

TURBULENCIAGENERÁTORBAN HASZNÁLT AKTÍV ELEMEEK MOZGÁSÁNAK VIZSGÁLATA NAGYSEBES- SÉGŰ KAMERA ALKALMAZÁSÁVAL

Szaszák Norbert Tibor¹, Dorogi Dániel², Christoph Roloff³, Dominique Thévenin⁴, Szabó Szilárd⁵

¹ PhD hallgató; ² hallgató; ⁵ tanszékvezető, egyetemi tanár; Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: ¹aramszn@uni-miskolc.hu;

²dorogiddaniel@gmail.com; ³aram2xsz@uni-miskolc.hu

⁴ intézetigazgató; ³ PhD hallgató, Áramlástechnikai és Termodinamikai Intézet, Magdeburgi „Otto von Guericke” Egyetem, D-39106 Magdeburg, Németország, Universitätsplatz 2., e-mail: ³christoph.roloff@ovgu.de; ⁴thevenin@ovgu.de

Összefoglalás

Jelen dolgozat egy olyan, új típusú turbulenciagenerátorral foglalkozik, mely az áramlás turbulenciájának jelentős mértékű növelése céljából préslevegő hatására nagysebességgel mozgó rugalmas csöveket, s az e csöveken keresztül az alapáramlásba juttatott légsugarakat alkalmaz. Méréseink a mozgó csövek - mint aktív elemek- mozgásának leírására irányultak: nagysebességű kamera által készített képsorozatok segítségével szoftveres úton meghatározásra kerültek a vizsgált csövek elmozdulás-idő vektorai, melyek további feldolgozásából különböző, a mozgást leíró mennyiségeket határoztunk meg. A mérés célja annak eldöntése volt, hogy az egyes csövek sztochasztikus mozgást végeznek-e, esetleg valamilyen periódus szerint ismétlődik a mozgás.

Kulcsszavak: aktív rács, turbulencia, szélcsatorna, nagysebességű képalkotás

Abstract

In this paper a novel type active grid is presented where the active elements are moving flexible silicone tubes in the grid intersections. The tubes are put in motion by high-speed air jet ejected from them. The measurements and the data processing presented here are related to the determination of the properties of the motion of the tubes. A high-speed camera was applied to capture image sequences of the motion. The images were post processed via software to obtain the vectors of displacement in time of the investigated tubes. The aim of these measurements was to ascertain whether the motion is stochastic or periodic.

Keywords: active-grid, grid turbulence, wind tunnel, high-speed imaging

1. Bevezetés

A legkülönbözőbb áramlások szimulálásához használt szoftverekben (CFD) alkalmazott turbulencia-modellek, de még a közvetlen numerikus szimulációk (DNS) fontos kezdeti

paramétereit a vizsgált áramlásra jellemző turbulencia tulajdonságai. Az áramlástan szimulációk közel 95%-ában jelen van a turbulencia jelensége, ezért annak pontos ismerete nélkülözhetetlen a megfelelő eredmények szempontjából. Sajnos a mai napig nem sikerült egy olyan elméleti modellt alkotni, mely pontosan leírja a turbulens áramlásokat, ezért a turbulencia, mint jelenség, a klasszikus fizika egyik megoldatlan „problémája”. E problémát próbálják feloldani a különböző turbulencia-modellek, melyek elhanyagolásokkal ugyan, de számos megköttéssel (csupán bizonyos áramlások esetében alkalmazhatók meghatározott paramétertartományok mellett) a mérnöki gyakorlat számára, a későbbi számításokhoz, kiértékeléshez megfelelő pontosságú eredményeket szolgáltatnak. A turbulencia-paraméterek megválasztásától függően számos különböző eredményre juthat a szimuláció, mivel a turbulenciát a kaotikus viselkedése miatt a peremfeltételek tekintetében igen nagyfokú érzékenység jellemzi. Ezek miatt, továbbá a szimuláció mérésel történő igazolása végett szükséges olyan áramlást létrehozni, amelynek turbulens jellemzői ismertek. Az előre ismert turbulenciájú áramlások létrehozása például turbulenciát generáló rácsok alkalmazásával lehetséges. Ezeknek két fajtája ismert: passzív és aktív rácsok. A passzív rácsok egyszerű felépítésűek, viszont jóval alacsonyabb turbulenciájú áramlást lehet velük elérni, mint az aktív rácsok esetében.

Thomas Kurian et al. [1] munkájukban passzív rács vizsgálatokról számolnak be, amelyeket hődrótos technikával végeztek. Vizsgálataikban azonos térkitöltési tényezőjű, de különböző rácsparaméterű és anyagvastagságú rácsokat vizsgáltak. Ezzel a módszerrel különböző hosszskálájú turbulenciát tudtak létrehozni, miközben a turbulenciaintenzitást közel állandó értéken tartották.

Rui Liu és Davis S.-K. Ting [2] két, különböző lyukkialakítású és vastagságú lemezlapot alkalmazott közel izotróp turbulencia elérése céljából. Egyik esetben egy 6 mm vastagságú lemezlapon helyeztek el csonkakúp-alakú furatokat 41°-os félkúpszöggel oly módon, hogy azokról az áramlás irányával megegyező irányú hirtelen keresztmetszet-növekedés miatt örvények váljanak le. A másik esetben 25,4 mm vastagságú lemezen alakítottak ki állandó átmérőjű furatokat, így a furatokon belül nem alakult ki örvényleválás.

Mahinder S. Uberoi [3] kétsíkú, négyzetes kialakítású rácsot vizsgált, melyet henger alakú farudakból állított össze. Munkájában meghatározta az energiaátvitelt a nagy skáláktól a legkisebbekig, majd az eredményeit összehasonlította az elméleti becslésekkel.

Az előzőekben bemutatottakkal szemben az aktív rácsok közös jellemzője, hogy különböző módszerekkel mozgásba hozott ellenállástesteket tartalmaznak, melyek megfelelő módú vezérlésével széles tartományban változó jellemzőkkel bíró turbulencia hozható létre. Számos eltérő módszert alkalmaznak az aktív rácsoknál, ám ezek jellemzően bonyolult felépítésű rendszerek, így jelentős a megépítési és üzemeltetési költségük.

Az egyik aktív rács megoldás a forgó lapátokat tartalmazó konstrukció. Jon V. Larssen és William J. Devenport [4] készítettek egy nagyméretű szerkezetet Makita 1991-ben publikált eredményei alapján. A turbulencia izotrópiájának növelése érdekében a rácsot a szélcsatorna konfúzorában helyezték el (Robert. A. Antonia et al. [5] 2009-es publikációjukban mutatták rá a konfúzor alkalmazásának a turbulencia izotrópiájának növelésében való szerepére). Kísérleteikben Larssen és Devenport szisztematikusan különböző alapáramlási-sebességeket és különböző paraméterű véletlenszerű lapátmozgást állított be, így a konstrukcióval széles skálájú turbulencia-karakterisztikákat vizsgálhattak meg.

S. C. Ling és C. A. Wan [6] 1972-ben publikált kutatásukban olyan - folyadékáramlásba helyezett - aktív rácsot vizsgáltak, melyben a rács függőleges elemeit különböző szögkité-

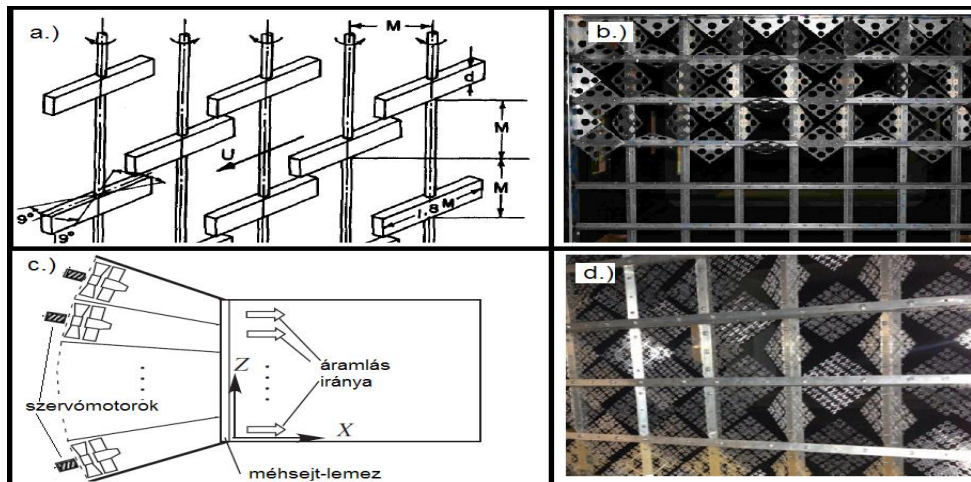
résekkal mozgatták ($\pm 19^\circ$), így a rajtuk vízszintesen elhelyezett téglatest alakú elemekkel zavarást vittek az alapáramlásba.

H. S. Kang és C. Meneveau [7] kísérleteikben olyan aktív rácsot alkalmaztak, mely vízszintes és függőleges tengelyekre szerelt rombusz alakú, furatokkal ellátott fémlemezket tartalmazott. A kísérlet célja a szabad nyíróréteg vizsgálata volt, ezért a szélcsatorna adott keresztmetszetének csupán a felébe építették be az aktív rácsot, a másik felébe egy sűrű háló került (passzív rács). Ennek okán a sebességprofil különbözött az aktív és a passzív rács mögött, így szabad nyíróréteg alakulhatott ki.

A. Thormann és C. Meneveau [8] 2014-ben publikálta az általuk vizsgált fraktál-kialakítású lapátokat tartalmazó aktív rács eredményeit. Kísérletük célja olyan rács létrehozása volt, mely alkalmas különböző skálákon megvalósítani a kinetikus energia alapáramlásba történő betáplálását. Ezért alkalmaztak négyzet befoglaló alakú, fraktál mintázatú lapokat, melyek önhasonlóságuk miatt különböző méretskálákat hoztak létre, így egyazon időben sok különböző skála volt jelen az áramlásban.

S. Ozono, A. Nishi és H. Miyagi [9] olyan, szélcsatornához épített aktív turbulenciagenerátort állított össze, melyben az áramlást 9×11 db. különállóan vezérelt axiális ventilátor hozza létre, s az általuk szállított levegőt különálló csöveken keresztül vezették be a szélcsatornába. Ezen összeállítást főleg a légköri turbulencia tanulmányozása céljából készítették.

Az 1. ábrán néhány, az előzőekben ismertetett aktív rács-konstrukció tanulmányozható.



1. ábra. Különböző aktív rács variációk: a.) függőleges tengelyek körül elfordított téglatest-elemek [6], b.) furatokat tartalmazó forgatható elemek [7], c.) axiális ventilátorokat alkalmazó elrendezés [9], d.) forgatható, fraktál mintázatú aktív elemek [8].

Az előzőekben bemutatott passzív és aktív konstrukciók leírásaiból belátható, hogy az aktív rácsok jóval összetettebb apparátust igényelnek, mint passzív társaik. A Németországban található Magdeburgi „Otto von Guericke” Egyetemen 2011-ben egy olyan aktív rács prototípusa került kifejlesztésre, mely aktív elemek gyanánt a rácspontra, a rács síkjára merőlegesen beépített rugalmas, szilikon anyagú csöveket tartalmazott. A rácsot alapáramlásba helyezve, és az üreges rács elemeken keresztül préslevegőt juttatva a rugal-

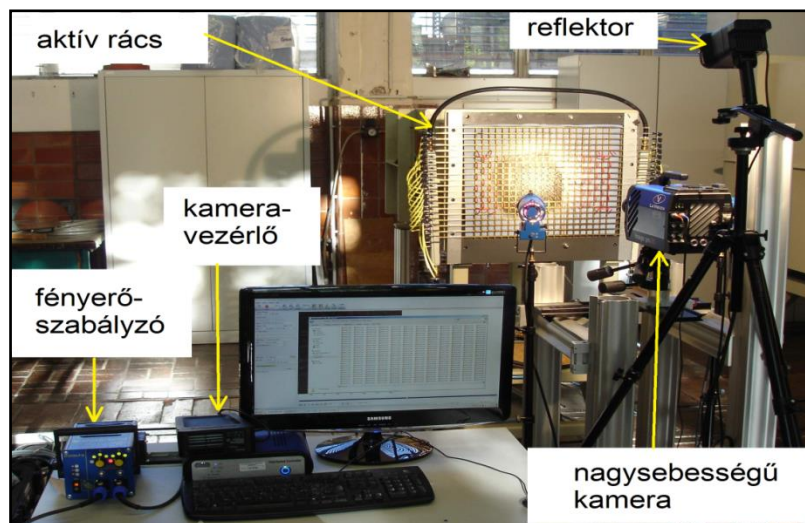
mas csövekbe, azok nagysebességű, látszólag sztochasztikus mozgást végeznek. Ez a mozgás, továbbá a csöveket nagy sebességgel elhagyó, folyamatosan irányt váltó légsugarak jelentős mértékben növelik az áramlás turbulenciáját [10, 11]. Ezért az egyetemen rendelkezésre álló szélcsatorna méreteihez igazodva megépítésre került egy nagyobb méretű rács is, mely a prototípussal szemben jóval több, összesen 10×10 db. mozgó csövet tartalmaz. A rács egymástól $M=25$ mm-es rácsállandó távolságban elhelyezett, $D=5$ mm vastagságú négyzet keresztmetszetű csövekből áll. Ezen adatokból a

$$\sigma = \frac{D}{M} \cdot \left(2 - \frac{D}{M}\right) \quad (1)$$

összefüggéssel számítható a rács kitöltési tényezője, mely $\sigma=36\%$ -ra adódott. Jelen dolgozat feladata az aktív elemek mozgásának vizsgálata, a mozgás jellemzőinek meghatározása.

2. A mérési összeállítás

Mivel az aktív elemek szabad szemmel nem követhető mozgást végeztek, továbbá a mozgás egzakt leírásához szükséges volt a csövek végeinek elmozdulás-idő függvényének pontos meghatározása is, ezért nagysebességű képkockát eljárást alkalmaztunk a mozgás lekövetéséhez. A mérési összeállítás a 2. ábrán látható.

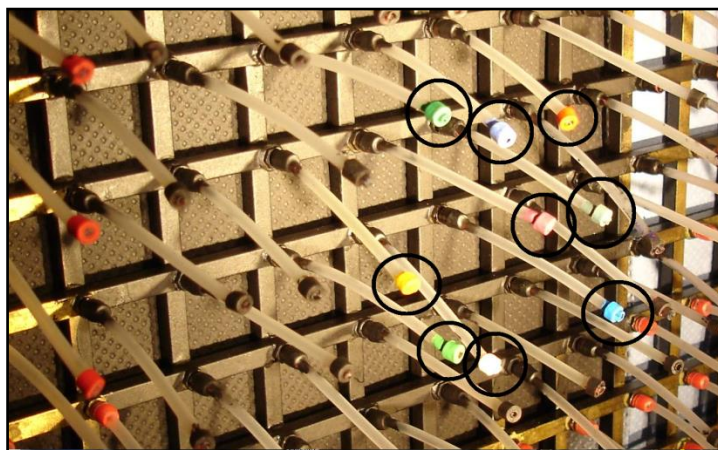


2. ábra. A mérési összeállítás.

A mérés elvégzéséhez szükséges volt egy olyan rendszert összeállítani, mely képes elegendő számú képet készíteni a vizsgálat tárgyát képező aktív rácsról ahhoz, hogy a csövek mozgása megfelelően követhető legyen, azaz 1-1 képkocka közötti elmozdulás csak néhány pixel legyen. Ehhez a 2. ábrán látható nagysebességű, *LaVision VC-Imager Pro HS 4M* típusú, CMOS kamerát alkalmaztunk a hozzá tartozó vezérlőegységgel és számítógéppel, melyen a kamerát vezérlő szoftvert futtattuk. A számítógép 16 Gb RAM-ot tartalmazott az óriási adatmennyiség megfelelő fogadásához. A rövid expozíciós idő megkövetelte az erős

megvilágítást, ezért 3 nagyteljesítményű reflektorral világítottuk meg a rácsot. A rács aktív elemeinek mozgását a belőlük a környezetbe áramló préslevegő hozta létre, ezért a rács gyűjtőcsövét egy nyomásszabályzó szelepet tartalmazó csőszakasszal a sűrítettlevegő-rendszerhez kapcsoltuk. A kamera stabil rögzítése végett alumíniumprofilokból egy robosztus állványszerkezetet készítettünk, mely segítségével a megfelelő pozícióba, a vizsgált csövekkel pontosan szemben helyeztük el azt. Azért, hogy a csövek végének mozgását vizsgálhassuk, fontos volt azok kontrasztos elkülönítése az egyéb elemektől. A sárgarézből készült rács erős reflexiója miatt károsíthatta volna a kamerát, ezért a csöveken kívül minden olyan elemet matt feketere festettünk, amelyek a kamera képén megjelentek. A csövek nem kerültek lefestésre, mivel a megszáradó festékréteg növelte volna azok merevségét, így módosítva a mozgási jellemzőket. Viszont a csövek végén található 3 mm hosszúságú, piros színű gumicsövecskéket fekete színre festettük, mivel feltételezésünk szerint azok nem szenvednek alakváltozást a mozgás során; csupán a szilikon csövek tehetetlenségének növelése szempontjából játszanak szerepet.

Szándékunk szerint 9 db. csövecske mozgását kívántuk megvizsgálni, ezért a teljes aktív rács középső részén 3×3 db. csövet jelöltünk ki. Ahhoz, hogy ezeket a csöveket a készített képsorokon megkülönböztethessük, szükséges volt a végeiken található piros csövecskék különböző színű festékekkel történő átfestése. Első ötletünk az volt, hogy körömlakkot alkalmazunk erre a célra. Sajnos azonban ez a megoldás nem vált be, mivel a felhasznált lakkok száradásuk után fényesek maradtak, így a kamerába jóval nagyobb fénymennyiség jutott a szükségesnél. Ezért a fényes pontok környezete is fehér színként jelent meg a monitoron. A végső megfelelő megoldás egyszerű temperafesték alkalmazása volt, mivel az száradása után matt felületű maradt. Ez az elképzelés alkalmasnak tűnt a mérések elvégzéséhez, mivel a vásárolt készlet színeiből könnyen kikeverhető volt 9, egymástól a monitoron is jól elkülönülő szín. A megfelelően lefestett aktív rács a 3. ábrán látható.



3. ábra. A 9 db. vizsgált csövecske a feketere festett háttérrel, a ráccsal és a szomszédos fekete végű csövekkel.

3. Mérés, adatfeldolgozás

A következőkben a mérés lebonyolítását és az abból kapott képsorok feldolgozásának menetét mutatjuk be. A megfelelő kamera- és szoftverbeállításokat követően a felvett képsorozatot a kamera vezérlőprogramja által „bmp” kiterjesztéssel mentettük el, melyek feldolgozását a MATLAB nevű szoftvercsomaggal végeztük el.

3.1. A mérés menete

Mivel a kamera expozíciós ideje a magas felvételi ráta miatt nagyon kis értékre adódott, szükséges volt erősen megvilágítani a vizsgált rácsot. Egyszerre három reflektort is alkalmaztunk, mivel így megfelelő erősségű fény mellett mérhettünk, továbbá a három irányból való megvilágítás hatására csökkent az árnyék erőssége, így javítva a felvételek minőségét.

A kamera megfelelő expozíciós idejének beállítását a szoftvere segítette, ugyanis élő képen láthattuk, hogy a paraméterek változtatása esetén hogyan módosul a kép világossága, továbbá a mozgó csővégek elmosódottsága. Tapasztalatunk alapján a legmegfelelőbb expozíciós idő $t_{exp} = 300\mu s$ -ra adódott.

Mivel a csövek nagysebességű mozgását kívántuk követni, ezért olyan felvételi rátát kellett beállítanunk, mely alapján 1-1 kép között az egyes csövek végeinek elmozdulása csupán néhány pixel. Ezt a feltételt teljesítve a képkészítés frekvenciája $f_{acq} = 1\text{ kHz}$ -re adódott. A felvételi frekvencia és a pixel-elmozdulás ismeretében könnyen kiszámítható volt a pixel-sebesség, mely a csővégek két, egymást követő kép között pixeleken mért elmozdulásának és a képkészítés frekvenciájának (f_{acq}) szorzata.

Az aktív elemek mozgásáért a rácsot a gyűjtőcsövén keresztül $p_{in} = 2,1\text{ bar}$ nyomású préslevegővel tápláltuk meg. Ezzel a beállítással 4-szer ismételtük meg a mérést, minden mérési sorozatban a mozgás 1 s-os részletét örökítettük meg, sorozatonként tehát 1000 db. képet készítve. Az egyes képsorozatokat 869×816 pixel felbontással, 24 bites színmélységgel mentettük el bitmap fájlokban.

3.2. Az adatok feldolgozása

A négy különböző képsorozatot a programból a merevlemezre exportáltuk, így $4 \times 1000 \times 2,1\text{ MB}$ -os adatmennyiséget kaptunk. Azért, hogy a feldolgozáshoz fejlesztendő MATLAB script gyorsabban fusson, az első és a negyedik méréssorozat képeit alacsonyabb, 466×423 pixeles felbontású képekké konvertáltuk, így azok mérete az eredeti 25%-ára csökkent. Jelen dolgozatban csupán a két mérési sorozat eredményeit mutatjuk be.

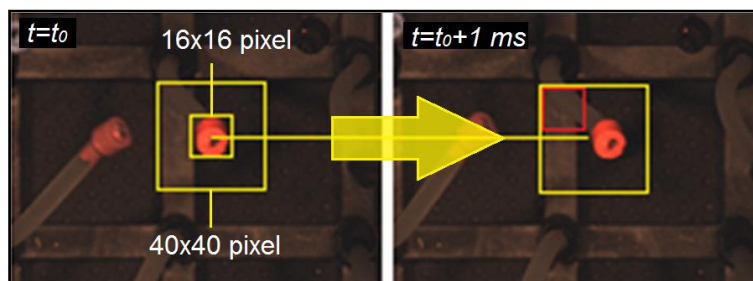
Ezt követően kezdődött a script felépítése, fejlesztése. A célunk tehát egy olyan mátrix létrehozása volt, mely minden kép esetén (azaz ms -os időközönként) tartalmazza a 9 különböző színű csővég x és y koordinátáit. Ehhez elsőként a képeket kellett importálnunk a MATLAB-ba. Ehhez a program beépített képfeldolgozó csomagját használtuk, melynek számos alkalmazását a [12] könyv mutatja be. 1-1 kép beolvasása után egy 3D-s mátrixot kaptunk, melynek - szemléletesen bemutatva - az „alapsíkját” az x - y pixel-koordinátapárok adták, a 2., 3. és 4. síkját pedig a színek R (vörös), G (zöld) és B (kék) színek kódjai. Ezek értéke 0 és 255 között változott, azaz a 3 szín esetén $(2^8)^3 = 2^{24}$ színvariáció lehetséges (ezt nevezik 24 bites színmélységnek). Ahhoz, hogy a program beazonosíthassa a 9 általunk használt színt, definiálnunk kellett azokat az R-G-B intervallumokat, melyeken az adott

színek előfordultak. Ezért a képsorozat néhány képét manuálisan megvizsgáltuk, és feljegyeztük az egyes színek színekódjait.

Nagyon költséges eljárás lett volna az, ha minden egyes kép összes pixelét megvizsgáljuk, hogy beleesik-e az általunk feltételként támasztott R-G-B intervallumokba. Ezért egy ettől jóval költséghatékonyabb eljárást dolgoztunk ki, mely a fizikailag lehetséges elmozdulást, mint feltételt használja ki: a program csupán a képsorozat első képét vizsgálta át pixelenként. Azon képpont-koordinátákat, melyek a keresett színeknek megfeleltek, a program színenként egy-egy mátrixba mentette el, „1” értékkel. A mátrix egyéb elemei „0” értéket kaptak.

Mivel akár a kép több részén is található a program a keresésnek megfelelő pixeleket, ezért a következő feladat a zavaró pixelek kiszűrése, és a beszínezett csővég középpontjának megkeresése volt. Ehhez egy olyan ciklust írtunk, mely egy 16×16 pixeles méretű „ablakot” léptetett végig pixelenként és soronként az első képen, és lépésenként összeszámolta az ablakon belüli adott színű pixelek számát. Végül meghatározta annak az ablaknak a középpontját, melyben a legtöbb pixel felelt meg a keresési kritériumnak. Ezt a műveletsort elvégezve a többi szín esetében is, megkaptuk a kezdeti képhez tartozó legnagyobb színhalmazok középpontjait jelölő koordinátákat, azaz beazonosítottuk az adott színű elemek helyzetét.

Ezt követte a színek többi képen való keresése. Ehhez azonban csupán a képek egy bizonyos területén kerestünk, mégpedig ott, ahol a cső előfordulása fizikailag lehetséges volt. Mivel a csővég pozíciója nem változhatott meg ugrásszerűen és 1-1 kép között eltelt idő 1 ms volt, így bőven elegendőnek bizonyult egy 40×40 pixel méretű, az előző kép alapján meghatározott középpontú ablakban keresni az elmozdult csővég koordinátáit. Így a teljes kép átvizsgálásához képest közel 125-ször gyorsabban futott le a keresés. A keresőalgoritmust szemléletesen a 4. ábra bemutatja be.



4. ábra. A piros csővég elmozdulásának követése: a jobb oldali ábrán a bal képen meghatározott, 16×16 pixeles ablak középpontja körüli 40×40 pixeles területen „szalad végig” a piros keresőablak, mely a piros pixeleket számolja össze.

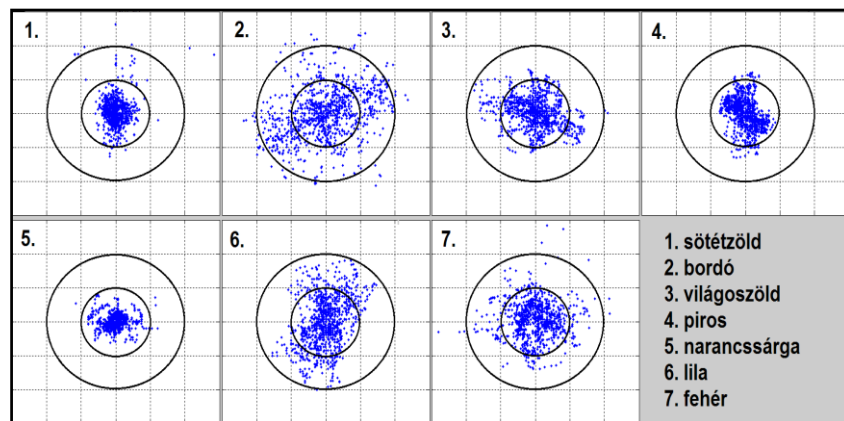
Az algoritmust végül 7 színen futtattuk le a 9 különböző szín helyett, mivel a színekód-intervallumok meghatározásakor olyan színvariációk is megjelentek a képeken, melyek egyszerre két szín intervallumába is beleillettek volna. Tehát a program így 7 különböző vektort hozott létre, melyek tartalmazták a csővégek helyzetét (x, y koordináták) az 1000 db. kép estén. E vektorokat egy újabb scriptben dolgoztuk fel.

A következő programalgoritmus azt a célt szolgálta, hogy vele kirajzoltassuk a vektorokat, különböző szűrési eljárásokkal csökkentsük a hibákat, továbbá megvizsgálhassuk a

csövek mozgására jellemző mennyiségeket: periodicitás, elmozdulások mértéke, leírt pálya alakja, stb.

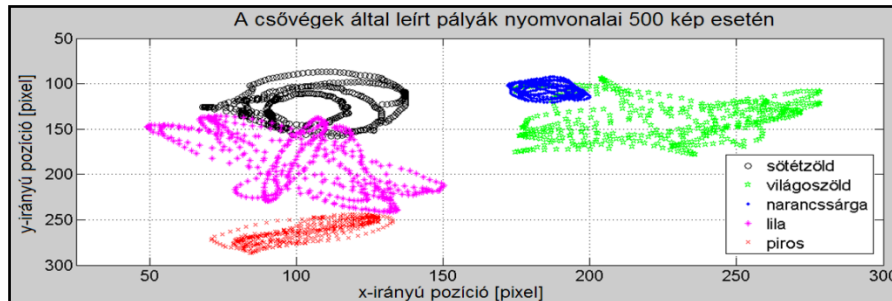
Mivel sajnos a képfeldolgozás során a keresési algoritmus hiányosságai miatt előfordultak hibák, ezért ezek megnehezítették a későbbi munkánkat. A vektorok beolvasása után elsőként simítófüggvényt alkalmaztunk, mely a kilógó –tehát valószínűleg hibás- értékeket a trendet megfelelőbben követő értékekkel helyettesítette. Ehhez a MATLAB beépített „smooth” függvényét alkalmaztuk, különböző simítási metódusokat kipróbálva. A legmegfelelőbb eredményt az „rlowess” nevű eljárással értük el, mely a legkisebb négyzetek módszerét és 1. fokú polinom modellt alkalmaz.

Az 5. ábrán az egyes csővégek 1-1 kép közötti elmozdulás-vektorainak a végpontjai láthatók oly módon, hogy a vektorokat a koncentrikus körök középpontjából indítjuk. Mivel az elmozdulások azonos időközökhöz tartoznak, így azok arányosak az adott elem sebességével. Megfigyelhető, hogy például a sötétzöld és a narancssárga színek esetén e pontoknak igen jelentős része a belső körön belül található, mely kör az 5 pixeles elmozdulást jelöli. Ezek alapján megállapítható, hogy ezek a csövek relative kis sebességgel mozognak. E megállapításunkat a képsorozatból készített videó is igazolta. Más színeknél, - például a bordó és a lila színek esetén –az elmozdulások számos esetben meghaladják az 5 pixelt: a pontok jelentős része esik az 5-10 pixeles gyűrű alakú tartományba, így azok sebessége nagyobb az előzőekhez képest.



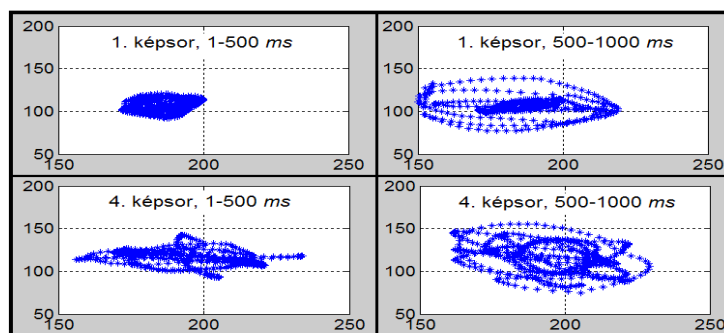
5. ábra. A vizsgált csővégek 1-1 kép között mért pixel-elmozdulása 500 kép esetén. A rácsköz 5 pixel, a körök középpontjai felelnek meg a „0” pixeles elmozdulásnak.

A 6. ábrán néhány csővég mozgásának nyomvonala figyelhető meg. Jobban szemlélve felfedezhető valamiféle periódusosság például a sötétzöld és a piros színek nyomvonalai-ban. Ez szintén igazolja a videón látottakat: a csövek végei ellipszishez hasonló alakú pályán mozognak, viszont a csövekből kiáramló légsugár és a gyakran előforduló ütközések hatására ezek az ellipszisek torzulnak, a tengelyeik szöghelyzete folyamatosan, ütközés esetén hirtelen változik. Az 5. ábrát is felhasználva az is megfigyelhető, hogy az egyes elemek sebessége összefüggésben van az általuk bejárt pálya méretével. Például a narancssárga elem átlagosan kis sebességgel mozog, és viszonylag kisméretű ellipszis alakú pályát ír le. Ezzel szemben a számos esetben nagyobb sebességű lila elem jóval nagyobb méretű pályát jár be.



6. ábra. 5 különböző színű elem mozgásának nyomvonala az 1. képsorozat 1-500 képe alapján. Több szín esetén is megfigyelhető a mozgás periódusossága.

A 6. ábra alapján elmondható, hogy a vizsgált öt különböző szín közül három szín közel állandó pályán mozog, a másik kettő szín (lila és világoszöld) pályája azonban nagymértékben változik. Így felvetődött annak a kérdése, hogy a jó közelítéssel azonos pályákat befutó elemek mozgására vajon az ábrán látható alak a jellemző, vagy ez csupán az adott fél másodperces időintervallumra jellemző? Ennek megválaszolására a 7. ábrán szemléltettük a narancssárga színű elem különböző időintervallumokban bejárt pályáját.



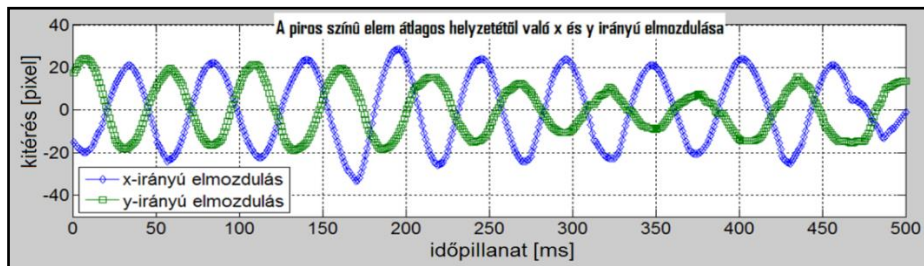
7. ábra. A narancssárga színű elem 1. és 4. képsorozat 1-500, illetve 500-1000 ms-os időintervallumaiban végzett mozgása.

A 7. ábra alapján elmondható, hogy nincs kitüntetett pályája a mozgásnak, a pálya alakja folyamatosan változik az idő függvényében. Ebben a már említésre került ütközéseknek is nagy szerepük lehet.

Mivel az előzőekben bemutatott eredmények alapján felvetődött a mozgás periodicitásának jellege, ezért a következőkben annak vizsgálatával foglalkozunk.

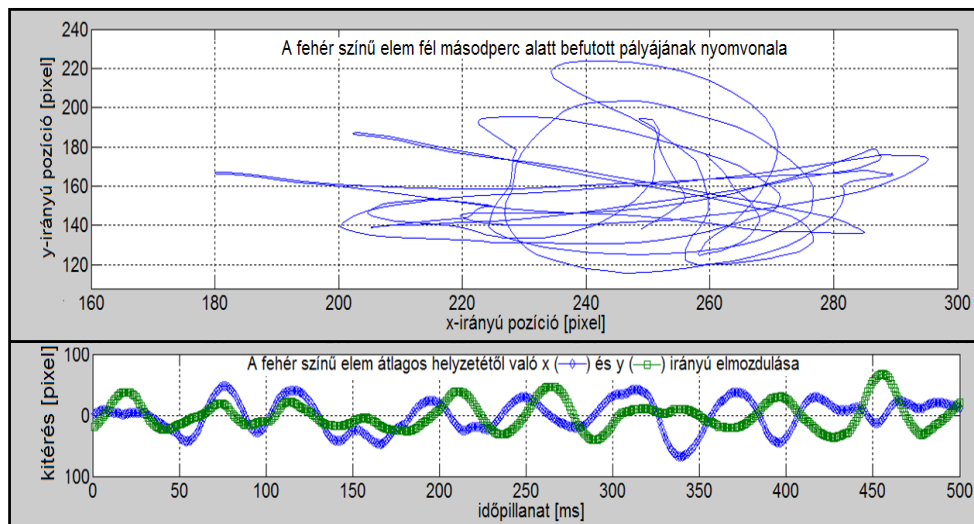
Miként az a 6. ábrán is látható, a piros szín estében kimondottan jellemző a periodikus mozgás; továbbá talán ez volt a többi közül a legkitűnőbb szín, így a későbbiekben a piros színű elem mozgását vizsgáltuk meg. A 8. ábrán a vízszintes (x) és függőleges (y) irányú elmozdulást figyelhetjük meg a képek sorszámának (tehát az időnek) a függvényében. Szépen mutatkozik a mozgás periódusossága: az x és az y irányú kitérést azonos frekvenciájú, de változó amplitúdójú szinuszos függvények adják meg. Az amplitúdó változásának hatására torzul az ellipszis, ez megfigyelhető a 6. ábrán is. A két függvény frekvenciája közel azonos, ebből adódóan a mozgó elem által leírt ellipszis tengelyének szöghelyzete nem

változik. A vizsgált időtartamban (1. képsorozat, 1-500 ms) a videót megnézve megállapíthattuk, hogy a piros végű cső nem ütközött más csövekkel, ezzel magyarázható annak „szabályos”, periodikus mozgása.



8. ábra. A pirosra festett elem horizontális és vertikális kitérése a mozgás átlagos középpontjához képest, az idő függvényében (1. képsor, 1-500 ms).

Az előbb bemutatott esettel ellentétben a fehér végű cső igen eltérő nyomvonalat hagyott maga után, mely a 9. ábra felső részén látható. A piros cső szabályos mozgásával ellentétben itt nem, vagy csak igen nehezen vehetünk észre periodicitást a mozgásban. Ehhez az ábra alján bemutatott kitérés-idő grafikon nyújt segítséget. Az alapján ugyanis elmondható, hogy a mozgás ez esetben is periodikus, bár több helyen is zavarás jelentkezik a függvényben. Ennek magyarázata a videón is nyomon követett több ütközés, mely okán a cső hirtelen irányt változtat, és a dinamikus hatásoknak megfelelően más pályán mozog tovább.



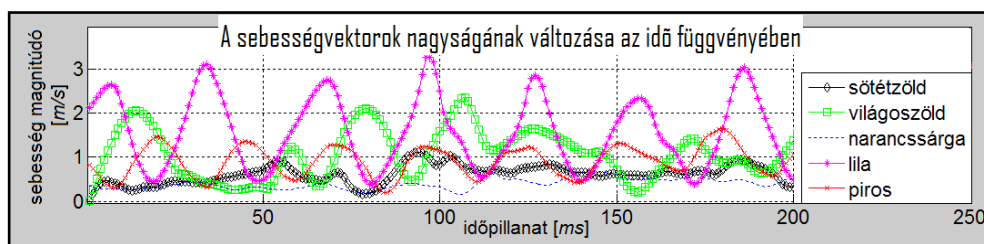
9. ábra. A fehér színű elem mozgása az első képsorozat 1-500 db képe alapján (felső diagram) és a pálya átlagos középpontjától mért x és y irányú kitérés (alsó diagram).

Az egy-egy kép közötti elmozdulásokból és a képkészítési rátából számíthatók voltak a képpáronként értelmezett átlagos pixel-sebességek. Az egyik képet felhasználva a térbeli

kalibrációhoz (ismert volt az M rácsállandó), a $C=3,802 \times 10^{-4} m/pixel$ kalibrációs konstans adódott. Ezt a mennyiséget is felhasználva kiszámíthattuk, hogy egy-egy képpár között mekkora átlagsebességgel ($\overline{v}_{i,j}$) haladtak a vizsgált elemek. A sebességvektorok hosszát a

$$\overline{v}_{i,j} = C \cdot \sqrt{\left(\frac{x_i - x_j}{t_{acq}}\right)^2 + \left(\frac{y_i - y_j}{t_{acq}}\right)^2}, i=2..1000, j=i-1 \quad (2)$$

összefüggés alapján határoztuk meg, majd a „smooth” függvénnyel „simítottuk” az adatsor értékeit. E sebességeket az idő függvényében szemlélteti a 10. diagram.



10. ábra. A sebességek nagyságának változása különböző színű mozgó elemek esetén (1. képsorozat, 1-250 ms).

A 10. ábrán is megfigyelhetjük, hogy a legkisebb átlagsebességgel a narancssárga elem mozog. A piros és a lila színű elemek esetén szembevetendő a sebességváltozás szinuszos jellege, melyet a pálya elliptikus alakjával magyarázhatunk. A videó és az előző ábrák alapján ezek az elemek nagyon elnyújtott ellipszis alakú pályákat írnak le, így a sebességüknek közelítőleg $0 m/s$ értékhez kell tartaniuk a nagytengely végpontjaiban, és közel szinuszosan kell nőniük egészen a nagytengely felezőpontjáig, majd onnan ismét csökkenniük kell. Ez a tendencia szépen látszik a 10. diagramon.

A sötétzöld színű elem sebessége az ábra tanúsága alapján csak igen kis intervallumon belül változik, ennek magyarázata a 6. ábrán keresendő: ez az elem nagyjából kör alakú mozgást végez, így a sebességének nagysága közel állandó kell, legyen.

4. Összefoglalás, jövőbeni tervek

A tanulmányban egy komplett mérési feladat lett elvégezve, mely során összeépítésre került a mérőrendszer, a megfelelő beállításokkal négy mérési sorozat lett elvégezve, majd számítógépes programmal dolgoztuk fel a kapott képsorozatokat.

Az eredményeink alapján különböző következtetéseket vonhattunk le. A vizsgált csövek mozgása valamiféle periodikus jelleget mutat, viszont a mozgó csövek és a belőlük kiáramló nagysebességű légsugár egymásra dinamikai hatással vannak, így a periodikus mozgásba véletlenszerűen zavarásokat visznek be, melyeket diagramokon szemléltettünk. Látható, hogy az egyes csövek különböző formájú pályákat futnak be, eltérő sebességekkel. Bemutattuk azt is, hogy az egyes csöveknek nincs jellemző pályaalakjuk (legfeljebb egy nagyon rövid időintervallumon belül), mivel a különböző időintervallumokban végzett kiértékelések más és más eredményekkel szolgáltak a pályák alakjait illetően.

Az elmozdulásokból származtatott sebességértékek szinuszos jelleget mutatnak, mely igazolja megfigyeléseinket. A középpont-kereső algoritmusból származó hibás értékeket a

„smooth” függvénnyel igyekeztünk kijavítani, mellyel csupán közelíthettük a valós értékeket. Ezért a későbbiekben a program továbbfejlesztése fog megtörténni: az egyik lehetséges folytatás a korreláció elvének alkalmazása lesz, mely az egyes képek hasonlóságain alapuló keresőeljárás. Várhatóan ezzel a módszerrel jóval pontosabban lesznek követhetőek az egyes csővégek, így precízebbé válik azok középpontjainak követése.

5. Köszönetnyilvánítás

Szaszák Norbert Tibor publikációt megalapozó kutatása a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatómunka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák Kiválósági Központ keretében teljesül.

6. Irodalom

- [1] Kurian, T., Fransson, J. H. M.: *Grid-generated turbulence revisited*, Research Fluid Dynamics Res. Vol. 41, Nr. 021403, 2009.
- [2] Liu, R., Ting, D. S. -K.: *Turbulent flow downstream of a perforated plate: sharp-edged orifice versus finite-thickness*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 129, 2007. pp. 1164-1171.
- [3] Uberoi, M.S.: *Energy transfer in isotropic turbulence*, Physics of Fluids Vol. 6, Nr. 8, 1963.
- [4] Larssen, J. V., Devenport, W. J.: *On the generation of large-scale homogeneous turbulence*, Experiments in Fluids Vol. 50, 2011. pp. 1207-1223.
- [5] Antonia, R. A., Lavoie, P., Djenidi, L., Benaissa, A.: *Effect of a small axisymmetric contraction on grid turbulence*, Experiments in Fluids Vol. 49, 2010. pp. 3-10.
- [6] Ling, S. C., Wan, C. A.: *Decay of isotropic turbulence generated by a mechanically agitated grid*, Physics of Fluids, Vol 15, Nr. 8, 1972. pp. 1363-1369.
- [7] Kang, H. S., Meneveau, C.: *Experimental study of an active grid-generated shearless mixing layer and comparisons with large-eddy simulation*, Physics of Fluids, Vol 20, Nr 125102, 2008.
- [8] Thormann, A., Meneveau, C.: *Decay of homogeneous, nearly isotropic turbulence behind active fractal grids*, Physics of Fluids, Vol. 26, Nr. 025112, 2014.
- [9] Ozono, S., Nishi, A., Miyagi, H.: *Turbulence generated by a wind tunnel of multi fan type in uniformly active and quasi-grid modes*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 94, 2006. pp. 225–240.
- [10] Szaszák, N.: *Experimental characterization of a cost-effective active grid for turbulence generation*, MSc. thesis, Otto von Guericke University, Magdeburg, 2011.
- [11] Szaszák, N., Bordás, R., Mátrai, Zs., Szabó, Sz., Thévenin, D.: *Experimental Characterization of a Cost-Effective Semi-Active Grid for Turbulence Stimulation*, Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow, Budapest, 2012.
- [12] Blanchet, G., Charbit, M.: *Digital Signal and Image Processing using MATLAB*, könyv, 2006.