Szakmai beszámoló az OTKA PD 76217 jelű projekt keretein belül elért eredményekről

Projektvezető: Dr. Régert Tamás, egyetemi docens

2011. augusztus 31.

1. Bevezető

Az OTKA által támogatott PD 76217 azonosítójú poszt-doktori típusú projekt összesen 8191ezer forint értékű támogatást biztosított három éves kutatási időtartamra abból a célból, hogy a repüléstechnikai iparban megismert, ott meghonosodott áramlásszabályozási módszereket, elveket az áramlástechnikai folyamatokat hasznosító ipari létesítmények, légtechnikai rendszerek minőségi javítása érdekében történő alkalmazási lehetőségeiket kutassuk. A kutatási terv megcélozta a passzív-, illetve az aktív áramlásszabályozási módszerek vizsgálatát. Tekintettel arra, hogy az aktív szabályozási módszerek sokszor kifinomult mechatronikai megoldásokat tesznek szükségessé, amelyek költségei előreláthatóan módon meghaladhatták a projekt költségkeretét, a kutatás egy részét az áramlás numerikus szimulációjának útján, más részét pedig laboratóriumi kísérletekkel végeztük el.

2. Kutatás szervezési körülmények

A projekt során a vezető kutató hosszabb külföldi tartózkodása következtében összesen négy hallgató közreműködését igényelte. A négy közül egy hallgató (Varga Árpád) fél év időtartamra a projekt költségvetéséből került alkalmazásra. Egy másik hallgató (Szávai Tivadar) a kutatómunka mellett, mint magánvállalkozó a méréshez használt modellt is legyártotta, amelynek költségeit a projekt költségvetéséből finanszíroztuk.

A további két hallgató, egy doktorandusz (Lukács Eszter) és egy BSc hallgató (Gulyás András), állami ösztöndíjal, az OTKA projekt költségkeretén kívül dolgozott. A projekt által támogatott kutatás pedig Lukács Eszter doktorandusz doktori disszertációjának témáját képezi.

A projekt időtartama alatt a vezető kutató a költségkeretből saját részére személyi juttatást nem igényelt. A kutatás átfogó irodalom áttekintéssel kezdődött, amelyet numerikus szimulációs vizsgálatok követtek. A laboratóriumi kísérletek elvégzésére a projekt időtartamának második felében került sor.

A kutatási témát két fő területre osztottuk: az első terület az áramvonalas testek körüli áramlás szabályozási lehetőségeit vizsgálta olyan tartományban, amely leginkább az iparban fordul elő és repüléstudományban nem. A második terület a leválással jellemzett áramlások szabályozását vizsgálta, ahol légtechnikai rendszerekben található, nem áramvonalas elemek veszteségét terveztük csökkenteni.

Az ipari berendezéseken kívül közúti gépjárművek kerekeinek légellenállás csökkentését is megcéloztuk, amelyet részben numerikus szimuláció, részben pedig laboratóriumi kísérletek segítségével végeztünk. Míg a numerikus szimulációk elvégzése tervszerint megtörtént, a mérésekre csak a projekt legvégén kerülhetett sor a mérőeszköz beszerzése következtében. Ezen mérés elvégzése érdekében kértem a projekt zárási határidejének meghosszabbítását fél évvel. A mérések lefolytatásához Gulyás András hallgatót vontam be.

3. Előkészületek, irodalomkutatás

A projekt első fázisában irodalomkutatás, valamint konferencia részvétel útján információ gyűjtést végeztem, mely során meghatároztam azon területeket az áramlásszabályozás terén, amelyek a nemzetközi kutatóközösség által még nincsenek lefedve. A vizsgálandó terület meghatározásához a Franciaországban található, az áramlásszabályozás területén élen járó Poitiers Egyetem (Université de Poitiers), az Egyesült Államokban

található University of Florida és a Belgiumban található Von Karman Institute for Fluid Dynamics szakembereivel konzultáltam. Részt vettem továbbá a Von Karman Istitute for Fluid Dynamics által szervezett előadás sorozaton (Lecture Series), amelynek témája az áramlásszabályozás volt. Az információ gyűjtés során fény derült arra, hogy a repüléstudományban alkalmazott áramlásszabályozási módszereket ipari körülmények között, csőrendszerekben, légtechnikai vezetékekben még nem hasznosították. Ezen téren történő alkalmazási lehetőségeiket nem vizsgálták.

Ennek következtében merült fel egy doktori disszertáció indítása, amely így hiánypótló jelleggel az áramlásszabályozási eszközök ipari körülmények között történő alkalmazását célzó kutatást valósít meg.

4. Az elvégzett kutatás, publikált eredmények

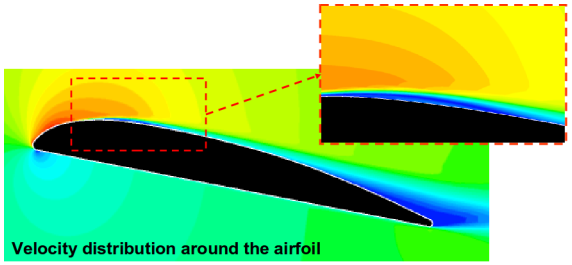
4.1. Áramvonalas testek tématerülete

Az áramlásszabályozás a nemzetközi kutatási közösségben elsősorban repüléstechnikai alkalmazásokra specializálódott. Ennek következtében a vizsgált, áramlásba helyezett testek többsége áramvonalas. Az áramvonalas testek legfőbb tulajdonsága az, hogy az áramlás követi a test kontúrját a test teljes kiterjedésében. A fal mellett kialakuló úgynevezett határréteg sehol nem válik le a felületről, örvények nem keletkeznek.

Ipari körülmények között áramvonalas testeknek tekinthetők a profilozott szárnylapátok, amik megtalálhatók a gőz- és gázturbinák, a szivattyúk, valamint ventilátorok álló és forgó részeiben.

Az áramvonalas testek körüli áramlásokat elsősorban a határréteg állapotának befolyásolásával lehet módosítani.

Tekintettel arra, hogy repülőgép szárnyak esetén már igen sokféle áramlásszabályozási lehetőséget vizsgáltak, a jelenlegi projekt során olyan módszereket elemeztünk, amelyekről a legkevesebb a szakirodalmi forrás. Az egyik ilyen áramlásbefolyásolási eljárás a lamináris leválási buborékok létrehozása és ezáltal a szárnyprofil görbületének növelése, valamint egyidejűleg a határréteg laminárisból turbulensbe történő átcsapása. A lamináris leválási buborékot mutatja a 1. ábrán látható bekeretezett rész. A vizsgálat eredményeit a [1] jelű publikációnkban tettük közzé.

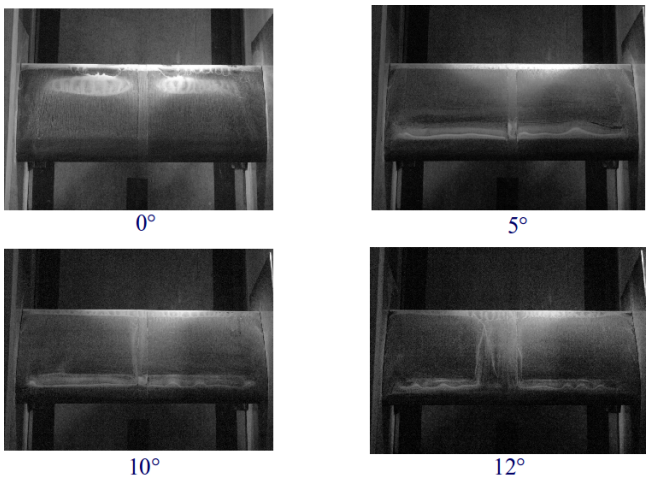


1. ábra. Lamináris leválási buborék szárnyprofil szívott oldalán numerikus szimuláció segítségével

A lamináris leválási buborék szerkezetét és tulajdonságait kísérleti úton is tanulmányoztuk. A méréshez olajfilm vizualizációs technikát használtunk, amely segítségével láthatóvá vált a lamináris leválási zóna kiterjedése. Megvizsgáltuk a leválási zóna érzékenységét az állásszögre, valamint a szélcsatorna mérőtér méretére vonatkozóan. A kísérletek eredményeit a [9] jelű publikációnkban tettük közzé. A 2. ábrán látható, ahogy a növekvő állásszögek ellenére a belépőélhez közel elhelyezkedő lamináris leválási buborék a kilépőélhez közeli leválási zóna méretét jelentősen csökkenti. Ezzel nő a felhajtóerő és csökken az ellenállás, azaz a siklószám javul.

A leválási buborékok alkalmazása, mint áramlásszabályozási eszköz, nemcsak szárnyprofilok esetére, hanem nem áramvonalas testek körüli áramlás befolyásolására is alkalmas. Az előbbiekben tárgyalt lamináris leválási buborékok elsősorban az áramvonalas, eleinte lamináris határréteggel jellemzett testek esetén alakulhatnak ki.

Az áramvonalas testek témakörében végzett vizsgálatok következő pontja a szárnyprofilok felületén történő határréteg elszívás, illetve lefúvás, valamint a felületbe építhető membránok alkalmazása volt. Ismert jelenség, hogy szárnyprofilok siklószáma jelentősen növelhető, ha a határréteg a felület mentén minél nagyobb



2. ábra. Lamináris leválási buborék hatásának vizsgálata szárnyprofil körüli áramlásra növekvő állásszög esetén

részben lamináris marad. Lamináris határrétegben ugyanis hozzávetőlegesen harmadakkora a csúsztatófeszültség, mint turbulens határréteg esetén. Felmerült azonban a kérdés, hogy mennyiben csökkenthető az ellenállástényező akkor, ha a már turbulens határréteg egy részét szívjuk el. A turbulens határréteg kiterjedése nagyobb, mint a laminárisé, ezért az áramvonalak kilépőél felé haladva jobban széttartanak, kevésbé követik a szárnyfelület görbületét. Ezért a kilépőélnél kialakuló össznyomás kisebb, mint a belépőélen kialakuló torlópontbeli össznyomás. Ez a különbség a csúsztatófeszültségtől függetlenül kialakuló, nyomásból származó ellenállás irányú erőt eredményez. A turbulens határréteg egy részének elszívásától azt vártuk, hogy a kilépőél környékén kialakuló nyomás növekedjen, ezáltal pedig a nyomásból származó ellenálláserő csökkenjen.

Az elszívásra irányuló vizsgálatok eredményét a [2] jelű publikációnkban tettük közzé. Ugyanezen publikációban vizsgálatokat végeztünk periodikus lefúvás és elszívás siklószámra való hatására nézve. A periodikus lefúvás és elszívás egyszerűsített változataként membránokat is helyeztünk a szárnyprofilra, amelyeket periodikusan mozgattunk és így vizsgáltuk hatásukat a siklószámra.

Ezutóbbi publikációnkat a CMFF 2009 konferencia nemzetközi tudományos bizottsága beválasztotta az **International Journal of Heat and Fluid Flow** című, **1.4 impakt faktorral** rendelkező folyóiratába. A folyóiratcikk benyújtása után a bírálók kifogásolták, hogy vizsgálataink eredményei kizárólag numerikus szimuláció útján történtek és nem támasztottuk alá őket mérési eredményekkel. Tekintettel egy ilyen mérés rendkívül magas, az OTKA projekt költségkeretét meghaladó költségeire, a méréseket nem volt lehetőségünk elvégezni, ezért a cikket nem publikálták.

A kutatási a sikertelen impakt faktoros publikáció hatására a kísérleti vizsgálatok felé irányult. Áramvonalas, felhajtóerőtermelő testek, szárnyszegmensek vizsgálatához elő kellett készíteni az Áramlástan Tanszék szélcsatornáit. Felhajtóerő termelő testek áramlásba helyezése esetén ugyanis a szélcsatorna és a modell közötti kölcsönhatás rendkívüli mértékű és jelentősen befolyásolja az eredményeket. Mindez abban nyilvánul meg, hogy egy adott profilú szárnyszegmens szakirodalomban található polárgörbéje nem egyezik meg a szélcsatornában ugyanezen profil esetén mért polárgörbével. A mérési eredmények tehát felhajtóerő termelő testek vizsgálata esetén jelentős mértékű korrekcióra szorulnak. Az esetünkben alkalmazott nyitott mérőterű szélcsatornák esetén a legjelentősebb mértékben módosító hatás az állásszög korrekciója. Az állásszög korrekcióra azért van szükség, mert a felhajtóerő hatására a test mintegy „kitereli" az áramlást maga mögött a szélcsatorna középvonalából és maga előtt is jelentősen eltéríti az áramlás irányát.

A szárnyszegmensek polárgörbéjének meghatározása az áramlásszabályozás szempontjából kulcsfontosságú, hiszen a szabályozás hatásait ezen görbe változásai alapján tudjuk megítélni. A mérés peremfeltételeinek biztosításának első lépése egy nagy geometriai pontosságú szárnyprofil gyártása volt, amelyen nyomásmérő furatokat alakítottunk ki. A felhajtóerőt a nyomáseloszlás integrálásával, míg a test ellenállását az áramlástanban alkalmazott impulzus tétel alkalmazása segítségével a szárnyszegmens nyomában végzett össz-

nyomás profilok mérésével és kiértékelésével határoztuk meg. A mérés eredményeként sikerült az alkalmazott szárnyprofil irodalomban található polárgörbéjét reprodukálni az állásszög korrekció útján. Az irodalomban található korrekciókon kívül szükséges volt az Áramlástan Tanszék laboratóriumában található függőleges szélcsatorna mérőterében kialakuló egyenlőtlen össznyomáseloszlás hatását is kiküszöbölnünk. A mérőrendszer ismertetését és a mérési eredményeket a [8] jelű publikációnkban tettük közzé. A mért szárnyszegmenst terveztük átalakítani elszívásos, illetve lefúvásos szabályozás lehetővé tételére. A munkálatok azonban jelentős mértékben elhúzódtak és nem valósultak meg az OTKA projekt időkeretén belül. Megvalósításuk a következő félévben történik.

A szélcsatorna kísérletek általában megkötik a vizsgálat peremfeltételeit, így idealizált áramlási esetek, mint például 2-dimenziós áramlás létrehozása nem lehetséges. Bizonyos körülmények között a szélcsatornában kialakuló körülmények igen közel állnak a 2-dimenziós áramlási viszonyokhoz, azonban általában elkerülhetetlen, hogy 3-dimenziós jelenségek befolyásolják az eredményeket. Ennek akkor van jelentősége, ha a mérési eredményeinket numerikus szimulációs számítási eredmények validálásához szeretnénk felhasználni. A kutatási projekt következő részében az áramvonalas, felhajtóerő termelő testek mérése esetén fellépő, a 3-dimenziós áramlási jelenségek hatását demonstráló mérőrendszert alakítottunk ki. Erre leginkább megfelelőnek egy alacsony oldalviszonyú, jelentősen görbült szárnyszelvény bizonyult. Megállapítottuk, hogy megfelelően nagy felhajtóerő termelése esetén a szárnyszegmenst határoló véglapok közelében kialakuló háromdimenziós áramlási jelenségeknek a szárnyszegmens középsíkjában kialakuló áramlási állásszögre kimutatható hatása van. Ez a hatás az áramlásszabályozási módszerek várható hatásaival azonos nagyságrendbe esik, ezért ezen jelenségek megértése igen fontos. A 3-dimenziós jelenségek 2-dimenziós áramlásra gyakorolt hatásait tárgyaló cikkünket a [3] jelű irodalomban publikáltuk.

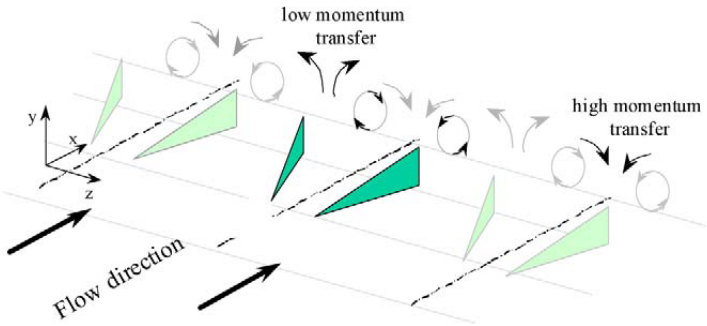
4.2. Ipari rendszerek áramlásszabályozási esetei

A kutatás során a legjobban kivitelezhető és legegyszerűbben megvalósítható áramlásszabályozási eseteknek az ipari csővezeték rendszerek, légtechnikai vezetékrendszerek bizonyultak. Ezekben a rendszerekben sok esetben nem lehetséges az áramlástani követelményeknek legjobban megfelelő geometriát kialakítani költég-, illetve helyszükségleti okok következtében. Az áramlásszabályozás hatásának legjelentősebb mértékét ezeknél a rendszereknél történő alkalmazások esetén vártuk.

Tekintettel arra, hogy a legtöbb vezeték rendszerben a veszteségek határréteg leválással hozhatók összefüggésbe, a vizsgálatainkhoz elsősorban az egyszerű geometriával jellemzett Borda-Carnot átmenetet választottuk alapesetként. A Borda-Carnot átmenet nyomásvesztesége jól ismert, viszont a veszteség kialakulásának fizikája továbbra is felvet kérdéseket. Az áramlásszabályozási eszközök alkalmazása ezen veszteség csökkentésére kézenfekvőnek mutatkozott. Ipari rendszerekben aktív szabályozási rendszerek kialakítását nem láttuk célszerűnek, mert az növeli a rendszer bonyolultságát, ebből következően csökkenti megbízhatóságát és mindemellett növeli a rendszer beruházási költségeit, így az áramlásszabályozás útján felmerülő nettó nyereséget felemésztheti a szabályozórendszer beruházási, valamint működtetési költsége. Mindez arra vezetett, hogy elsősorban a passzív áramlásszabályozási eszközök alkalmazási lehetőségeit vizsgáljuk meg.

Ipari berendezésekben, ahol az áramlás már túlnyomórészt turbulensnek tekinthető, az örvénygenerátorok alkalmazása volt a kézenfekvő áramlásszabályozási mód. Az örvénygenerátorok működési elvét a 3. ábra mutatja. Turbulens határrétegben egy falfelületre merőlegesen beépített, az áramlás irányával hozzávetőlegesen 30°-os szöget bezáró, hegyes szögű félháromszög mögött úgynevezett hosszanti örvény alakul ki. A hosszanti örvény tengelye a fő áramlás irányával párhuzamos, így az áramló közeg az örvénybe kerülve spirális úton halad az örvényszál mentén az áramlással. Annak következtében, hogy az örvénybe kerülő közeg folytonosan eláramlik az örvény keletkezési helyétől az áramlás irányába haladva, a kialakuló örvény szerkezete időben állandósul. Az ilyen örvények belsejében az áramlástan alapjaiból ismert potenciálos örvény sebességteréhez hasonló sebességeloszlás alakul ki. A sebesség az örvényszálat radiális irányban közelítve hiperbolikus jelleggel növekszik.

Az ilyen módon kialakuló örvényszálak az áramjárta vezetékek elméletéből ismert Biot-Savart törvénnyel analóg módon (mágneses tér helyett) sebesség teret tudnak indukálni. Amint az a 3. ábrán látható, az örvénygenerátor által keltett örvény egyik oldalán a falfelülettől távozó irányú, másik oldalán a falfelület felé irányuló áramlás indukálódik. A határréteg leválással jellemzett áramlások esetén az örvénygenerátorok alkalmazása megakadályozhatja a határréteg adott helyen történő leválását azáltal, hogy a határrétegen kívüli

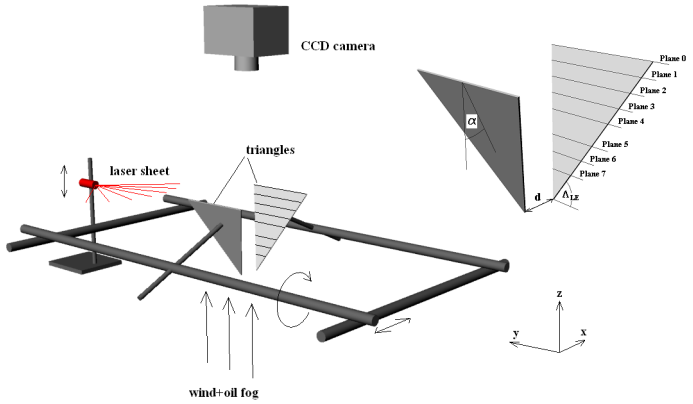


3. ábra. Örvénygenerátorok működési elve

áramlásból nagy mozgásmennyiséggel jellemzett közeget juttat a határréteg lelassult, falhoz közeli részébe. A faltól távolról beáramló közeg így megnöveli a határréteg alján a közegrészek mozgási energiáját, így lehetővé téve azok további áramlását növekvő statikus nyomással szemben, elkerülve ezzel a leválás jelenségét.

Amennyiben a határréteg már levált, ezen örvénygenerátorok által keltett, a felület felé irányuló áramlás lehetővé teszi azt, hogy a leválási buborékba nagyobb tömegárammal áramoljon a közeg, ezáltal feltöltve azt. A leválási buborékba történő közeg beáramlás növeli a buborékban kialakuló statikus nyomást, ami pedig csökkenti a körüláramlott elem ellenállását, ezzel pedig a veszteség mértékét.

A kutatás során a nemzetközi szakirodalomban nem megtalálható módon, két, nagyméretű hegyes szögű háromszög egymással szembe történő helyezésének útján vizsgáltuk meg az örvénygenerátorok működési elvét. Szimmetrikus elrendezés fenntartása mellett vizsgáltuk a két háromszög állásszögének, valamit egymástól való távolságának a köztük kialakuló áramlásra való hatását. A mérési elrendezés a 4. ábrán látható. Az áramlás szerkezetét optikai úton figyeltük meg. A mérés során egy CCD kamera segítségével figyeltük meg az örvények elhelyezkedését és méretét. Az örvényekbe kerülő olajköd lehetővé tette, hogy azonosítsuk az örvényeket és meghatározzuk azok átmérőjét és középpontját.



4. ábra. Két háromszög között kialakuló áramlás vizsgálata örvénygenerátor pár tulajdonságainak jellemzésére

Eredményeinket a [5] jelű publikációnkban tettük közzé. Kísérleteket végeztünk ezen örvénygenerátor elrendezés alkalmazására Borda-Carnot átmenetben is, de a beavatkozás nettó hatása legjobb esetben is csak nulla volt, azaz a bevezetett elem által okozott nyereség éppen fedezte az általa okozott többlet veszteséget.

A csővezeték rendszerekben található Borda-Carnot átmenetek veszteségének csökkentésére az örvénygenerátorok semmilyen elrendezésben nem vezettek javulásra. A következő megoldás a szakirodalomban nem megtalálható, kis méretű terelőlapok alkalmazása volt. A kis terelőlapok rendkívül egyszerűen alakíthatók ki és építhetők be egy meglévő csőrendszerbe is. Működésüket tekintve leginkább a jól ismert diffúzorokhoz hasonlíthatók, de fizikájuk eltérő. Az áramlásszabályozási elrendezés a Borda-Carnot átmenetre alkalmazott kísérleti berendezésünkön alkalmazva, a 5. ábrán látható. A kisméretű lapok alkalmazását egy, a szabadba kiáramlást lehetővé tévő kiömlőnyíláson kezdtük. Ekkor a kialakuló szabadsugár nyílási szögét befolyásoltuk, amelynek hatására adott rendszeren csökkenthető volt az áramlást létrehozó ventilátoron szükséges nyomásnövekedés. A nyomásnövekedés szükséglet minimumát a kisméretű lapok áramlás irányához mért 10-12°-os nyílásszögbe (diffúzorok konvenciójában ez félszögnek tekintendő, tehát a minilapok nyílásszöge ebben a tekintetben 20-24°-nak tekinthető, ami jelentősen nagyobb, mint a diffúzoroknál ismert 7°-os optimum) történő állításával értük el. Ez a szög optimumnak bizonyult. A lapok minimális szélességét négyzet keresztmetszetű kiömlőnyílás esetén a kiömlőnyílás élhosszának 13%-ában állapítottuk meg. A szélesség növelése a kísérletek szerint nem vezetett jelentős mértékű javulásra.

5. ábra. Kisméretű terelőlapok alkalmazása Borda-Carnot átmenet veszteségének csökkentésére

A kisméretű terelőlapok 10-12° nyílásszögbe történő állítása útján a Borda-Carnot veszteség 22%-kal csökkent. Ezen eredményünket Brüsszelben publikáltuk kizárólag külföldi közönség előtt a [4] jelű cikkünkben. A kisméretű lapokkal történő szabályozás alkalmazhatóságát vizsgáltuk kör keresztmetszetű vezetékek esetére is numerikus szimuláció útján. Arra jutottunk, hogy a keresztmetszet alakjától jó közelítéssel függetlenül a lapok 10-12° közötti beállítási szöge adja a legnagyobb mértékű veszteség csökkenést. Azonos keresztmetszet változás esetén a numerikus szimuláció és a kísérlet jó közelítéssel azonos mértékű veszteségcsökkenést eredményezett.

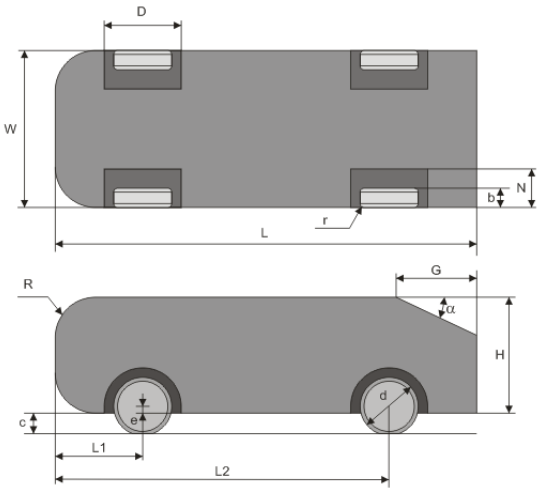
A Borda-Carnot átmenetet és az áramlásszabályozás hatását LDV (Laser-Doppler Velocimetry) mérésekkel is megvizsgáltuk és eredményeinket a **Journal of Power and Energy** nemzetközi, **impakt faktoros** folyóiratnak küldtük be. A bírálatokat megkaptuk és mindkét bíráló elismerte eredményeinket. Apró szerkezeti módosításokat kértek, amelyeket elvégeztünk és a második verziónkat ellenőrzésre benyújtottuk. Az ellenőrzés eredménye egyelőre még nem érkezett meg.

4.3. Gépjárművek kerekeinek ellenállás csökkentésére irányuló áramlásszabályozási lehetőségek vizsgálata

Az áramlásszabályozási eljárások mostanában kezdenek teret nyerni közúti gépjárművek esetén. Az eddigi alkalmazások elsősorban a járművek mögött kialakuló áramlási nyom jellemzőinek kedvező irányú módosítására irányultak. Felmerült azonban, hogy a gépjárművek kerekei által okozott jelentős mértékű ellenállás növekedést szintén áramlásszabályozás útján csökkentsük. Erre vonatkozóan a nemzetközi szakirodalomban hiány mutatkozott, holott nyilvánvaló, hogy az áramlástani szempontból nem optimalizálható geometriájú kerekek ellenállását leginkább csak áramlásszabályozási eszközök segítségével befolyásolhatjuk. A vizsgálatok alapjául, a vezető kutató PhD fokozoat megszerzésére irányuló tevékenysége és az ennek során felépült kapcsolatrendszere szolgált.

A kutatási eredmények általános érvényét megőrzendő, valamint a jogi következményeket elkerülendő, nem a kereskedelmi forgalomban elérhető gépjármű geometriák közül választottuk ki a vizsgált modellt. A jármű aerodinamika területén jól ismert az *általános autó modell*, amelyet más néven *Ahmed test*nek neveznek. Az Ahmed test eredetileg nem rendelkezik kerekekkel, geometriája egyszerű, könnyen reprodukálható, nincsenek bonyolult felületei. Eredeti célja a ferde hátú autó karosszériák jellegzetes áramképeinek kísérleti vizsgálata és a lezajló folyamatok megértése. A geometriát a későbbiekben numerikus szimulációs eljárások validálására használták, elsősorban rendkívüli mértékű egyszerűsége következtében. Az Ahmed test körüli áramlás jellemzői jól ismertek a vonatkozó kutatóközösségben, a modell tehát általánosan elfogadott referenciaként szolgál minden újonnan megjelenő vizsgálati módszer validálásához.

A vezető kutató a kerekek körüli áramlás megértéséhez és annak szabályozási lehetőségeinek megállapításához az Ahmed test geometriájából indult ki. Egy diplomatervező bevonásával az Ahmed test eredeti geometriáján négy kerékházat alakítottunk ki és bennük forgó kerekeket helyeztünk el. A vizsgálatokat kezdetben kizárólak numerikus szimuláció útján végeztük. A kerekek körüli áramlás és a karosszéria körüli áramlás kölcsönhatásának vizsgálatára vonatkozó eredményeinket a [6], valamint a [7] jelű külföldi konferencián előadott és konferencia kiadványban megjelent publikációinkban tettük közzé. Az áramlásszabályozásra irányuló vizsgálatainkat erre a testre alkalmazva a [10] jelű, Münchenben előadott és megjelent publikációnkban tettük közzé. A kerekekkel ellátott test a 6. ábrán látható.



6. ábra. Kerekekkel ellátott általános autó modell (Ahmed test)

A modell iránt nemzetközi érdeklődés merült fel, ezért az áramlásszabályozási eseteket kiegészítve a járműre ható oldalszél hatásaival kiegészítve folyóirat cikket készítettünk és nyújtottunk be az **International Journal of Vehicle Design** című amerikai **impakt faktoros** folyóiratnak (Society of Automotive Engineers). A numerikus szimulációs modellt validáltuk ugyan az eredeti Ahmed test geometrián, a bírálók azonban mégis kifogásolták, hogy a kerekekkel ellátott Ahmed test esetére nem áll rendelkezésre mérési adat, ezért cikkünket elutasították.

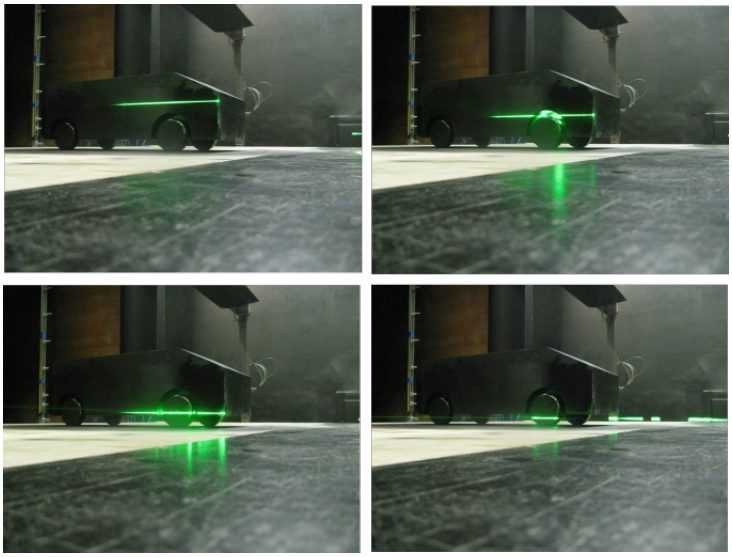
Tekintettel arra, hogy impakt faktoros folyóirat publikációink a kísérletek hiánya miatt hiúsultak meg, az

Áramlástan Tanszék hozzájárult, hogy jelentős mértékű gyártási munkálatokkal járó mérési kampányt indítsunk a kerekekkel ellátott Ahmed test áramlástani jellemzőinek mérésére. A mérést a numerikus szimulációk validálására terveztük, ezért a tervezési fázisban a Svédországban található Chalmers Egyetem járműaerodinamika professzorával, Sinisa Krajnovic-al konzultáltam, akinek elismert tapasztalatai vannak gépjárművek körüli áramlás numerikus szimulációs modellezésében. Megállapítottuk, hogy a méréshez a legkifinomultabb áramlástani méréstechnikára, a PIV (Particle Image Velocimetry) módszerre van szükség. A PIV mérőrendszer az Áramlástan Tanszéken nem áll rendelkezésre, ezért hosszas tárgyalások útján a rendszert az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája tanszékétől kölcsönöztük.

Az autómodellt forgó kerekekkel láttuk el, amelyek a talajt modellező lapba vágott mélyedésekbe merültek, ezzel modellezve a talaj és a kerekek közötti kapcsolatot. A talaj mozgását nem modelleztük. Az autómodell és annak belső szerkezete az 7. ábrán található.

7. ábra. A méréshez tervezett, kerekekkel ellátott Ahmed test és belső szerkezete

A test kerekeit egy egyfázisú villanymotor hajtotta. A motor az első tengelyt hajtotta meg, az első tengely pedig szíjhajtás segítségével hajtotta meg a hátsó tengelyt. A két tengely azonos fordulatszámát az azonos méretű szíjtárcsák alkalmazása biztosította. A fordulatszámot optikai úton az első tengelyen mértük egy beépített, színfelismerés elven működő fordulatszámmérő segítségével. A PIV mérés kétféle elrendezésben történt: az egyik esetben a kamerát a jármű fölé helyeztük és felülnézetből vizsgáltuk a kerék melletti áramlást a talajtól mért különböző magasságokban. A talajtól mérve az autómodell középmagasságáig 14 különböző síkban vettünk fel egyenként 300 pillanatképet az áramlásról. Néhány vízszintes helyzetű lézersík pozíciót mutat a 8. ábra.



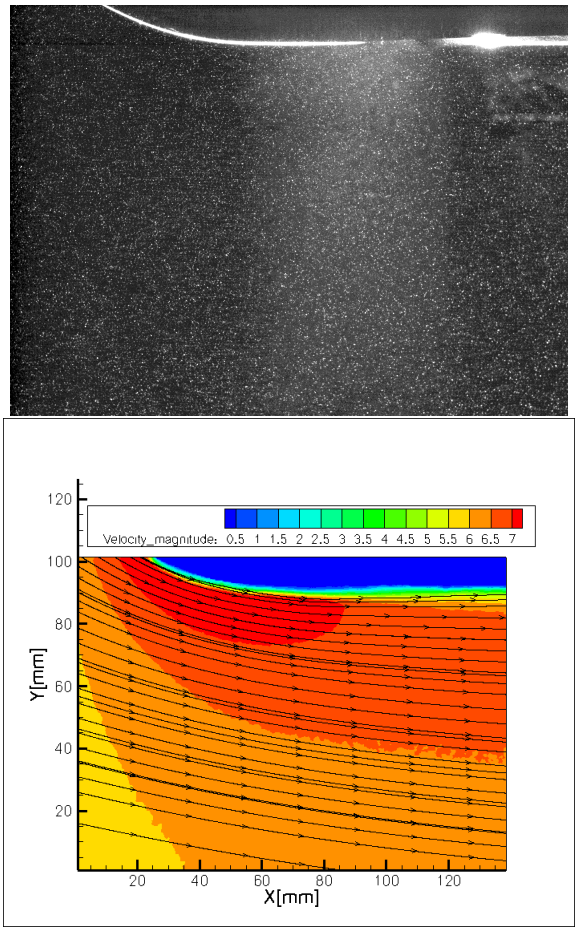
8. ábra. Felülnézeti mérési elrendezésben alkalmazott néhány sík pozíció a hátsó kerék környezetében

Az első kerék körüli áramképet, valamint a jellemző mért részecskeképet mutatja a 9. ábra. Jól megfigyelhető a testet oldalról megkerülő áramlás, valamint a sebesség megnövekedése a test közelében. A PIV technikával készült részecskeképek megfelelő minőségűek a színvonalas kiértékelés elvégzéséhez. Az összesen 120 sík mindegyikén 300 képpár készült, amelyek 300 pillanatnyi áramképet tartalmaznak. Minden síkon mérést végeztünk álló és forgó kerekek esetére. A mérés során a mérőtérbe kerülő objektumok hatását is mértük a jármű körüli áramlásra.

Az eredmények kiértékelése még most is zajlik, ezért ezek publikációjára még nem került sor.

Köszönetnyílvánítás

A vezető kutató köszönetét szeretné kifejezni a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékének a kutatás elvégzésének lehetőségéért. Külön köszönet illeti az Áramlástan Tanszék gazdasági előadóját, Szalma Attilánét a projekt gazdasági részének gondozásáért, felügyeletéért, irányításáért. A vezető kutató háláját fejezi ki Dr. Jánosi Imre részére, aki lehetővé tette, hogy a mérésekhez az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszékének PIV mérőberendezését használhassuk. A vezető kutató köszönetét fejezi ki az OTKA támogatásáért és különösen türelméért, valamint megértéséért azon esetekben, amikor a költségtervet többszöri alkalommal módosítani kényszerültünk. Külön szeretnénk megköszönni, hogy az OTKA lehetőséget adott a projekt futamidejének fél évvel történő meghosszabbításáért.



9. ábra. Részecskekép és sebességtér az autó első részén

Hivatkozások

[1] P. Aranyi and T. Regert. Numerical modeling of the flow past an airfoil characterized by a laminar separation bubble. In *Proceedings of MICROCAD 2009 conference*, Miskolc, 2009.

[2] T. Baksa and T. Regert. Study on the possibilities of active flow control on airfoils at low angle-of-attack. In *Proceedings of Conference on Modeling Fluid Flow 2009*, 2009.

[3] J. Bene, T. Regert, and Cs. Hos. Investigation of the characteristics of an optimized airfoil using synergy of experimental and computational fluid dynamics. In *Proceedings of Conference on Modeling Fluid Flow 2009*, 2009.

[4] E. Lukacs and T. Regert. 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, Brussels, Belgium*, pages ISAIF10–109, 4-7 July 2011,.

[5] E. Lukacs, T. Regert, T. Lajos, and A. Gulyas. Experimental investigation of the flow field between two opposed delta wings. In *Proceedings of the Gepeszet (Mechanical Engineering) 2010 conference*, Budapest, Hungary, 25-26 May 2010.

[6] T. Regert, T. Lajos, and A. Schwarczkopf. The effect of wheels on the characteristics of an ahmed body. In *Proceedings of the European Automotive CFD Conference*, pages 57–67, Frankfurt, Germany, July, 2007.

[7] T. Regert, A. Schwarczkopf, and T. Lajos. Study on the aerodynamic characteristics of wheels and wheelhouses of road vehicles. In *Proceedings of the FISITA 2008 World Automotive Congress*, Munich, 2008.

[8] T. Regert and T. Szavai. Experimental facility for measuring aerodynamic characteristics of airfoils influenced by flow control devices. In *Proceedings of the Gepeszet (Mechanical Engineering) 2010 conference*, Budapest, Hungary, 25-26 May 2010.

[9] K. Schosser and T. Regert. Study on the wind tunnel effects onto the flow past an airfoil section by means of flow visualization. In *Proceedings of MICROCAD 2009 conference*, Miskolc, 2009.

[10] A. Schwarczkopf, T. Regert, and T. Lajos. Investigation of simple possibilities for reduction of drag due to the wheels of road vehicles. In *Proceedings of the European Automotive Simulation Conference (EASC 2009)*, Munich, Germany, 2009.