukács and J. Vad, “Parameter Study of a Loss Reducing Passive Flow Control Method in a Square-to-square Sudden Expansion”, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, vol. 67, no. 3, pp. 204–213, 2023. doi: https://doi.org/10.3311/PPme.22389

[P4] E. Lukács and J. Vad, “On the track of the Borda-Carnot loss”, in *Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF’15)*, 2015.

[P5] E. Lukács and J. Vad, “A passive loss reduction method of square-to-square sudden expansions”, *Energy and Buildings*, vol. 266, p. 112113, 2022. doi:10.1016/j.enbuild.2022.112113

[P6] E. Lukács and T. Régert, “Pressure loss reduction of a borda–Carnot sudden expansion applying a passive flow control method”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 226, no. 2, pp. 182–191, 2011. doi:10.1177/0957650911429917

[P7] E. Lukács and T. Régert, “Reducing the pressure loss in a sudden expansion by passive flow control elements”, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows*, 2011, pp. 1–6.