

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET
ÁRAMLÁS- ÉS HŐTECHNIKAI GÉPEK INTÉZETI TANSZÉK

ÚJ TÍPUSÚ AKTÍV TURBULENCIAGENERÁTOROK FEJLESZTÉSE ÉS LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

PhD értekezés

KÉSZÍTETTE:

Szaszák Norbert Tibor

okleveles energetikai mérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK SZAKTERÜLET
TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Prof. Dr. Tisza Miklós

a műszaki tudományok doktora, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Prof. Dr. Páczelt István

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, professzor emeritus

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Prof. Dr. Czibere Tibor

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, rektor emeritus

TÉMAVEZETŐ:

Prof. Dr. Szabó Szilárd

egyetemi tanár

Miskolc, 2018

TARTALOMJEGYZÉK

Eredetiségi nyilatkozat	4
Jelölésjegyzék.....	5
Témavezetői ajánlás	8
1. Bevezetés.....	10
2. A kutatás előzményei és fő célkitűzései.....	12
2.1. A doktori témám alapjául szolgáló németországi kutatómunka.....	12
2.1.1. A mérési összeállítás	13
2.1.2. Az elsődleges vizsgálatok jelentősebb eredményei	14
2.1.3. Az eredményekből levont következtetések	15
3. Szakirodalmi áttekintés	16
3.1. A turbulencia, mint jelenség	16
3.2. A rácsturbulencia	17
3.3. Passzív rácsok.....	18
3.4. Aktív rácsok.....	19
4. A rácsturbulenciát leíró főbb fizikai mennyiségek.....	22
4.1. A turbulencia térbeli eloszlását jellemző fontosabb mennyiségek	22
4.2. A turbulens kinetikus energia spektrális eloszlása	25
5. A laboratóriumi kutatásaim során alkalmazott mérés technikák.....	27
5.1. Hődrótos légsebesség-mérés (HWA)	27
5.2. Nagysebességű kamerák	29
5.3. Hőkamera.....	30
6. Szélcsatornák tervezése és fejlesztése a rácsturbulencia vizsgálatához.....	31
6.1. Mini-szélcsatorna összeállítása, fejlesztése	31
6.2. Új szélcsatorna tervezése és összeállítása	32
7. Külső energiaforrást nem igénylő aktív rács összeállítása, áramlástechnikai vizsgálata ..	35
7.1. Poliészter-szalagokból felépített rács összeállítása és vizsgálata	35
7.1.1. Passzív és aktív működési mód összehasonlítása	36
7.2. Acélszalag-rács összeállítása és vizsgálata.....	38
7.2.1. A fémrács és a feszítőszerkezet összeállítása, szélcsatornába történő beépítése	38
7.2.2. Szisztematikus vizsgálatok elvégzése	39
8. Préslevegővel működtetett aktív-rács összeállítása, laboratóriumi vizsgálata.....	50
8.1. Az aktív elemek kinematikájának vizsgálata Magdeburgban	51
8.2. Az újabb aktív elemeket tartalmazó aktív rács gyorskamerás vizsgálata a Miskolci Egyetemen	57

8.3.	Az aktív elemeket jellemző dimenziómentes paraméterek meghatározása.....	61
8.4.	A légsugár-rács által létrehozott turbulencia vizsgálata	63
8.4.1.	A mérési összeállítás	63
8.4.2.	A passzív és az aktív rendszer esetén kalkulált áramlási jellemzők összehasonlítása	67
8.5.	A légsugár-rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálata.....	77
8.5.1.	A mérési összeállítás, az alkalmazott mérési elv	78
8.5.2.	A keveredéssel kapcsolatos paraméterek bemutatása	81
9.	Összefoglalás.....	87
10.	Summary	89
11.	Új tudományos eredmények- Tézisek	90
12.	Gyakorlati hasznosíthatóság és továbbfejlesztési lehetőségek.....	93
	Köszönetnyilvánítás	95
	Az értekezés témájában megjelent saját publikációk	96
	A szerző egyéb témákban megjelent publikációi	98
	Irodalomjegyzék.....	99

EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott Szaszák Norbert Tibor büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy az „Új típusú aktív turbulenciagenerátorok fejlesztése és laboratóriumi vizsgálata” című, a Miskolci Egyetemen működő Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolába beadott PhD értekezés önálló munkám eredménye, az irodalmi hivatkozások egyértelműek és teljesek.

Kelt: Miskolc, 2018. október 29.

.....
Szaszák Norbert Tibor
doktorjelölt

JELÖLÉSJEGYZÉK

Latin, nagybetűvel jelölt mennyiségek

B	fekete végű aktív elem pályagörbéjének koordinátáit tartalmazó adatmátrix	pixel
C_ε	disszipációs konstans	–
C_a	aktív elem relatív hossza	–
C_m	aktív elem mobilitási száma	–
C_{res}	nagysebességű kamerával készített képek fizikai felbontása	pixel/mm
C_t	aktív elem relatív falvastagsága	–
D	rácsátmérő/rácsvastagság	mm
$E(\kappa)$	teljes energiaspektrum	m^3/s^2
E_t	aktív elem rugalmassági modulusa	MPa
H	szélcsatorna mérőterének oldalhossza	m
L	alapáramlás irányú integrál hosszskála	m
M	rácsállandó	m
P	örvényprodukción	m^2/s^3
P_{vill}	a fűtőegység által felvett villamos teljesítmény	W
$Q_{max,k}$	kompresszor maximális légszállítása	m^3/h
$Q_{max,r}$	rotaméter által maximálisan mérhető térfogatáram (normál állapotban)	m^3/h
Q_{sec}	másodlagos (prés)levegő-térfogatáram	m^3/h
Re	Reynolds-szám	–
Re_M	rács-Reynolds-szám	–
Re_λ	Taylor-Reynolds-szám	–
T	integrál időskála	s
T_u	alapáramlás irányú, u-komponensből számított turbulencia-intenzitás	%
T_v	v sebességkomponensből számított turbulencia-intenzitás	%
T_w	w sebességkomponensből számított turbulencia-intenzitás	%
U	időátlagolt sebesség-magnitúdó	m/s
U_{ref}	időátlagolt referenciasebesség	m/s
V_p	puffertartály-térfogat	l
W	fehér végű aktív elem pályagörbéjének koordinátáit tartalmazó adatmátrix	pixel

Latin, kisbetűvel jelölt mennyiségek

f	frekvencia	Hz
f_{sz}	szalagok rezgési frekvenciája	Hz
f_k	képkészítési frekvencia	Hz
k	fajlagos turbulens kinetikus energia	m^2/s^2
m_{ex}	aktív elem végére helyezett extra tömeg értéke	g
l^*	aktív elem tömegközéppontjának a csatlakozási ponttól mért távolsága	mm
u'	alapáramlás irányú sebesség-idősor r.m.s. értéke	m/s
v'	alapáramlásra merőleges, vízszintes irányú sebesség-idősor r.m.s. értéke	m/s
w'	alapáramlásra merőleges, függőleges irányú sebesség-idősor r.m.s. értéke	m/s
u_η	Kolmogorov-sebességskála	m/s
i	izotrópia-arány	–
i_m	átlagos izotrópia-arány az adott mérési vonalban	–
i_{std}	az adott mérési vonalban kapott izotrópia-értékek szórása	–
$l_{a,t}$	aktív elem aktív(szabadon mozgó) hossza	mm
r	két vizsgált pályagörbe közötti kétdimenziós korrelációs együttható értéke	–
n_k	kompresszor percenkénti fordulatszáma	r.p.m.
$p_{g,max,k}$	a kompresszor által előállított maximális nyomáskülönbség	hPa
\dot{m}_{pr}	a légsugaras rácstra a szélcsatorna konfúzorából érkező levegő tömegárama	kg/s
\dot{m}_{tot}	a légsugaras rácst követő mérőtérben mért tömegáram	kg/s
\dot{m}_{sec}	a légsugaras rácst aktív esetben megtápláló préslevegő tömegárama	kg/s
x	a rácstól mért távolság	m
y_{cs}	csővég vízszintes pozíciója	pixel
z_{cs}	csővég függőleges pozíciója	pixel
\bar{u}	pontbeli időátlagolt sebességkomponens az alapáramlás irányában	m/s
\bar{v}	pontbeli időátlagolt sebességkomponens az alapáramlás irányában	m/s
\bar{w}	pontbeli időátlagolt sebességkomponens az alapáramlás irányában	m/s
$d_{i,t}$	aktív elem belső átmérője	mm
w_t	aktív elem falvastagsága	mm

Görög betűvel jelölt mennyiségek

ν	kinematikai viszkozitási tényező	m ² /s
Δt_k	képkészítés során az egy-egy kép készítése között eltelt idő	ms
ε	turbulens kinetikus energia disszipációs ráta	m ² /s ³
η	Kolmogorov-hosszskála	mm
κ	hullámszám	1/m
κ_H	a mérőtér jellemző méretéből számított hullámszám	1/m
λ_g	Taylor-mikroskála	mm
ρ_t	aktív elem anyagának sűrűsége	kg/m ³
σ	kitöltési tényező /solidity ratio/	–
τ_η	Kolmogorov-időskála	s
φ	tömegáram-viszony a légsugaras rács aktív állapotában	–

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Szaszák Norbert

„Új típusú aktív turbulenciagenerátorok fejlesztése és laboratóriumi vizsgálata”
című Ph.D. értekezéséhez

Szaszák Norbert középiskolai évei alatt villamosipari képzésben részesült, s ezt követően egyetemi tanulmányait a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Energetikai Mérnök Szakán folytatta, mert e képzés keretében – többek között – fontos szerep jut a villamos energetikának is. Mind a BSc., mind pedig az MSc. szintű tanulmányait e szakon végezte az előbbi a Gépészeti, utóbbit pedig az Épületenergetika Szakirányon.

Egyetemi tanulmányait kiemelkedő szorgalommal és aktivitással végezte. E tudatos felkészülés keretében kötelező tanulmányain túl

- Erasmus ösztöndíjjal öt hónapos külföldi részképzésen vett részt Svédországban a Lulea University of Technology-n;
- részt vett az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke aktuális ipari projektjeiben;
- MSc. diplomamunkáját a Magdeburgi "Otto von Guericke" Egyetemen készítette el, a vonatkozó dolgozata angol nyelvű: "Experimental characterization of a cost-effective active grid for turbulence generation." E téma lett későbbi kutatási tevékenységének alapja.

Míndeközben kiemelkedő tanulmányi munkájának jutalmául egyetemi (Tanulmányi emlékérem különböző fokozatai (3-szor), Köztársasági ösztöndíj), városi (Miskolc Város Ösztöndíjasa (2-szer)) és ipari (A Termoment Kft. kiváló szakdolgozat díj, Bosch-díj) elismerésekben is részesült.

További tevékenysége tekintetében meghatározó volt a magdeburgi diplomamunka elkészítése. Egyrészt érdeklődése a tudományos munka irányába fordult, másrészt olyan témával is megismerkedett, amely számára érdekes és továbbfejlesztésre érdemesnek ígérkezett. Ezért jelentkezett és nyert felvételt a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolájába 2012-ben. Doktori képzése és az azt követő kutatómunka idején is igazolta a korábbi tanulmányai alatt tanúsított elhivatottságát és kitartását. Doktori tanulmányai során, majd 2015-től oktatói munkája mellett magas szintű kutatásokat folytatott a turbulenciagenerátorok fejlesztése tématerületen. Jelentős közreműködésével – speciálisan az aktív turbulenciagenerátorokra épülő – DAAD német-magyar kutatócsere pályázat került kidolgozásra, amely 2014-2015. időszakban segítette az intenzív nemzetközi kutatómunkát. Ennek keretein belül több alkalommal is hosszabb időt töltött Magdeburgban, ahol a témával kapcsolatos fejlesztési, mérési és kiértékelési feladatokat végzett.

Munkájának magas szintű teljesítését segítették az utóbbi években általa elnyert tehetséggondozó pályázatok: Apáczai Csere János Doktoranduszhallgatói ösztöndíj (12 hónap), Nemzeti Tehetség Program keretében az „Egyedi fejlesztést biztosító ösztöndíjak NTP-EFÖ-P-15” elnevezésű ösztöndíj.

Szaszák Norbert olyan mérnök-kutató alkat, aki a mérések területén kiválóan alkalmas kutató munkára. A mérések megtervezését, valamint a berendezések megépítését is részben önállóan, részben irányításával a szakszemélyzet végzi. A mérések végrehajtásában és kiértékelésében alapos, körültekintő, precíz. A korszerű, bonyolult mérőberendezések kezelését hamar elsajátítja. A mérések kiértékelése nem okoz számára gondot, szükség esetén a vonatkozó kiértékelő szoftvereket önállóan elsajátítja és sikerrel alkalmazza. Biztos angol nyelvismeretének birtokában a vonatkozó szakirodalmat kellő alaposítással tanulmányozza és dolgozza fel.

Doktori munkája keretében sikerrel alkalmazta a fenti készségeit. A tématerület – az aktív turbulenciagenerátorok – megismerését követően nagymérvű tudatossággal készült a vállalt feladat kidolgozására. Kiemelendő, hogy jelentős feladatot vállalt a mérésihez szükséges feltételek megteremtésében is (pl. szélcsatornát fejlesztett, légellátó berendezést épített ki). A rendelkezésére álló mérés technikákat alkotó módon, nem egyszer újszerű módon alkalmazta (pl. gyorskamera alkalmazása mozgó elemek korrelációjának vizsgálatához, termokamera alkalmazása gázkeveredés-vizsgálatokhoz). A mérések adatainak feldolgozásához jelentős feldolgozó modulokat készített MATLAB környezetben. Az általa vizsgált két turbulenciagenerátor közül a szalag-rács teljes mértékben saját ötlete és kivitelezése. A légsugaras rács esetében is jelentős fejlesztő munkát végzett a megfelelő geometriai és anyagtulajdonságokkal rendelkező mozgó elemek kiválasztásakor.

Mindkét rács tekintetében az általuk létrehozott turbulencia jellemzőinek szabályozása és a turbulencia jellemzőinek mérése tekintetében szisztematikus vizsgálatokat tervezett és hajtott végre. A nemzetközi szakirodalomban fellelhető értékelési módszerek többségét alkalmazta. A mérési adatait, azok különböző geometriai és fizikai jellemzőktől való függését a szakirodalomban ismerttetett más típusú generátorok hatásával összevetette. Tudományos eredményeit alaposan bizonyított tézisekben foglalta össze.

Összefoglalóan bizton állíthatjuk, hogy Szaszák Norbert kutató munkája eredményeképpen gazdagabb lett a vonatkozó nemzetközi szakmai közösség két – hatásában jól dokumentált – új típusú turbulenciagenerátorral.

A jelölt dolgozata a sokéves kitaró munka kellően átfogó, de mégis tömör összefoglalása.

A dolgozatot jó szívvel ajánlom minden szakmabeli olvasónak és külön a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola figyelmébe.

Miskolc-Egyetemváros, 2018. október 22.

Prof. Dr. Szabó Szilárd

1. BEVEZETÉS

Doktori kutatómunkám alapjául a diplomatervem szolgált. 2011-ben a magdeburgi "Otto von Guericke" Egyetemen (a továbbiakban: Magdeburgi Egyetem) végeztem laboratóriumi vizsgálatokat egy új típusú turbulenciát generáló aktív rács fejlesztéséhez kapcsolódóan. Mivel igen érdekesnek találtam ezt a témát, továbbá a fejlesztési lehetőségek új tudományos eredmények elérésének lehetőségét vetítették előre, ezért e témával 2012-ben jelentkeztem, majd felvételt nyertem a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán működő Sályi István Gépészeti tudományok Doktori Iskolába.

Témavezetőmmel definiáltuk a doktori kutatómunka várható irányvonalát, szisztematikus mérőföldköveit, s később ezek mentén igyekeztem felépíteni és elvégezni a kutatásomat. A diplomamunkám készítése során ismerkedtem meg a turbulencia generálásához szükséges rácsok szakirodalmával, amely a doktori kutatásom megkezdéséhez hasznos információkkal szolgált. A kutatásom fő irányvonala így olyan újszerű, turbulenciát generáló rácsok fejlesztése lett, amelyekkel számos, laboratóriumi szélcsatornában elvégezhető áramlástechnikai mérésekhez szükséges, adott turbulens jellemzőkkel bíró alapáramlás hozható létre. Fontos szempont volt még a kialakítandó rács felépítésének a jelenlegi megoldásokhoz viszonyított egyszerűsége és olcsósága. A jelenleg elterjedten alkalmazott ún. aktív rácsok ugyanis igen bonyolult felépítésűek, s vezérlésükhöz összetett apparátus szükséges.

A turbulens áramlás (e helyen csak igen tömören jellemezve) olyan áramlást jelöl, ahol az áramló közeg fizikai jellemzői – vizsgálataimnál elsődlegesen a pillanatnyi sebességkomponensek – térben és időben is igen gyorsan, kaotikusan változnak. A való világban végbementő áramlásos folyamatok döntő hányada turbulens jellegű, tehát áramlástechnikai szempontból igen fontos a turbulenciával foglalkozni. Ezzel szemben a szélcsatornában, azok mérési terében létrehozott áramlások jellemzően igen alacsony turbulenciájúak, tehát az áramlási tér adott pontjában a sebességkomponensek idősora igen kis szórást mutat. Viszont számos olyan áramlástechnikai vizsgálat, mérés létezik, amelyeknél fontos a megfelelően magas turbulenciájú alapáramlás biztosítása, hiszen ennek megléte esetén biztosítható a vizsgálandó test valós, a természetben is előforduló körülményekhez hasonló viselkedése. Példaként megemlíthető a repülőgépszárny, egy szélturbina lapátja, vagy még inkább egy ventilátor, amelyek működésük közben jellemzően igen nagy turbulenciájú áramlásnak vannak kitéve (a ventilátor esetén a periodikus járókerék-állórész kölcsönhatás miatt akár 20%-os turbulencia intenzitás is kialakulhat), így egyértelmű, hogy a laboratóriumi vizsgálatok is – a hasonlósági törvények alapján – megfelelő turbulens paraméterekkel rendelkező áramlást követelnek meg. Ahhoz, hogy szélcsatornában ilyen körülményeket teremthessünk, elsődlegesen turbulenciát generáló rácsot, vagy más néven turbulenciagenerátort alkalmazhatunk. Ezeknek két típusát különböztethetjük meg aszerint, hogy tartalmazznak-e mozgó elemeket, vagy sem: amennyiben a rács nem rendelkezik mozgó elemekkel, s nem is növeli meg az áramló közeg átlagos lendületét, úgy azt passzívnak nevezzük, ellenkező esetben aktív rácsról beszélünk. Az aktív rácsokkal jellemzően magasabb fokú, s szélesebb spektrumú turbulencia hozható létre a passzív társaikhoz képest, azonban ezek jóval összetettebb, s ilyen módon jelentősen drágább szerkezetek. A dolgozatom későbbi részeiben részletesen bemutatom a különböző típusú rácsokat.

A doktori kutatómunkám keretein belül két, különböző működési elvet alkalmazó aktív rácsot fejlesztettem és vizsgáltam. A munkám fő irányvonalát a már említett, a diplomamunkámhoz köthető kisminta-prototípus alapján összeállított nagyméretű,

szélcsatornába beépített turbulenciagenerátor, s az általa megváltoztatott áramlás vizsgálata jelentette. E rács esetében ahhoz, hogy az alapáramlás turbulenciáját minél nagyobb mértékben növelni tudjuk, annak rácspontjaiban elhelyezett, mozgó rugalmas csövecskéken keresztül az alapáramláshoz másodlagosan bejuttatott préslevegőt alkalmaztunk. Ezzel a megoldással nem csupán mozgó határréteget tudunk létrehozni, hanem a csövecskékből időben folyamatosan változó irányban nagysebességű légsugarakat is juttatunk az alapáramlásba. Ezek együttes hatásaként a rendszertől nagymértékű turbulencia-növekedés várható.

Ezen irányvonal mellett saját elgondolásom alapján egy olyan aktív rács fejlesztésével is foglalkoztam, amely felépítéséből adódóan működéséhez nem igényel külső energiaforrást. Ez a megoldás egy rugalmas fémszalagokból álló rács, amely a szélcsatornában beállított alapáramlás nyomási energiájának (azaz a meghajtó-ventilátor által a levegőnek átadott energiának) egy részét felhasználva rezgésbe jön, így hozva létre mozgó határréteget, s intenzívebb turbulenciát. E típusú rács későbbi felhasználását tekintve az ipar területén is hasznosítható lehet, hiszen például többfázisú áramlás esetén (portartalmú gáz) a létrejövő turbulens keveredés megakadályozhatja a szállított por kiülepedését, porcsóva kialakulását, amely adott esetben kopáshoz, korrózióhoz vezethet.

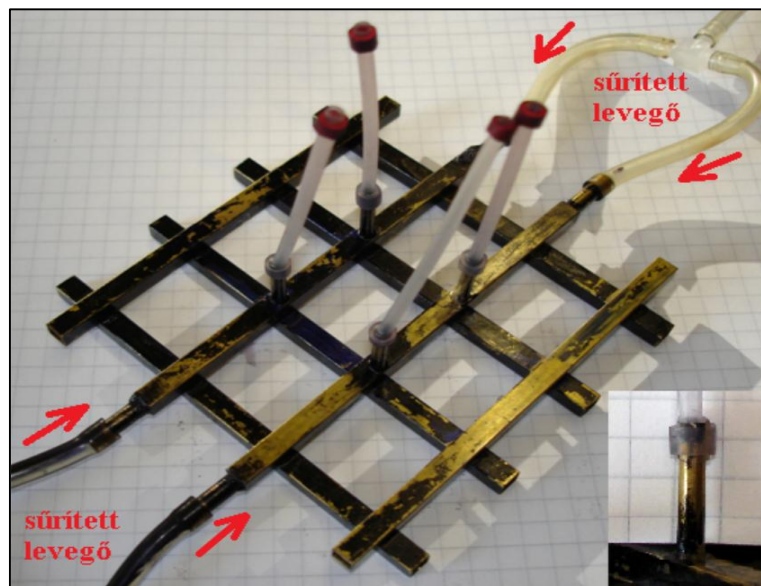
A rácsok vizsgálatát mind a Miskolci Egyetem, mind pedig a Magdeburgi Egyetem áramlástechnikai laboratóriumában, különböző mérés technikák felhasználásával végeztem el. Mindkét rács aktív elemeinek mozgását nagysebességű kamera segítségével is vizsgáltam, jellemeztem. Mindkét típus esetén, – szakirodalmi ajánlásokat figyelembe véve – a vizsgált turbulens áramlásokhoz talán a legalkalmasabb mérés technikát, a hődrótos sebességmérést (HWA: Hot Wire Anemometry) alkalmaztam. E mérés technika segítségével jellemezhettem a kialakult áramlás turbulencia-paramétereit, továbbá a kapott eredményeket összehasonlíthattam a szakirodalmi adatokkal.

2. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI ÉS FŐ CÉLKITŰZÉSEI

E fejezetben belül röviden összefoglalom a doktori kutatásom alapjául szolgáló, azt megelőző témareleváns kutatómunkámat, s annak eredményeit. E munkámból készítettem 2012-ben megvédett diplomaterveimet is.

2.1. A doktori témám alapjául szolgáló németországi kutatómunka

Doktori kutatómunkám alapjául a Magdeburgban készített mesterfokozatú diplomamunkám (Szaszák, 2012) és az annak eredményeit összefoglaló konferenciacikkem (Szaszák et al., 2012a) szolgált, amelyek témája egy új típusú, turbulenciát generáló rács fejlesztése és laboratóriumi vizsgálata volt 2011. nyarán. A Magdeburgi Egyetemen akkoriban folyó kutatásokhoz a légköri turbulenciához hasonló jellegű szélcsatorna-áramlás létrehozása volt a cél. Ennek jellemzője a kis áramlási átlagsebességhez tartozó relatíve magas fokú turbulencia-intenzitás (Bordás et al., 2013). Ilyen áramlás létrehozásához elsőként egy passzív rácsot kombináltak a szélcsatorna-ventilátor a gyors fordulatszám-változtatásával. Azonban ez a megoldás a későbbi kísérletekhez elfogadhatatlanul nagy időskálákat hozott létre az áramlásban (Bordás et al., 2011). Ezért döntöttek egy aktív típusú rács fejlesztése mellett. A rács fejlesztését tehát több ok is indokolta. Ezek közül a legfontosabbak: annak felépítéséből és működési elvéből adódó relatíve alacsony költsége, továbbá az előzetesen feltételezett, vele létrehozható magas fokú turbulencia lehetősége, amelyet a majdani mérésekhez megfelelően rövid időskálák jellemeznek. A vizsgálataimhoz egy kisméretű, csupán 4×4 darab, négyzet keresztmetszetű üreges fémrúdból álló kétsíkú rácsot alkalmaztam, amely az 1. ábrán látható. Az így létrejött 16 metszéspont közül a belső négyen a rács síkjára merőleges irányban furatok készültek, majd ezekhez a furatokhoz apró fémcső-csonkok lettek rögzítve. Ezekhez a csonkokhoz csatlakoztattuk a rács aktív elemeiként működő rugalmas szilikon csövecskéket.

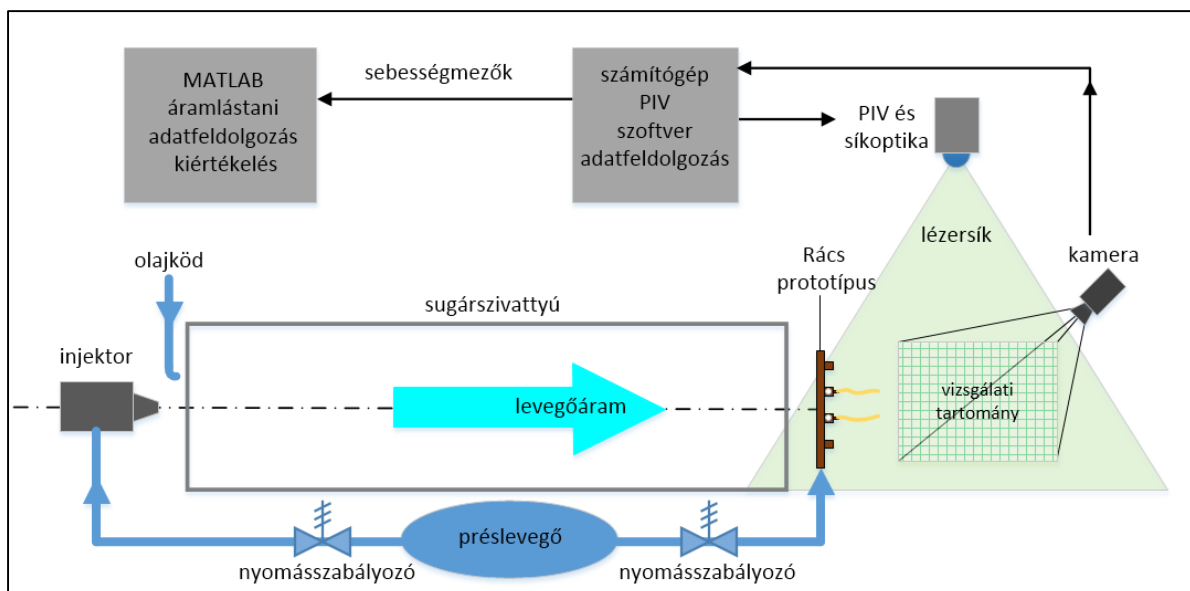


1. ábra A levegőmegtáplálással ellátott prototípus-rács a rajta elhelyezett rugalmas csövecskékel (a szabad végükön extra súlyokkal).

Miként az az 1. ábrán is látható, két belső, vízszintes rácselemen kör keresztmetszetű todatok kerültek elhelyezésre, amelyekhez a levegőmegtáplálást lehetett csatlakoztatni. A rács aktív állapotában tehát préslevegőt juttattam a rugalmas csövecskékbe, amelyekre a kiáramló levegő erővel hatott, így azok ennek megfelelően mozgásba jöttek. A mozgó csövekből kiáramló levegősugár iránya folyamatosan változó volt, így a csőre ható erő is folyamatosan változott. Ennek eredményeként egy nagy sebességű, szabad szemmel nem követhető „csapkodó” mozgás jött létre. Az egymáshoz közel elhelyezett csövecskék mozgásuk közben gyakran ütköztek egymással, így feltételezésem szerint az egyes csövek mozgása sztochasztikus jellegű. Ennek vizsgálatára a doktori kutatásaim keretében szintén kitértem. A diplomamunkám során elsőként azt határoztam meg, hogy milyen aktív-elem variációval lehet a leghatékonyabban növelni az alapáramlás turbulenciáját. Ehhez különböző hosszúságú, falvastagságú és anyagtulajdonságú csöveket, s esetenként ezek kombinációit vizsgáltam. Továbbá a megvizsgált, összesen 9 különböző eset közül a legígéretesebb csővariáció kiválasztása után arra kerestem a választ, hogy az adott prototípus aktív üzemben miként módosítja az alapáramlás turbulenciáját. Ehhez egy sugárszivattyú elven üzemelő légsatornát állítottam össze, majd a csatorna kifűvő keresztmetszetének közelében rögzítettem a prototípust. A rács utáni áramlás vizsgálatához részecskekép-alapú mérés technikát, azaz PIV technikát alkalmaztam.

2.1.1. A mérési összeállítás

A rács vizsgálatához összeállított rendszert a 2. ábra szemlélteti. Mind az alapáramlást, mind pedig a rács aktiválását préslevegővel megtáplált nyomáscsökkentő szelepekkel oldottam meg. Az áramlási jellemzőket a ráctól való távolság függvényében kívántam meghatározni, így a mérési teret is ennek megfelelően állítottam be.



2. ábra A kezdeti vizsgálatokhoz használt rendszer felépítése.

A sugárszivattyúval előállított alapáramlás a kör keresztmetszetű áramlási csatornát követően keresztülhaladt a rácson. Az áramlás irányából nézve a rácst követően, az áramlással párhuzamos síkot vizsgáltam. Ehhez egy speciális PIV kamerát alkalmaztam, amelyet a vizsgált

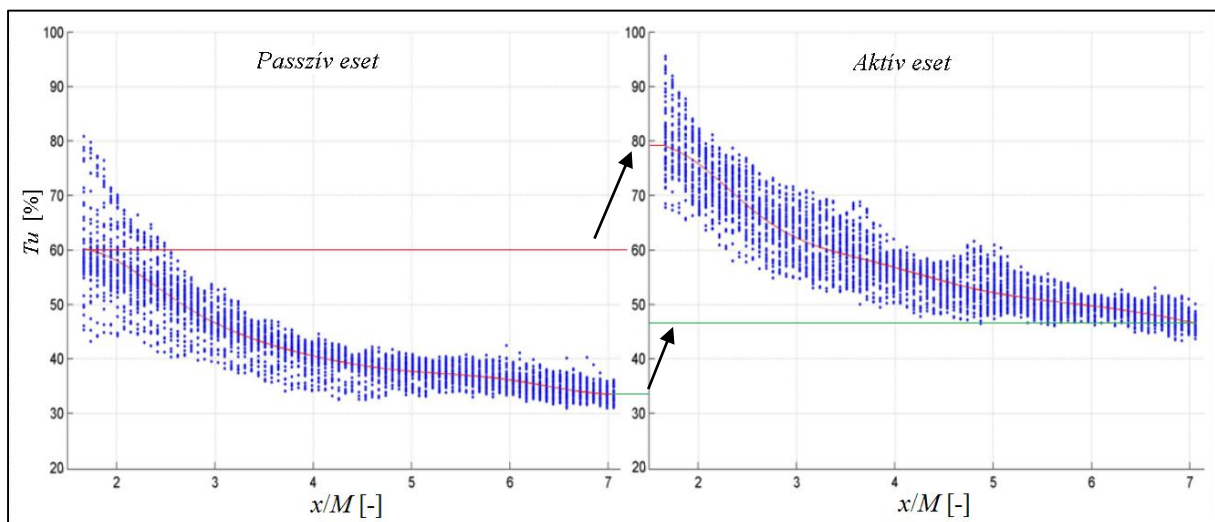
síkra közel merőlegesen helyeztem el. Az alkalmazott PIV sebességmérési technika az áramlásba juttatott apró részecskék (esetemben olajköd) pillanatnyi helyzetét rögzítő, igen rövid időn belül elkészített képpár alapján, azok keresztkorrelációval meghatározott elmozdulás-vektorain alapul. E vektorokból a kapcsolódó szoftver alkalmazásával megkaphatjuk a pillanatnyi sebesség-vektor teret. Ahhoz, hogy csak a vizsgált síkban érzékelhesse a kamera a részecskéket, a kamerával szinkronizált, impulzusüzemű *Nd-YAG* lézerrel előállított síkban történik a megvilágítás.

Adott mérési sorozat alatt számos képpár került rögzítésre, amelyeket aztán a PIV szoftverével dolgoztam fel. Ismerve az egy-egy kép felvétele között eltelt időt (50 μ s), az elmozdulás-mezőből számíthatóvá vált a sebességmező is. Mivel a turbulens áramlásra jellemző az időben igen gyors változás, ezért egy-egy mérési sorozathoz nagyszámú sebességmezőt határoztam meg. Ezeket aztán a MATLAB nevű programban az erre a célra általam készített programsorral dolgoztam fel majd értékeltem ki, így megkapva számos áramlástechnikai jellemzőt.

2.1.2. Az elsődleges vizsgálatok jelentősebb eredményei

Az adatmezők kiértékelését a rács után, a rácsállandóval ($M=25$ mm) dimenzió-mentesített vízszintes távolság (x/M) függvényében, az $x/M=\{1,6\div 7,2\}$ intervallumban tettem meg, függőleges irányban közel $4 M$ szélességben átlagolva a megfelelő értékeket. A vizsgálatok elsődleges célja tehát az volt, hogy megbizonyosodjak a rács aktiválásának a turbulenciára gyakorolt hatásáról. Ezen okból számos, a turbulenciát jellemző mennyiséget határoztam meg, de ezek közül e munkámban csupán az alapáramlás-irányú turbulenciafok (T_u) és a (fajlagos) turbulens kinetikus energia (k) alakulását mutatom be mind passzív (a csövekben nincs áramlás), mind pedig aktív (a csövekben is van légbevezetés) esetben.

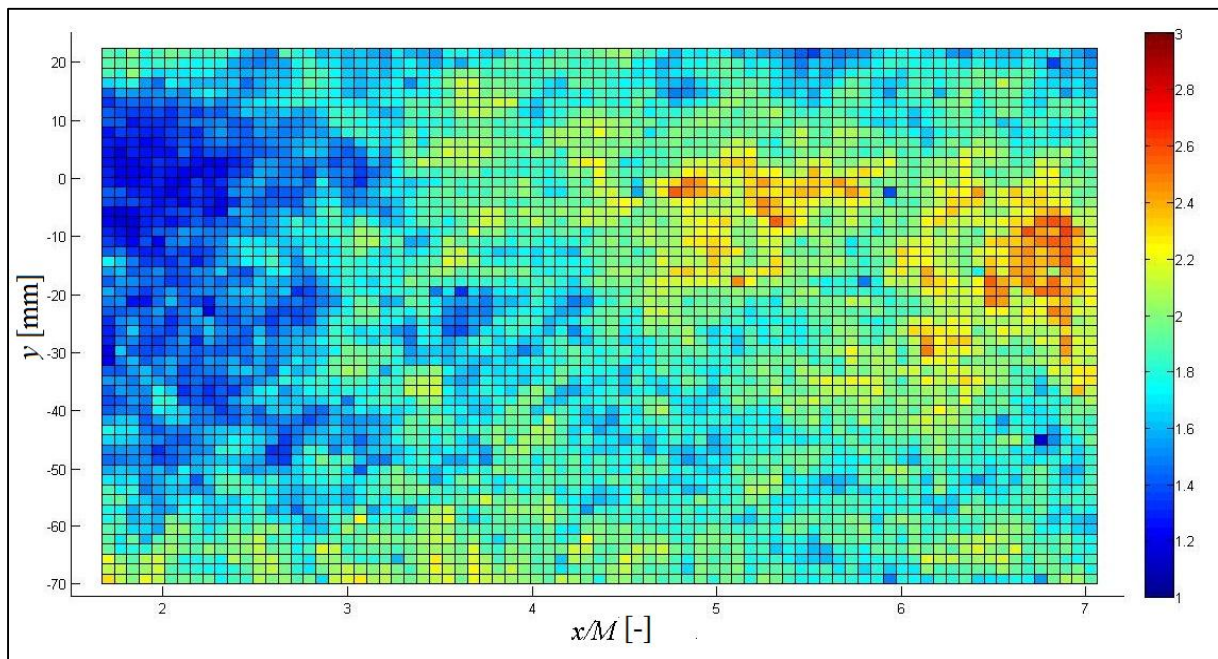
Az alapáramlás irányú turbulenciafok (T_u) nem más, mint az adott pontban mért hosszirányú sebességérték-ingadozás r.m.s. értékének (u') és az ott mért átlagsebességnek (U) az aránya. Ez az arányszám jellemző a turbulencia erősségére, s ennek százalékos kifejezése látható a 3. ábrán, a rács passzív (bal oldal) és aktív állapotában (jobb oldal).



3. ábra A turbulenciafok alakulása a rács után passzív és aktív esetben. A piros görbék a rácsból adott távolságban, függőleges irányban kiértékelte adatokat kötik össze. (Szászák 2012).

Az ábrán megfigyelhető, hogy a rács aktív állapota esetén a vizsgált térrészben jelentősen, a távolságtól függően nőtt a turbulenciafok, tehát az eszköz alkalmas a turbulencia fokozására. Látható az is, hogy mindkét esetben monoton csökkenő a turbulenciafok, aminek magyarázata az, hogy a ráctól bizonyos távolságon túl már nem beszélhetünk örvény-produkcióról, az áramlásban lévő turbulens örvények egyre kisebbekre esnek szét, majd a disszipáció miatt folyamatosan elhalnak. Ennek okán a rács turbulenciát elhaló turbulenciának is nevezik.

A fajlagos turbulens kinetikus energia (k) egy olyan energia típusú mennyiség, amely a sebességkomponensek szórásnégyzeteiből számítható, ilyen módon a turbulencia erősségére, energiatartalmára jellemző (pontos definícióját lásd a későbbiekben). A 4. ábra az aktív és a passzív esetben kiszámolt turbulens kinetikus energia-értékek arányát mutatja a vizsgált síkrészben, jó közelítéssel megegyező áramlási átlagsebességek esetén.



4. ábra A turbulens kinetikus energia-értékek aránya (k_a/k_p) a vizsgálat síkrészben (Szászák, 2012).

A 4. ábra alapján belátható, hogy a teljes vizsgálati intervallumban növekedett a turbulens kinetikus energia a rács aktiválásakor, tehát az arányszám mindenhol egyes érték feletti. Továbbá fontos észrevenni azt is, hogy a ráctól távolodva ez az arányszám egyre növekszik, azaz távolabb nagyobb mértékű növekedés érhető el a rács aktiválásával. E megállapítást a doktori kutatómunkámban is vizsgáltam, s további mérési eredményeim is igazolták ezt.

2.1.3. Az eredményekből levont következtetések

Az előzőleg bemutatott, a diplomamunkámból kiemelt eredmények alapján tehát megállapítható az, hogy a kifejlesztett prototípus-rács aktív állapotában alkalmas a turbulencia további fokozására, tehát ilyen módon az érdemes további fejlesztésre, vizsgálatokra. Továbbá azt találtam, hogy a rács aktiválása számos egyéb, olyan mennyiséget is előnyösen változtatott meg (pl. Kolmogorov-hosszskála, energiaspektrum, izotrópia-arány, disszipációs-ráta, stb.), amelyek alapján érdemesnek tartottam – doktori munka keretében - tovább foglalkozni a rács áramlástechnikai vizsgálatával.

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A következőkben a kutatómunkámmal kapcsolatos szakirodalmat mutatom be. A turbulencián, mint jelenségen belül az úgynevezett rácsturbulenciát részletekbe menően ismertetem, s bemutatok a turbulencia jellemzésére használt számos olyan mennyiséget, amelyeket a laboratóriumi vizsgálataim segítségével határozhattam meg. Ilyen módon számos irányból tudtam összehasonlítani a vizsgált rács által létrehozott turbulens áramlás jellemzőit más, a témában megjelent szakirodalmi eredményekkel.

3.1. A turbulencia, mint jelenség

A turbulenciát, mint jelenséget már sokan próbálták egzaktul megfogalmazni, de ez idáig - ismereteim szerint - még nem elfogadott a témában jártas kutatók által egyöntetűen elfogadott definíciója. Tsinober (2001) munkájában összefoglalta a különböző kutatók által használt a turbulenciára vonatkozó definíciókat. A legtöbb megfogalmazás eléggé pontatlan, mint például a Schlichting & Kestin (1960) által megfogalmazás, miszerint (saját fordításban) a turbulens áramlások: „olyan mozgások, amelyekben szabálytalan ingadozás (keverés vagy örvénylő mozgás) figyelhető meg a fő áramlási irányra nézve”. Bayly et al. (1988) szerint olyan áramlás, ahol „a folyadékmozgás komplex és szabálytalan karakterisztikájú”. Az egyik legtömörebb megfogalmazás (Saffman, 1981) szerint a turbulencia nem más, mint „véletlenszerű kaotikus örvények” sokasága. Sajnos ez a megfogalmazás is ellentmondásos, mivel a szavak, hogy „véletlenszerű” és „kaotikus” azt sejtetik, hogy egy matematikai megoldás, amely feltétlenül determinisztikus, nem létezik. Talán a legpontosabb, s egyben tömör megfogalmazás a turbulenciára nézve az az, amit Bradshaw (2013) fogalmazott meg: „A Navier-Stokes egyenlet általános megoldása”. Egy napjainkban használt, elfogadott leírás Tuoc (2009) -től származik, amely saját fordításban a következőképp hangzik: „egy olyan, fő keresztáramlással bíró rendszer, amelyben a keresztáramlás másodlagos váltakozó áramlást tartalmaz, s ez valamilyen szöveget zár be a főáramlás irányával, továbbá kölcsönhatásban is áll vele”. Ezen megfogalmazások alapján belátható továbbá, hogy turbulens áramlás esetén az áramló közeg keveredése (ezzel együtt az anyag- és energiátranzportja) lényegesen nagyobb mértékű, mint ahogy az várható lenne pusztán a molekuláris diffúzió alapján; tehát a turbulencia diffúzív tulajdonságú. Ennek első kísérleti bemutatása Reynolds, Osborne (1883) nevéhez fűződik, aki igen szemléletesen mutatta be a turbulencia keveredésre gyakorolt hatását. Éppen ezért magával a turbulenciával igen széles körben foglalkoznak annak gyakorlati alkalmazhatósága miatt is: pl. turbulens hőátadási tényező, turbulens áramlási ellenállás vizsgálata, stb. Ahogy azt az előbbiekben láthattuk is, a turbulencia jelensége igen széleskörű érdeklődésnek örvend, azonban a különböző nézetek s magyarázatok miatt igen óvatosan kell kezelni annak leírását, megfogalmazását.

Lesieur (2008) szerint maga a turbulencia egy igen veszélyes téma, amely számos komoly vitát vált ki tudományos üléseken. Napjainkban igencsak leegyszerűsítve három, alapjaiban eltérő látásmódot különböztethetünk meg a turbulencia jelenségének vizsgálata szempontjából. Az első a statisztikai leírásmód, amely az átlagolt áramlástan jellemzők alakulásának modellezésén keresztül próbálja meg leírni a jelenséget. Ennek úttörői voltak Kolmogorov (1890) és Taylor (1938a, 1938b) is, akik erősen vitatták annak lehetőségét, hogy bármiféle koherencia vagy rend lenne jelen a turbulenciában. Ezzel szemben helyezkedik el a „koherencia a káosz között” felfogásmód (Saffman, 1981) amely tisztán determinisztikus szemszögből írja

le a turbulenciát a dinamikai rendszer vagy az áramlás stabilitásának vizsgálatával. Ebbe a csoportba tartoznak többek között a kísérleti kutatók és a számítógép szimulációkat készítő szakemberek. A harmadik irányzatot a fizikusok képviselik többek között a renormalizációs csoport-módszerrel (Yakhot & Orszag, 1986), a multifraktalitással, és a Lagrange-i megközelítéssel.

Turbulens áramlásról akkor beszélhetünk, amikor az áramló folyadékra ható tehetetlenségi erők a dominánsak a folyadék sűrűlódásából adódó erőkhöz képest (Lohász & Réger, 2010.). Ilyen esetben a Reynolds szám (Re) is nagyobb értékű, hiszen az éppen a tehetetlenségi és a sűrűlódási erők arányát adja meg. Ebből tehát látható, hogy a turbulens áramlás feltétele a megfelelően nagy értékű Reynolds szám. Mivel turbulens áramlás csakis sűrűlódásos folyadék ($\nu > 0$) esetén jöhet létre, ezért az disszipatív, tehát az áramlásban jelen lévő deformációsebesség hatására a sűrűlódó folyadék mozgási energiája folyamatosan hővé alakul, így zárt rendszer esetén, külső energiabevitel hiányában a rendszer idővel nyugalomba kerül. Hasonló a helyzet akkor is, amikor a turbulenciát kiváltó ok térben rögzített (pl. örvényleválást okozó test, esetemben maga a rács), azonban az áramlás magával sodorja a testről levált örvényeket. Ekkor az örvények az idővel (vagyis a megtett úttal) együtt folyamatosan náluknál kisebb örvényekre esnek szét, amíg végül a jellemző méretük a Kolmogorov-hosszskála (η) értékének környezetéig csökken, s a kicsiny örvények disszipálódnak, elhalnak.

3.2. A rács-turbulencia

Kutatásaim során mivel kifejezetten a turbulenciát generáló rács után kialakult turbulencia vizsgálatával foglalkoztam, így fontos megismerni a rács-turbulenciára vonatkozó összefüggéseket, jellemzőket.

A legtöbb áramlástechnikai berendezésben az áramlás minőségének javítása érdekében alkalmaznak az áramlás útjába beépített rácsot/rácsokat (Laws & Livesey, 1978; Pennycuik, et al., 1997), azonban ezeket kifejezetten turbulencia generálására is alkalmazhatjuk abban az esetben, amikor a rács jellemző méretét (pl. átmérőjét) figyelembe vevő Reynolds szám megfelelően nagy értékű (Kurian & Fransson, 2009.). Az ilyen esetekben beszélhetünk tehát a klasszikus rács-turbulenciáról, amely – jellemzői alapján – a turbulencia elméletek és modellek tesztelésére kifejezetten alkalmas.

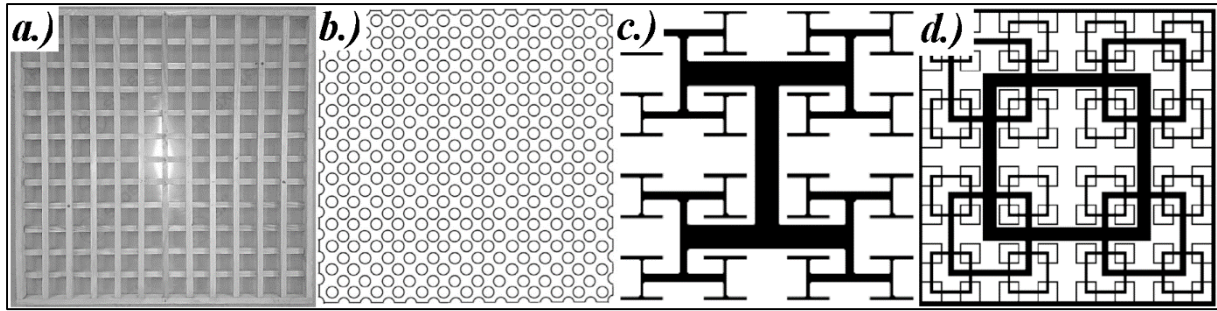
Általánosságban, abban az esetben mondhatjuk, hogy egy – akár – turbulens áramlás homogén, amennyiben az átlagolt (áramlástechnikai) mennyiségek irány szerinti gradiensei zérusok, azaz térben állandó értékűek. Az átlagsebesség gradienseinek hiányában (ilyenkor nincsen turbulens örvény-termelés) a homogén turbulencia elhal a belső sűrűlódásos folyamatok miatt. Mivel a rácsra átáramló levegő esetén a rács maga sebesség-gradienst hoz létre közvetlenül önmaga után (Davidson, 2014), így annak közelében semmiképp sem beszélhetünk homogén turbulenciáról. Azonban a rács után a sebesség-gradiensek folyamatosan kiegyenlítődnek, így megfelelően nagy távolságtól (a vonatkozó szakirodalom szerint ez legalább $10M$ távolság (Roach, 1987; Djenidi & Tardu, 2012; Djenidi, Tardi & Antonia, 2013) vizsgálva a létrehozott rács-turbulencia jó közelítéssel homogén, elhaló turbulenciaként kezelhető (Pope, 2000). Ennek oka az, hogy a szélcsatornában létrehozott áramlás statisztikailag stacionárius, továbbá a csatorna belső térrészében (távol annak falaitól) ez a statisztika egyedül a középvonal (x tengely) függvényében változik. Abban az esetben, ha az áramlás átlagsebességével (U) együttmozgó koordináta-rendszerből vizsgálódunk, a turbulencia bizonyos megköötésekkel tehát homogénnek tekinthető, amely az idővel együtt

($t=x/U$) fejlődik ki (majd hal el a disszipáció következményeként). Fontos kritérium még a turbulencia homogenitása szempontjából az is, hogy a szélcsatorna szélességének és a rácsállandónak az aránya legalább 10 legyen (Roach, 1987). Emellett az alkalmazott rács σ kitöltési tényezője (a rács által kitakart és a teljes, rácsot magában foglaló keresztmetszet aránya) jóval a $\sigma=0,5$ -es érték alatt kell, hogy adódjon (Villermaux et al., 1991). Az előzőekben felsorolt kritériumok mindegyikének eleget tettem az általam végzett vizsgálatok alatt mindkét típusú rács vizsgálata esetén.

Amennyiben rács turbulenciát kívánunk előállítani, abban az esetben tehát mindenképpen szükséges alapáramlást létrehozunk (pl. szélcsatornában), s az alapáramlásra merőleges síkban olyan testet/szerkezetet kell elhelyeznünk, amely megfelel az előzőekben említett kritériumoknak. Alapvetően a rács turbulencia létrehozásához a már előzőekben is említett kétfajta rácsot alkalmazhatunk: passzív vagy aktív rácsokat. Az adott típuson belüli altípusokat a következőkben mutatom be.

3.3. Passzív rácsok

A passzív rácsok minden esetben olyan szerkezeti megoldások a rács turbulencia létrehozásához, amelyek nem tartalmaznak mozgó elemet, továbbá nem is adnak az alapáramlásnak extra impulzust (pl. másodlagos légsugarak bejuttatásával). Annak ellenére, hogy a passzív rácsok nem tartalmaznak mozgó elemeket, a rácselemekről történő határréteg-leválási görbék helyzete időben változik, így ilyen megközelítésből akár aktív rácsoknak is nevezhetnénk ezeket (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974). Az egyértelműség kedvéért – továbbá a szakirodalom túlnyomó többsége alapján – az ilyen rácsokat mégis passzív rácsokként fogom kezelni. Valószínűsíthetően elsőként Simmons & Salter, 1934-es publikációja volt az első passzív rács által keltett turbulenciával foglalkozó szakirodalom. Ezekkel a rácsokkal jellemzően csupán kismértékben növelhető az áramlás turbulencia-intenzitása, továbbá a kialakuló turbulencia jellemző hosszskálái is csak bizonyos tartományon belül alakulhatnak (Comte-Bellot, 1971). Ettől függetlenül a passzív rácsok keltette rács turbulencia vizsgálata nélkülözhetetlen volt a különböző turbulencia-elméletek fejlődéséhez, a turbulencia modellezéséhez, továbbá validációk esetén a megfelelő peremfeltételek meghatározásához (Sakai et al., 2001). Ilyen rácsoknál a rácsállandó (M) és a rácsvastagság/rácsátmérő (D) módosításával (megtartva a homogenitáshoz szükséges arányokat (Roach, 1987), továbbá közel állandó kitöltési tényezőjű rácsot készítve) különböző jellemző hosszskálájú turbulencia hozható létre közel állandó értékű turbulencia-intenzitás mellett (Kurian & Fransson, 2009). A hagyományos típusok egy vagy két síkban egymáshoz illesztett vízszintes és függőleges irányú, hengeres (Uberoi, 1963) vagy szögletes alapú rudakból készült rácsokból tevődtek össze (5a ábra), esetleg perforált lemezből álltak (5b. ábra). Mindeközben az utóbbi évtizedekben a kutatások jellemzően a fraktálrácsokra helyeződtek át (5c ábra; 5d ábra), amelyek mindegyike ún. önazonos alakzatokat tartalmazó mintájú rács. Az ilyen rácsok által létrehozott turbulencia jellemzői sok esetben eltérést mutatnak a hagyományos rácsok esetében kapottaktól, így érthető a téma iránti kiemelt érdeklődés (Discetti et al., 2013; Hurst & Vassilicos, 2007; Zhou et al., 2014). Például az 5d ábrán látható fraktálráccsal adott esetben magasabb értékű Taylor-Reynolds szám (Re) kapható, azaz jobban kifejtett turbulencia kelthető, mint egy nagyobb σ kitöltési tényezőjű, s így nagyobb nyomásesésű klasszikus ráccsal.



5. ábra Hagyományos és önhasonló mintázatú passzív rácsok. a.) kétsíkú, négyzetes rudakból álló rács (Podráczki, 2015); b.) kör alakú perforációval ellátott lemezlap (Ahmadi-B. et al., 2015; Liu et al., 2007); c.) I-mintázatú önhasonló rács (Discetti et al., 2013); d.) négyzetes fraktálrács (Laiyet & Vassilicos, 2013).

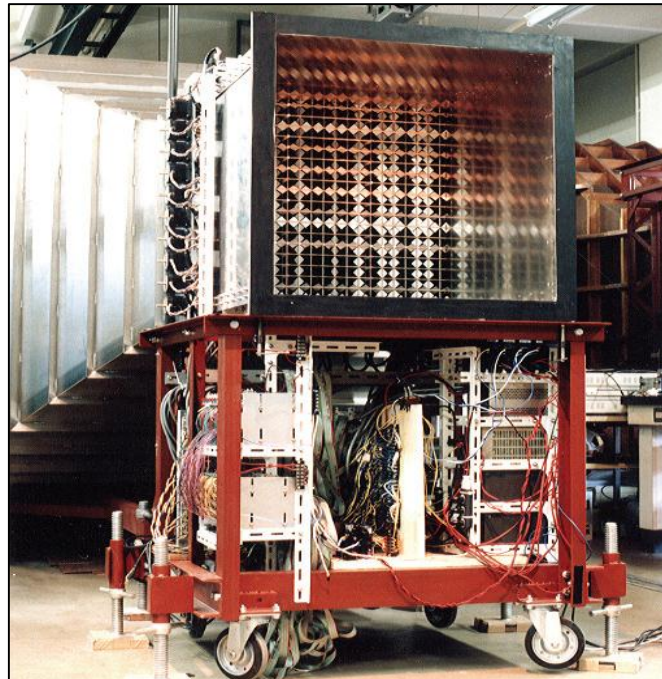
Mivel elméletileg minden passzív rács esetén közös tulajdonság az, hogy egy adott beépítés esetén a létrehozott turbulenciát csupán az alapáramlás sebessége és a rács tulajdonságai határozzák meg, így nyilvánvaló, hogy egy adott ráccsal csupán csak limitált határok között változtathatók a turbulencia jellemzői. E megkötést oldják fel az aktív rácsok alkalmazásával, amelyek esetén valamilyen – a rács működési elvére jellemző – módszerrel megváltoztatható a létrehozott turbulencia több fontosabb paramétere is.

3.4. Aktív rácsok

Az aktív rácsok tehát lényegében attól különböznek a passzív társaiktól, hogy esetükben időben aktívan változtatható a rács lokális kitöltési-tényezőjének (σ) eloszlása, vagy más esetekben az alapáramlásba juttatott nagysebességű légsugarakkal, esetleg mozgó elemekkel megváltoztatható az áramló közeg lokális, pillanatnyi impulzusa. Mindezek hatására jelentős mértékű (nagy intenzitású) turbulencia hozható létre igen széles intervallumban mozgó hosszskálával.

A legelső, mozgatható rácselemeken alapuló aktív rács szakirodalomban történő leírása valószínűsíthetően Ling & Wan (1972) nevéhez fűződik, ahol is függőleges tengelyekre szerelt téglalap alakú elemeket mozgattak úgy, hogy az egymás melletti tengelyek éppen ellenkező irányban tértek ki, maximálisan $\pm 19^\circ$ -kal. Két évvel később, ehhez hasonló felépítésű, vibráló rácsot készített s vizsgált Sato & Saito (1974) is. Ozono munkatársaival egy 9×11 darab axiális ventilátorból álló rácsot épített majd vizsgált, amelyeket egyedileg tudtak vezérelni szervomotorokkal, s az általuk létrehozott légáramot különálló csöveken keresztül vezették a szélcsatornába (Ozono et al., 2006, Ozono et al., 2007). Thompson & Turner (1975) oszcilláló rácsot alkalmazott a turbulens keveredés, továbbá az oszcillálás paramétereinek a turbulenciára gyakorolt hatásának vizsgálatához. Silva & Fernando (1994) függőleges irányban oszcilláló, horizontális síkban, víz alatt elhelyezett egysíkú rácsot alkalmazott a turbulencia előállításához. Ezzel a megoldással egy átlagsebesség nélküli, azonban közel izotrópnak tekinthető turbulenciát sikerült létrehozniuk. Doktori kutatómunkám alatt többek között e tanulmányok alapján jött az az ötletem – a légsugaras típusú mellett – a szintén általam fejlesztett rezgőszalagos turbulenciagenerátor megtervezéséhez, megépítéséhez, majd vizsgálatához (Szaszák, 2013; Szaszák & Szabó, 2013b; Szaszák & Szabó, 2014a,b; Szaszák & Szabó, 2015a,b; Szaszák et al., 2016, Szaszák et al., 2017a,b,c,d). Erről a rácsról, s a segítségével előállítható turbulenciáról a későbbiekben részletesen be fogok számolni.

Az előzőekben felsorolt típusoktól eltérően a napjainkban legelterjedtebb megoldás Makita & Miyamoto (1983) publikációjához kapcsolható, habár a szakma szélesebb rétegeihez csupán közel nyolc évvel később jutott el az a forradalmian újszerű koncepció (Makita, 1991; Makita & Sassa, 1991). A megoldás újszerűsége tehát abban rejlett, hogy segítségével viszonylag kisméretű (tehát számos áramlástechnikai laboratóriumban rendelkezésre álló) szélcsatornában is jelentős intenzitású turbulencia állítható elő. Így érthető módon az eredeti eszköz alapján sok aktív rácsot készítettek el világszerte: Larssen & Devenport, 2002; Boquilion et al., 2003; Kang et al., 2003; Cekli & Water, 2010a; Fischer et al., 2016. Talán a Makita-féle generátor legnagyobb méretű megvalósítása Larssen & Devenport (2011) nevéhez fűződik, akik a rács számos vizsgált működési módja esetén egy átfogó, alapos leírást adtak az előállított turbulencia jellemzőiről. Ezek mellett olyan aktív turbulenciagenerátorok is megjelentek, amelyek egyesítették a passzív fraktál-rácsok és a Makita-féle aktív rács előnyeit (Thormann & Meneveau, 2014). A Makita-féle elképzelés lényegében olyan vízszintesen és függőlegesen elhelyezett, időben változtatható fordulatszámú forgást végző tengelyekből álló rácsot jelentett, amely rácsokon a tengellyel párhuzamos átlójú, négyzet alakú szárnyelemek lettek elhelyezve. Ennek kialakítása a 6. ábrán látható.



6. ábra Makita-típusú aktív turbulenciagenerátor (Makita & Sekishita, 2006).

A rácsot felépítő tengelyek mindegyikét egy egyedileg vezérelhető szervomotor hajtotta meg, amelyek működtetéséhez így egy igen nagy kapacitású számítástechnikai apparátus is szükséges volt (a 6. ábrán a generátor alatti térben). Mindezek okán – habár igen sok szakirodalmi eredmény alapján jelentős turbulencia hozható létre segítségével – a rács rendkívüli összetettsége miatt annak összeállítása s működtetése kifejezetten költséges.

Az aktív turbulenciagenerátorok egy másik, részletekbe menően vizsgált típusa légsugarakat alkalmaz a turbulencia növeléséhez, ezek az úgynevezett légsugár-rácsok. Ezek a megoldások nem tartalmaznak mozgó elemeket, azonban valamilyen módon (pl. a rácspontokból, vagy a csatorna falából) fúvókákon keresztül az alapáramlással párhuzamosan (azzal szemben vagy megegyező irányban), esetleg arra merőlegesen belövellt másodlagos

légsugarak zavarják meg az áramlást. Az egyik legelső publikáció ebben a témában Mathieu & Alcaraz (1965) nevéhez fűződik, ahogy arról Gad-el-Hak & Corrsin (1974) és Vonlanthen & Monkewitz (2011) beszámolnak légsugaras-rács témájú munkáikban. Kísérleteikhez ilyen megoldásokat alkalmazott többek között Guillon, 1968; Charnay, 1969; Thole et al., 1994; Shavit & Chigier, 1995; továbbá Aufderheide et al., 2014. Teunissen (1969) légsugár-rácsát olyan módon építette meg, hogy annak segítségével tetszőleges átlagsebességű alapáramlás turbulenciáját tudta vizsgálni. Luxenberg & Wiskind (1969) a légsugaras rács után kialakuló turbulens áramlás minőségét vizsgálták, mivel az ilyen típusú rácsokkal jellemzően inhomogén áramlási tér jött létre. Éppen ezért számos erőfeszítést tettek az áramlás homogenitásának növelése érdekében többek között Hwang & Eaton, 2004; Fransson et al., 2005; Goepfert et al., 2010; továbbá Vonlanthen & Monkewitz, 2011. Azonban a legmeghatározóbb eszköz talán Gad-el-Hak & Corrsin (1974) nevéhez fűződik, akik egy egyszerű, csövekből álló passzív rácsot – annak rácspontjaiban – láttak el egyenként beállítható erősségű légsugarakat az alapáramlásba juttató fűvókákkal, amely ötlettel egészen magas (a passzív rácsokét megközelítő) homogenitású áramlást tudtak létrehozni. Az ő munkájukat követve Tassa & Kamotani, 1974; Fransson & Alfredsson, 2003; Yoshioka et al., 2004; Fransson et al., 2005 is hasonló módon állítottak elő turbulenciát vizsgálataikhoz. Egy további, ezekhez hasonló elven működő típusú rácsot vizsgált Varianno et al. (2004), amely munkát Mydlarski & Warhaft (1996) és Hwang & Eaton (2004) tanulmányai inspirálták: egy tartályban véletlenszerűen, rövid ideig létrehozott légsugarakat alkalmaztak a turbulencia intenzifikálásához.

Ezek alapján tehát látható, hogy a 2. fejezetben röviden bemutatott, Magdeburgban összeállított, majd a prototípus alapján továbbfejlesztett rács az előzőekben részletezett passzív és aktív rácsoktól annyiban tér el, hogy nem csupán fix irányú (egymással párhuzamos) légsugarakat juttat az alapáramlásba, hanem azok irányát folyamatosan, – a méréseim alapján sztochasztikusan – változtatja. E sugarak tehát folyamatosan kölcsönhatásban vannak egymással és az alapáramlással is, így e megoldás a szakirodalomban fellelt, légsugaras generátorok továbbfejlesztésének is tekinthető.

4. A RÁCSTURBULENCIÁT LEÍRÓ FŐBB FIZIKAI MENNYISÉGEK

Ahhoz, hogy a rácsok által keltett turbulenciát jellemezzük, azt számos aspektusból meg kell vizsgálnunk. Turbulencia esetén az áramlási tér valamely adott, fix pontjában az áramlási sebesség időben folyamatosan változik. Ennek oka az, hogy az áramlás átlagsebességével különböző méretű örvények haladnak keresztül a vizsgált ponton, amelyeknek maguknak is különböző sebességgel mozognak/forognak, továbbá e mozgásuk közben folyamatosan kisebb és kisebb örvényekre esnek szét. Így tehát egy adott pontban vizsgálva az áramlást, egy időben igen gyorsan változó pillanatnyi sebesség függvényt kapunk. Ilyen idősort laboratóriumban legegyszerűbben úgynevezett hődrótos légsebességmérő-technika (HWA) alkalmazásával kaphatunk. Ezen idősből aztán különböző matematikai műveletekkel igen számos, a turbulenciát az áramlási tér adott pontjában jellemző fizikai mennyiséget kaphatunk. Emellett egy másik megközelítés a turbulencia minőségének az áramlási térben való eloszlását hivatott megadni. Ekkor az áramlási tér egy adott térrészében (pl. kitüntetett tengelyén vagy síkjában) történő pillanatnyi sebességek mérése szükséges (akár egy adott időpillanatban a teljes vizsgálati térben, például PIV (Particle Image Velocimetry) technikával; vagy statisztikailag stacionernek (azaz időtől független) tekinthető áramlás esetén időben eltolt mérések segítségével), s a kapott idősből számíthatók a turbulencia térbeli eloszlására jellemző mennyiségek.

4.1. A turbulencia térbeli eloszlását jellemző fontosabb mennyiségek

Miként azt már ismertettem, a rács turbulencia esetén az áramlás átlagsebességének gradiense nulla kell, hogy legyen, mivel csak ebben az esetben tekinthetünk el az örvényproduktiótól (P), amely az elhaló turbulencia feltétele. Ez a feltétel – jó közelítéssel – azonban a csatorna mérőszakaszának csupán a belső, a falaktól és a rácstól is messze eső térrészében teljesül, s annak a térrésznek is a rácstól mérve legalább $10M$ távolságától. Ebben a térbeli tartományban tehát az áramlás időátlagolt, pontbeli sebességének (\bar{u}) közel állandónak kell lennie abban az esetben, ha az áramlást magát statisztikailag stacionernek tekinthetjük. Ilyenkor a kialakult turbulencia jó közelítéssel homogénnek tekinthető, ebben a térrészben az egyes jellemzők elméletileg csupán a mérőszakasz középvonalának mentén változnak, azaz a rácstól való távolság (x) függvényei. Ezek alapján tehát a turbulencia homogenitását jellemezhetjük a pontbeli, időátlagolt sebességértékek alakulásával: amennyiben a vizsgált térrészben ezek relatív szórása közel egységnyi, úgy jó közelítéssel homogén turbulenciáról beszélhetünk. A szakirodalomban ennek külön mérőszáma nincs, jellemzésére a vizsgált térrészben, a ráccsal párhuzamos síkban kalkulált \bar{u}/U_{ref} értékek szórását használják (U_{ref} az alkalmazott referencia-átlagsebesség).

Mivel a rács turbulenciának – bizonyos közelítéssel – fontos tulajdonsága az izotrópia (i), ezért ennek vizsgálata szintén fontos ahhoz, hogy az effajta turbulenciára jellemző mennyiségekhez alkalmazható (egyszerűsített) összefüggések valós eredményeket szolgáltatassanak. Izotróp turbulencia esetén nem ismerhető fel preferált térbeli irány a turbulencia jellemzői esetén, tehát a mennyiségek függetlenek az irányultságtól. Talán a legegyszerűbb összefüggés a turbulencia irányfüggetlenségének eldöntéséhez nem más, mint az adott pontban mért sebességkomponens-idősorokból ($u(t)$, $v(t)$, $w(t)$) nyert r.m.s. értékek (u' , v' , w') egymáshoz viszonyított arányának vizsgálata. A rács jellemzően szimmetrikus volta miatt a rács síkjával párhuzamos v' és w' értékek közel megegyezőek (tehát arányuk közel

egységnyi), így az ilyen síkokban izotrópiáról beszélhetünk (Comte-Bellot & Corrsin, 1966), ekkor a nyíróerők közel zérusok. Ezzel szemben rácsturbulenciánál az u'/v' , továbbá – az előzőek alapján – u'/w' az egységnyitől jellemzően nagyobb értékű (számos kísérlet eredményeit vizsgálva az u'/v' arány átlagos értéke közel 1,12 (minim 1,0, maximum: 1,22), (Roach, 1987)). Ezek az értékek természetesen igen messze állnak az izotrópia által megkívánt egységnyi értéktől, azonban a vonatkozó szakirodalom mégis izotrópként (kvázi-izotrópként) kezeli a rácsturbulenciát.

Az előzőekben bemutatott, térbeli eloszlástól függő mennyiségeken túl számos olyan jellemző is kiszámítható, amely adott pontbeli tulajdonságot tükröz. Ezek közül az első, talán legáltalánosabb mennyiség a turbulenciafok (\equiv turbulencia-intenzitás), amely a turbulencia erősségére jellemző mennyiség. Rácsturbulencia esetén két típusát szokás definiálni: az egyik a hosszirányú turbulenciafok (T_u , amelyet a dolgozat előző fejezetében már röviden ismertettem), továbbá a keresztirányú turbulenciafok (az előzőek alapján $T_v \approx T_w$). Mivel e mennyiség nem más, mint az adott irányban mért pillanatnyi sebességek négyzetes közepének (r.m.s.) és az időátlagának az aránya, ezért ennek dimenzió nélküli értéke arányos a sebesség időbeni ingadozásával, így tehát a turbulenciával. Jellemzően az alapáramlás irányú (laterális) turbulenciafokkal szokás jellemezni a rácsturbulenciát, így vizsgálataim során én is e mennyiséget határoztam meg. Minek alapján a rácsturbulencia elhaló jellegű, így a turbulenciafok is folyamatosan csökken a rácstól távolodva (negatív kitevőjű hatványfüggvény-jellegű (Roach, 1987)). E jellege a méréseim alapján is bizonyítást nyert.

A fajlagos turbulens kinetikus energia (k) egy olyan energia-jellegű skalármennyiség, amely a turbulens áramlás energiataralmára jellemző, s így mindhárom sebességkomponens ingadozásának alapján kalkulálható. Kiszámítása az r.m.s. értékek ismeretében – a részleges izotrópia figyelembevételével ($v' \approx w'$) – a (4.1) összefüggéssel lehetséges (Pope, 2000):

$$k \approx \frac{1}{2} \cdot (u'^2 + 2 \cdot v'^2). \quad (4.1)$$

Az egyszerűsítésre továbbá azért is volt szükség, mivel a méréseimhez alkalmazott CTA (állandóhőmérsékletű légssebességmérő technika) mérés technika csupán két sebességkomponens (a laterális, u és az arra merőleges, vízszintes, v) mérését tette lehetővé.

Elhaló turbulencia esetén a turbulens kinetikus energia nyilvánvalóan csökken a rácstól mért távolság (másképp az áramlási átlagsebességgel együtt mozgó koordináta-rendszerből nézve az idő (t), mint független változó) függvényében. Az időbeni csökkenésének negáltja ($-dk/dt$) pedig nem más, mint a turbulens kinetikus energia disszipációs ráta (ε). Ennek meghatározásához tehát ismernünk kellene k időfüggvényét, azaz az áramlással együtt mozogva kellene figyelni k csökkenését. Mivel a vizsgálataimhoz alkalmazott CTA mérés technika egy-egy mérés esetén a tér egyetlen pontjában képes mérni a sebességet, így az ε kiszámítására szolgáló összefüggést alapjaiban más irányból kellett megközelítenem. Lokális izotrópiát feltételezve (pl. Larssen & Devenport (2002) alapján), továbbá alkalmazva Taylor (1938) fagyott örvény hipotézisét, a disszipációs ráta megbecsülhető az idősor energiaspektrumából is. Ennek alapján ε becsléséhez a sebesség-idősorból számított egydimenziós teljes energiaspektrumot ($E(\kappa)$) használtam fel (4.2 összefüggés) Pope (2000) alapján:

$$\varepsilon = \int_0^{\infty} 2\nu\kappa^2 E(\kappa) d\kappa, \quad 4.2$$

ahol ν a levegő kinematikai viszkozitása, κ pedig a hullámszám ($\kappa = 2\pi f/U_{ref}$). Az integrálás felső határa a definícióban szereplő végtelen nagy hullámszám helyett a kapott függvény alapján alkalmasan választott határig végeztem el. A teljes energiaspektrum ($E(\kappa)$) a mért u' és v' komponensek alapján számított $E_u(\kappa)$ és $E_v(\kappa)$ spektrumokból kalkulálható, s itt is alkalmaztam a részleges izotrópia feltevését ($v' \approx w'$). Az egyes sebességkomponens-idősorokból az energiaspektrumokat a MATLAB szoftver beépített PSD függvényével (spektrális teljesítménysűrűség függvény) állítottam elő. Ezek alapján a teljes energiaspektrum a 4.3 összefüggéssel adódott:

$$E(\kappa) = \frac{1}{2}[E_u(\kappa) + 2E_v(\kappa)] . \quad 4.3$$

A 4.3 összefüggés helyességét a 4.4-es egyenlettel ellenőrizhettem, hiszen definíció szerint (Pope, 2000) az energiaspektrum-függvény alatti terület nem más, mint a fajlagos turbulens kinetikus energia, k :

$$k = \int_0^{\infty} E(\kappa) d\kappa . \quad 4.4$$

Viszont ez a mennyiség direkt módon, a már bemutatott 4.1-es összefüggés alapján is számítható. A különböző mérési esetek eredményeinek összevetése alapján kevesebb, mint 5%-os különbség adódott a két módszerrel számított értékek között.

Mivel a disszipációs ráta igen fontos mennyiség a turbulencia jellemzésére, viszont mértékegységgel rendelkezik, így a különböző kísérletek esetén kapott értékek nem hasonlíthatók össze egymással. Ennek okán egy olyan dimenzió-mentesített mennyiséget kellett megalkotni, amely jellemzi a disszipációs rátát, de mértékegység nélküli, így már független a mérőrendszer jellemzőitől. Erre a disszipációs konstans (C_ϵ) mennyiséget vezette be a szakirodalom, amely a $C_\epsilon = \epsilon L u'^{-3}$ összefüggéssel számítható. Itt L az úgynevezett alapáramlás irányú integrál hosszskála, amely az áramlásban jelen lévő legnagyobb örvények méretére jellemző mennyiség, s a referenciasebesség (U_{ref}) és az integrál időskála (T) szorzata. Az integrál időskála meghatározása definíció szerint (Kundu & Cohen, 2002) az alapáramlás irányú sebességkomponens idősorából képzett autokorrelációs függvény első null-átmenetéig vett integrálja. Ennek meghatározása szintén a MATLAB programmal történt numerikus úton. Az így előállított C_ϵ mennyiség értéke már összehasonlítható más, a szakirodalmakban ismertetett mennyiségekkel.

Miként azt már megfogalmaztam, a turbulens áramlásban különböző méretű örvények vannak jelen. Az örvények mérete alapján karakterisztikus hosszskálát definiálhatunk, de ebből megfelelő átalakításokkal sebességskálát és időskálát is használhatunk az örvények jellemzésére. A nagy örvények instabilak, ezért azok folyamatosan kisebb örvényekre esnek szét, így az eredeti örvény kinetikus energiája is szétosztódik a kisebb örvényekben. Ezek a kisebb örvények aztán még kisebbekre esnek szét, amelyek energiájukat mindig az őket létrehozó örvényből nyerik. Így tehát az energia a nagyobb skáláktól folyamatosan a kisebb skálák felé áramlik – ezt nevezzük Richardson-féle energiakaszkádnak (Richardson, 1922) – mindaddig, amíg az örvények hosszskála olyan kicsiny nem lesz, hogy ott már a viszkozitás hatására ez az energia disszipálódik, s így a kinetikus energia belső energiává alakul, a legkisebb méretskálájú örvények megszűnnek.

Kolmogorov (1890) elméletében azt feltételezte, hogy igen nagy értékű Reynolds-szám esetén a kis skálájú turbulens mozgások statisztikailag izotrópok. Általánosságban a nagyobb skálák nem izotrópok, mivel ezek a skálák a rendszer geometriai peremfeltételeitől függenek. Kolmogorov úgy vélte, hogy ezek a geometriai és irányultsági információk elvésznek az energia-kaszád alatt a kisebb skálák felé haladva, így a kisebb skáláknak statisztikailag univerzálisnak kell lenniük: minden – megfelelően nagy Reynolds-számú – turbulens áramlás esetén ezek a skálák azonosak, függetlenül az áramlás fizikai peremfeltételeitől.

Ezek alapján tehát Kolmogorov megállapította, hogy az energiakaszádban a két fő folyamat az energiaátvitel az egyes skálák között és a viszkózus disszipáció a kisebb skálákon. Ebből adódóan valószínűen helyes az a feltevés, hogy e két folyamatot irányító fontos paraméterek egyrészt az energiaáram, amelyet a kis skálák a nagyobbaktól kapnak, továbbá pedig a viszkozitás. Így tehát megállapítható, hogy a kis skálák statisztikailag univerzális állapota a viszkozitással és az energiaárammal definiálható. Stacionárius esetben pontosan olyan sebességgel kell az energiának disszipálódnia (disszipációs ráta, ε), mint ahogy az az energiakaszádon keresztül érkezik a kisebb skálákhoz. Ennek okán tehát ε és ν együttesen jellemzik az izotróp turbulenciát. Dimenzióanalízis segítségével e két mennyiség felhasználásával meghatározhatók az ún. Kolmogorov-skálák, amelyek a következők: η – Kolmogorov-hosszskála (4.5), τ_η – Kolmogorov-időskála (4.6) és az u_η – Kolmogorov-sebességskála (4.7):

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}, \quad 4.5$$

$$\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2}, \quad 4.6$$

$$u_\eta = (\nu \cdot \varepsilon)^{1/4}. \quad 4.7$$

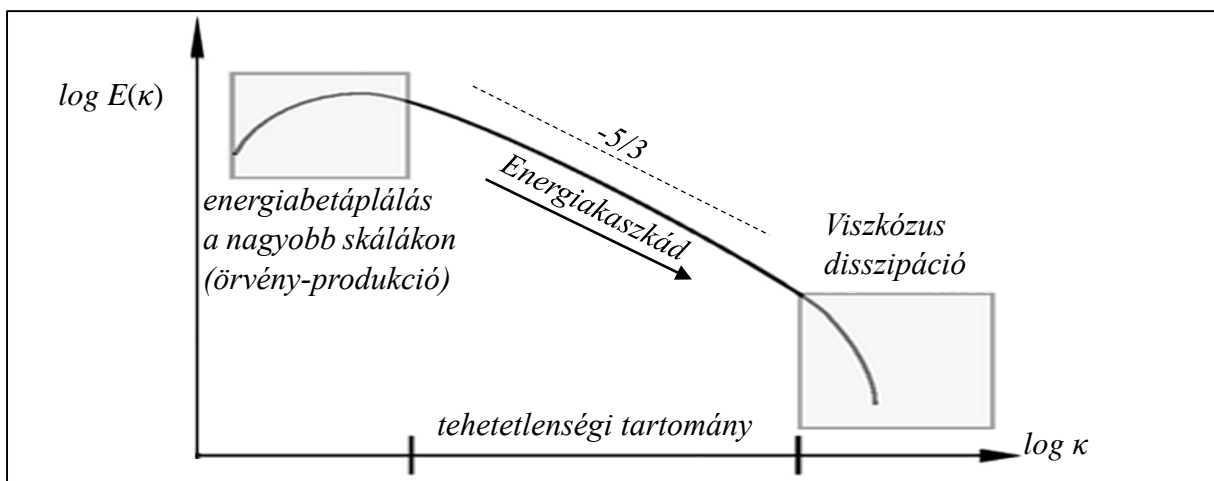
Ezek tehát a turbulens áramlásban kialakuló legkisebb skálák, mivel a disszipáció okán ezen örvények kinetikus energiái igen gyorsan belső energiává, azaz hővé disszipálódnak. Fontos még azt is észrevennünk, hogy a Kolmogorov-skálákból képzett Reynolds-szám éppen egységnyi, azaz a tehetetlenségi erők ezeken a skálákon megegyeznek a súrlódási erőkkel.

A rácsturbulenciának ugyancsak fontos jellemző mennyisége a Taylor-Reynolds-szám (Re_λ), amely a Reynolds-számhoz hasonlóan egy jellemző sebesség és jellemző méret szorzatának a viszkozitáshoz viszonyított arányát adja meg. Ez esetben a jellemző sebesség az alapáramlás irányú r.m.s. érték (u'), a jellemző méret pedig az ún. Taylor-mikroskála (λ_g). Ez a skála – noha nem bír egyértelműen definiálható fizikai jelentéssel – nagyságában a $k^{3/2}/\varepsilon$ összefüggéssel képzett hosszskála és a Kolmogorov hosszskála (η) között helyezkedik el. Levezethető, hogy a Taylor-Reynolds-szám izotróp turbulencia esetén k , ε és ν ismeretében a 4.8 összefüggéssel számítható (Pope, 2000):

$$Re_\lambda = \left(\frac{20}{3} \cdot \frac{k^2}{\varepsilon \nu}\right)^{1/2}. \quad 4.8$$

4.2.A turbulens kinetikus energia spektrális eloszlása

A turbulenciát nem csak skaláris mennyiségekkel jellemezhetjük, hanem például a már említett energiaspektrum is egy fontos jellemzője annak, hogy milyen módon oszlanak meg az egyes skálákhoz társított kinetikus energiák. Amennyiben az energia-eloszlást spektrálisan ábrázoljuk, úgy a hullámszám függvényében három tartományt szokás megkülönböztetni, amelyet a 7. ábra szemléltet. A legkisebb hullámszámokhoz (azaz a legnagyobb örvényekhez) tartozik az örvény-produkció tartománya, mivel az áramlási tér térbeli jellemzői okán itt képződnek az áramlásban jelen lévő legnagyobb méretű örvények. Ezt követi a tehetetlenségi tartomány, amit nagy értékű Reynolds-számok jellemeznek, így a tehetetlenségi erők dominálnak. E tartományban valósul meg az energiakaszád, ami az energiát egyre kisebb méretű skálák felé irányítja. Kolmogorov levezette, hogy ebben a tartományban az energiakaszád egy hatványfüggvény írja le, amely elméletileg $(-5/3)$ -os hatványkitevőjű (log-log skálán tehát egy $(-5/3)$ -os meredekségű egyenes). Minél nagyobb Reynolds számmal jellemezhető az áramlás, annál szélesebb tartományt ölel át a tehetetlenségi tartomány. Fontos megállapítás, hogy teljesen kialakult turbulenciáról csak megfelelően széles tehetetlenségi tartománnyal rendelkező áramlás esetén beszélhetünk, mivel így az egyes skálákon keresztülhaladva alakulhatnak ki az izotróp és univerzális kis skálák. Ezért a szélcsatorna-kísérleteknél cél az, hogy a beépített turbulenciagenerátorral minél szélesebb tehetetlenségi tartományt lehessen elérni.



7. ábra Elméleti spektrális energiaeloszlás kifejlett turbulencia esetén.

Minek okán a méréseim során az alkalmazott állandó hőmérsékletű sebességmérő technika alkalmas volt adott mérőpontban igen nagy mintavételi frekvenciával, hosszú mintavételezési időn keresztül adatot szolgáltatni a pillanatnyi sebességértékéről, így a kapott idősorokat Fourier-transzformációnak alávetve meghatározhattam a turbulens kinetikus energia spektrális eloszlását.

5. A LABORATÓRIUMI KUTATÁSAIM SORÁN ALKALMAZOTT MÉRÉSTECHNIKÁK

A turbulenciagenerátoros vizsgálataim során mind a generátor által létrehozott áramlás jellemzőit, mind pedig maguknak, a generátoroknak a működési sajátosságait is megvizsgáltam.

A kialakult áramlás vizsgálatához olyan mérési elvet kellett találnom, amely egyrészt megfelelő pontosságú (mind térben mind pedig időben), másrészt pedig rendelkezésemre áll a kutatóhelyen. Erre a célra szakirodalmi ajánlások (pl. Saarenrinne & Piirto, 2000; Lavoie et al., 2007; Comte-Bellot, 1976; Jørgensen, 2002) és rendelkezésre állásuk alapján a részecskeképeken alapuló sebességmérési technikát (PIV) és a már említett hődrótos légsebességmérő technikát (HWA) alkalmaztam. Azonban a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékének laboratóriumában a PIV mérés technikával elvégzett mérések eredményei alapján azt a következtetést kellett levonnom, hogy megfelelő méretű mérési intervallum esetén sajnos nem elégséges a rendszer térbeli felbontása, így az nem alkalmas a turbulencia kisebb skáláinak vizsgálatához. Ezért a hődrótos mérés technika alkalmazása mellett döntöttem, mivel ennek alkalmazhatóságát számos, rács turbulencia laboratóriumi vizsgálatát ismertető szakirodalom is igazolja.

Az áramlás vizsgálata mellett a rácsok aktív elemeinek dinamikáját is szerettem volna feltérképezni, ezért a két vizsgált rács esetén nagysebességű kamerát is használtam. A rezgőszalagos rács esetében ennek segítségével meghatároztam a rezgés jellegét, amely az eredmények alapján a fémszalagok elcsavarodásának periodikus jellegét mutatta. A préslevegővel aktivált rács esetében pedig feltérképeztem az aktív elemek (szilikoncsövek) mozgásformáit, így igazolhattam azt a feltevésemet, miszerint ezek sztochasztikus jellegű mozgást végeznek.

A részletezett vizsgálataimon túl arra is kerestem a választ, hogy alkalmas-e a préslevegős rács ipari alkalmazásra: különböző fluidumok keverésének intenzifikálására. Ebből a célból egy olyan mérési összeállítást készítettem, amellyel inhomogén hőmérsékletű áramlást hoztam létre, majd azt a rácson keresztülamoltatva, különböző távolságokban vizsgáltam a hőmérsékletmező homogenitását (az elkeveredettségek fokát). E vizsgálataimhoz hőkamerát alkalmaztam.

Az egyes mérések esetén természetesen számos egyéb, az adott vizsgálat által megkövetelt mennyiség mérésére is szükség volt (hőmérséklet, nyomás, térfogatáram, stb.); az e mennyiségek méréséhez használt műszereket az adott mérés leírásánál fogom részletezni.

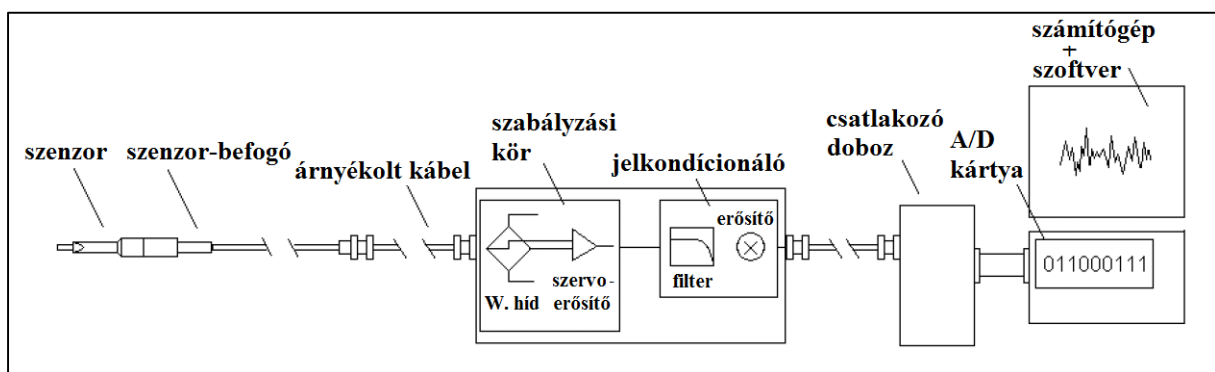
5.1. Hődrótos légsebesség-mérés (HWA)

A hődrótos légsebességmérő technika kifejezetten alkalmas olyan pontbeli vizsgálatokhoz, ahol fontos a nagy időbeni felbontás, továbbá a térbeli kiterjedésében kicsiny mérési intervallum. Alapvetően a mért jel analóg, azonban ahhoz, hogy számítógéppel feldolgozható legyen, egy A/D átalakítóval digitális jellé alakul. Röviden összefoglalva maga a mérés technika a légsebességgel szorosan összefüggő konvektív hőátadáson alapul, mivel lényegében egy, az áramló közeg hőmérsékletétől (elektromos árammal) magasabb hőfokra melegített mérőszál villamos ellenállásának változását méri és/vagy szabályozza a rendszer. Minél nagyobb az áramló közeg sebessége, annál intenzívebb a hő elszállítása a fűtött szálról is, amit viszont a mérőrendszer detektál, s megfelelő átalakítások után ebből pillanatnyi sebességjelet kalkulál.

Alapvetően kétfajta hődrótos mérési módszer terjedt el: az állandó áramú (CCA) és az állandó hőmérsékletű (CTA). Mindkét módszernél olyan mérőszálat alkalmaznak, amelynek ellenállása (s ekképp a rajta eső elektromos feszültség értéke) függ annak hőmérsékletétől.

Az állandó áramú mód esetén a mérőszondában található mérőszálon a mérőrendszer időben állandó értékű áramot folyat át, amely hatására a szálon – annak ohmos ellenállása okán – Joule-hő keletkezik, amely miatt az felmelegszik. A hőmérséklet növekedésével együtt nő a hőleadása (döntően konvekció útján) mindaddig, amíg az egyensúlyi állapot ki nem alakul. Ekkortól a keletkező Joule-hő megegyezik az elszállított hővel, tehát a rendszer egyensúlyba kerül. Ilyenkor a mérőrendszer közvetlenül a szál feszültségességét méri, amely az adott hőmérséklethez tartozó ellenállás alapján az Ohm-törvényből adódik. Amennyiben a szondát áramló közegbe helyezzük, úgy a megnövekedett kényszerkonvekció hatására igen rövid időn belül egy újabb egyensúlyi állapot áll be: a szonda hőmérséklete csökken, minek okán az ellenállása is lecsökken (pozitív ellenállás-tényező esetén). A kisebb ellenállású szálon így kisebb feszültség fog esni, amit a mérőrendszer detektál. Megfelelő, – előzetesen felvett – kalibrációs függvény esetén így tehát a rendszer adott feszültségértékhez hozzárendel egy adott áramlási sebességet. E mérési mód azonban szakirodalmi ajánlások (pl. Comte-Bellot, 1976) alapján jellemzően összenyomható áramlások vizsgálatára alkalmas, ahol is hőmérséklet-fluktuációk alakulnak ki.

Méréseimhez tehát az állandó hőmérsékletű módban (CTA) működő mérőrendszert alkalmaztam. Ebben az esetben a rendszer egy megfelelően magas hőmérsékleti értékre melegíti fel a mérőszálat, amely hőmérsékleten a rajta átfolyó áram által felszabaduló Joule-hő éppen megegyezik a szál által a környezete felé leadott hővel (egyensúlyi állapot). Amennyiben a közeg áramlása okán megnő a konvekció, úgy a mérőszál hűlni kezd, amit a rendszer egy beépített Wheatstone-híd segítségével (a csökkenő ellenállás és feszültség hibajelét hoz létre) igen gyorsan detektál. Egy szervo-erősítő ekkor növeli a szálon átfolyó áram erősségét mindaddig, amíg a beállított hőmérséklethez tartozó ellenállásból számítható feszültségesség nem lesz ismét mérhető a szondán. Így tehát igen rövid válaszidőn belül visszamelegszik az érzékelő szál a kezdeti hőmérsékletre. A mérőrendszer felépítése s mérőláncának vázlata a 8. ábrán látható.



8. ábra A CTA méréstechnika mérési lánc.

A méréseimhez a Tanszék laboratóriumában rendelkezésemre álló kétcsatornás DANTEC Dynamics StreamLine CTA típusú rendszert (90N10 Frame típusú alaplátvány 90C20 típusú hőmérőmodullal és két db. 90C10 típusú CTA modullal) használtam az azt működtető StreamWare® 4.10 verziójú szoftverrel. Az e mérőrendszeren elvégzett mérések előtt

szükséges volt a mérőszonda kalibrálása, amelyet a *DANTEC Dynamics StreamLine Pro* kalibrátorral végeztem el. Ez az eszköz a *StreamWare®* vezérlőszoftverrel üzemeltethető, s segítségével $2 \cdot 10^{-3} \div 300$ m/s sebességtartományban kalibrálható a szonda, továbbá a kétdimenziós szondák esetén (amelyekkel két sebességkomponens is mérhető) az iránykalibráció is elvégezhető (ún. Pitch-Yaw kalibráció). Az egyes mérések kivitelezése előtt kiválasztottam az adott feladatnak megfelelő szondatípust (1D vagy 2D), amelyet aztán a szélcsatornában beállítani kívánt sebességtartomány szerint kalibráltam. Amennyiben 2D szondát használtam a méréshez, úgy a szonda iránykalibrációját is el kellett végezni. Mivel maga a CTA berendezés analóg jelet szolgáltat, szükséges volt ennek a digitalizálása. Erre a célra a *National Instruments MIO 16 bit* típusú A/D átalakítóját használtam. Ahhoz, hogy a szondát pontosan az előre definiált mérési pontokban helyezhessem el egy, szintén a szoftver által működtetett háromtengelyes léptetőmotoros traverzrendszert alkalmaztam (*ISEL* típus, *IT116G ISEL* vezérlőegységgel). Ennek segítségével maximum 1010 mm-es elmozdulási tartományban, akár 0,5 mm-es pontossággal pozícionálható a szonda, amelyet a rezgőszalagos rács esetében az egyik traverzpalettára felszerelt, az áramlással párhuzamos merev alumínium kar mérőtérben található végére rögzítettem. A préslevegős rács esetén – mivel azt a vizsgálataim alatt egy másfajta felépítésű szélcsatornába építettem be – a traverzrendszer a szélcsatornán kívül, a mérőtér mellett lett elhelyezve. Ezért ebben az esetben a mérőtér egyik oldalfalán kimart pályán, oldalirányból tudtam a szondát bejuttatni az áramlásba. Ezekkel a megoldásokkal tehát biztosítottam a szélcsatornában kialakuló áramlás mérés technika által okozott minél kisebb mértékű megzavarását. E variációkat az adott vizsgálat bemutatásánál fogom részletezni.

5.2. Nagysebességű kamerák

Mindkét vizsgált, különböző elvet alkalmazó turbulenciagenerátor esetében közös az, hogy valamiféle mozgás segítségével hoznak létre igen jelentős erősségű turbulenciát. Ezért fontossá vált annak feltárása, hogy milyen mozgásformák jellemzik a generátorok működését.

A rezgő szalagos rács esetén az alapáramlás által indukált rezgés frekvenciája akkora értékű volt, hogy a mozgást szabad szemmel nem lehetett követni. Mivel a doktori kutatásom utolsó évéig nem állt rendelkezésemre nagysebességű kamera, ezért ennek első vizsgálatait stroboszkóp és digitális fényképezőgép segítségével végeztem el. E méréseimet aztán megismételtem az újonnan beszerzett nagysebességű kamerával, amelynek segítségével pontosan meghatározhattam a szalagok jellemző mozgásformáit, s azok frekvenciáját, továbbá a rezgés frekvenciájának a feszítőerőhöz és az áramlási sebességhez való viszonyát is.

A másik, légsugaras elven működő rács esetében talán még fontosabb volt információt gyűjteni arról, hogy az egyes rugalmas elemek milyen módon mozognak, miközben belőlük nagysebességű légsugarak jutnak az alapáramlásba. Mivel az alkalmazott csövecskék igen kis tömeggel, ezzel szemben nagy rugalmassággal rendelkeztek, s belőlük jelentős sebességgel áramlott ki a másodlagos levegő, ezért az áramlásból adódó reakcióerő jelentős gyorsulási értékeket eredményezett. Ebből adódóan a csövecskék olyan módon és sebességgel mozogtak (továbbá a mozgásuk során ütköztek), hogy azok vizsgálatához szintén elengedhetetlen volt a gyorskamera alkalmazása.

Az első vizsgálatokat a Magdeburgi Egyetemen végeztem el, amelyek során a megépített nagyméretű rácsnak csupán a középső, 10×11 rácspontjában elhelyezett aktív elemek működtek. E vizsgálatokhoz az ott rendelkezésre álló *LaVision VC-Imager Pro HS 4M* típusú

CMOS-szenzoros gyorskamerát alkalmaztuk a mérőszámítógépben található 16 Gb RAM memóriával. A kamerához egy 105 mm-es fókusz távolságú, *AS Micro-Nikkor 105 mm f/2.8 D* típusú optikát alkalmaztunk. Ezzel az összeállítással sikerült különböző, az aktív elemekre jellemző mozgásformákat megfigyelni, továbbá dedikált számítógépes programmal (MATLAB) kielemezni.

A későbbiekben a légsugár-rács aktív elemeiként az addig használttól jóval rugalmasabb csőtípus került alkalmazásra, amely esetben csupán minden második rácspontban lettek elhelyezve aktív elemek; a többi rácspont ledugózásra került. Fontos kérdéssé vált, hogy az egyes aktív elemek mozgása között van-e valamilyen szintű lineáris kapcsolat, mennyire mondható a mozgásuk függetlennek a másik elem mozgásától? Mindezek megválaszolására – már Miskolcon – újabb gyorskamerás méréseket végeztem, amelyek során egy *Chronos 1.4 C* típusú gyorskamerát alkalmaztam (1,4 Gpixel/s), amely monokróm CCD értékelőjével maximálisan 1280×1024 pixel felbontásra (1057 fps esetén), vagy a maximális frekvencián (38 565 fps) 336×96 pixeles képsor készítésére alkalmas.

Ehhez a kamerához két fajta optika állt rendelkezésre: *Fujian TV lens GDS-35 f=35mm*, továbbá egy *Computar 12.5-75mm f/1.2* zoom lencse. A kamera által készített képsorokat számítógéppel, kifejezetten erre a célra készített MATLAB scripttel dolgoztam fel.

5.3. Hőkamera

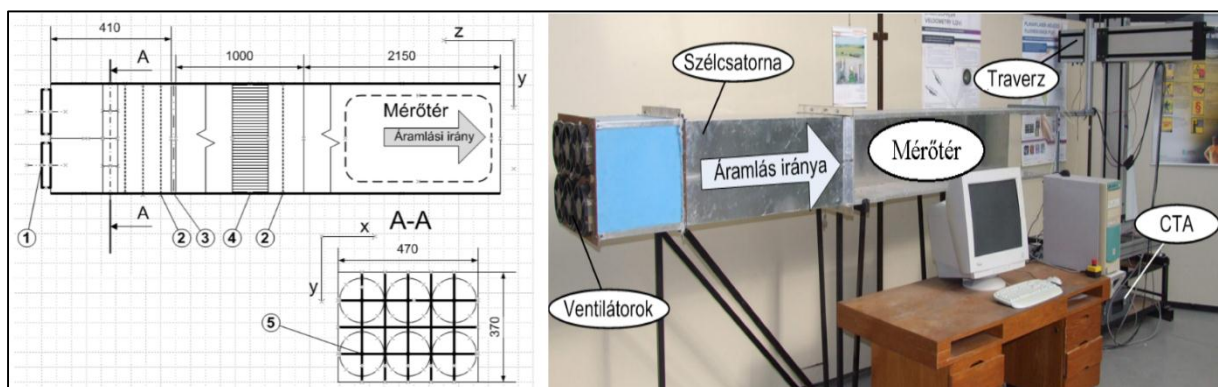
Ahhoz, hogy a légsugaras rács turbulens keveredésre gyakorolt hatását vizsgálhassam, a hőkamera alkalmazása mellett döntöttem, mivel segítségével jól detektálható egy adott (szilárd) felület hőmérséklet-eloszlása. Ennek ismeretében úgy állítottam össze a mérést, hogy a turbulenciagenerátor által okozott keverőhatás az utána kialakuló áramlás hőmérsékletmezéjén keresztül detektálható legyen. Erre a célra egy *Variocam HiRes 680* típusú hőkamerát építettem be a szélcsatornába. A *Jenoptik IR 1.0/30 LW* optikával ellátott kamera maximálisan 640×480 pixeles felbontása elegendőnek bizonyult a mérések elvégzéséhez, mivel az adott mérési összeállítás esetén ~1,2 mm/pixel térbeli felbontást tudtam elérni. A kamera által készített képeket ez esetben is általam erre a célra fejlesztett számítógépes programmal (MATLAB) dolgoztam fel.

6. SZÉLCSATORNÁK TERVEZÉSE ÉS FEJLESZTÉSE A RÁCS TURBULENCIA VIZSGÁLATÁHOZ

Annak érdekében, hogy a fejlesztendő rácsok áramlásra gyakorolt hatásait megvizsgálhassam, azokat olyan áramlási térbe kellett elhelyeznem, amely megfelelő minőségű és alapturbulenciájú áramlást biztosított. Az ilyen, laboratóriumban alkalmazott berendezések a szélcsatornák. A Tanszék laboratóriumában a kutatásom kezdetekor már rendelkezésre állt két visszatérő áramú szélcsatorna, azonban – különböző okok miatt – ezek egyikével sem tudtam megkezdeni kutatásaimat. Ezért az első feladatom egy, a méréseimhez alkalmas szélcsatorna tervezése és összeállítása volt. Először egy meglévő rövid csatornaszakaszt alakítottam át, azonban az ebben elvégzett vizsgálatok alapján egyértelművé vált, hogy a létrehozott áramlás minősége messze nem felel meg a precíz mérések kivitelezéséhez. Ezért – az összegyűjtött tapasztalataimat is felhasználva – egy nagyobb keresztmetszetű és hosszabb szélcsatornát terveztem meg, majd állítottam össze. Az ebben a csatornában elvégzett mérések s a több áramlásrendező-variáció segítségével sikerült egy olyan végleges verziót összeállítanom, amelyet aztán a rezgő-szalagos rács vizsgálataihoz megfelelőnek találtam.

6.1. Mini-szélcsatorna összeállítása, fejlesztése

Az első szélcsatorna-összeállítást egy már meglévő, 370×470 mm-es keresztmetszetű plexi csatorna felhasználásával készítettem el. Egy úgynevezett kifúvó típusú szélcsatornát építettem, amely felépítése (az áramlás irányából nézve) a következő: ventilátor – áramlásrendező - szakasz – végén nyitott mérőtér – kilépés. A légáram létrehozásához 6 db. 150 mm-es átmérőjű, egyenként 45 W-os axiális ventilátort építettem be, ezek együttes működése 1-2 m/s-os átlagsebességet eredményezett a mérőtérben. Az összesen 6 különböző áramlásrendező variáció (sűrű szövésű rácsok és csököteg más-más pozíciójú elhelyezése) mérési eredményei alapján a leghomogénebb áramlást létrehozó verzió rajza, továbbá az összeállított csatorna képe a 9. ábrán látható.



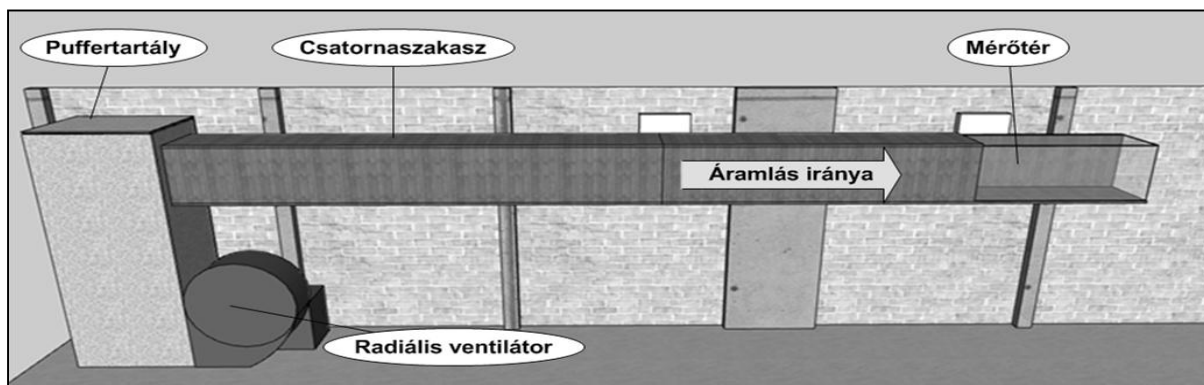
9. ábra Az első szélcsatorna-összeállítás rajza, továbbá a fényképe.

Az elvégzett CTA mérések eredményei alapján ezen összeépítésnél maximálisan 1,7 m/s-os átlagsebességet tudott produkálni a csatorna, amely esetén az átlagolt turbulencia-intenzitás $T_u < 3\%$ értékre adódott. Ez az alacsony érték megfelelt volna a későbbi vizsgálatainkhoz, azonban az alacsony átlagsebesség a későbbi méréseinkhez kevésnek bizonyult (a beépítendő rács további nyomásesést, s ekképp sebességcsökkenést okozott volna). A csatorna

összeállítását, s az egyes áramlásrendező-elrendezések eredményeit folyóiratban publikáltuk (Szaszák et al., 2012b).

6.2. Új szélcsatorna tervezése és összeállítása

A mini szélcsatorna összeállítása és mérése után arra a következtetésre jutottam, hogy a rácsvizsgálatokhoz mindenképpen a megépítettől jóval nagyobb teljesítményű ventilátorra lesz szükségem. A szakirodalom alapján (Roach, 1987; Pinker, 1967) egyértelművé vált, hogy bármilyen vizsgálandó (passzív) rács jelentős nyomáscsökkenést okoz a rajta keresztülhaladó áramlásban, amely többek között a rács kitöltési tényezőjétől, az áramlás dinamikus nyomásától, továbbá a Reynolds-számtól is függ. Ekkor azonban a megnövekedett nyomáscsökkenés teljesítményigényét a szélcsatorna ventilátorának kell biztosítani. Ezért következő lépésben egy nagyobb méretű, s egy jóval nagyobb teljesítményű radiális ventilátort tartalmazó, ugyancsak kifűvő típusú, nyitott rendszerű szélcsatornát terveztem, majd állítottunk össze a munkatársaimmal. A szélcsatorna látványterve a 10. ábrán tekinthető meg.



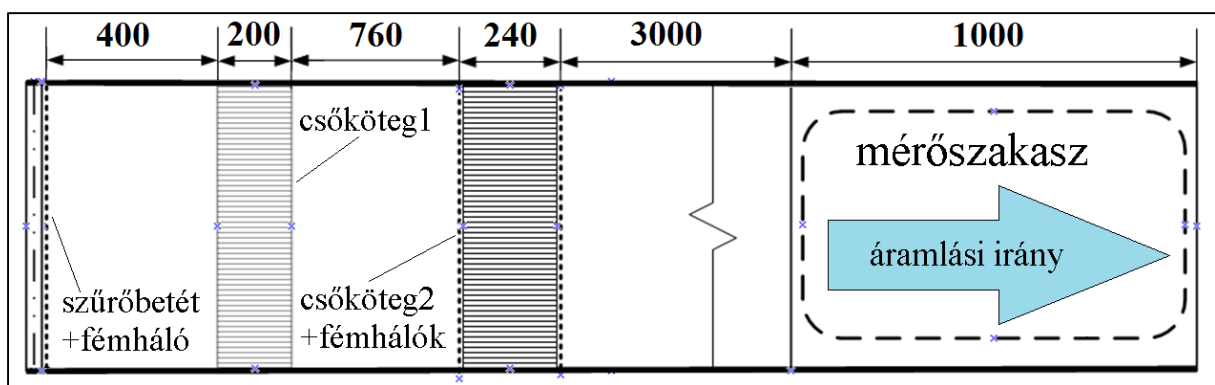
10. ábra A rezgőszalagos rács vizsgálatához összeállított szélcsatorna.

E csatorna 400×400 mm belső keresztmetszetű, amelyben az 1 m hosszúságú mérőtér előtt egy 4,6 m hosszúságú csatornaszakasz lett kialakítva a benne elhelyezett áramlásrendezőekkel. A megfelelő minőségű áramláshoz a végleges összeállításban 5×5 mm-es osztású, 1 mm átmérőjű áramlásrendező fémhálók, egy 23 mm-es külső átmérőjű, 1,5 mm-es falvastagságú, 200 mm hosszú műanyag csövekből összeállított csőköteg, továbbá egy 6 mm-es külső átmérőjű, 0,1 mm-es falvastagságú, 240 mm hosszú műanyag csövekből álló csőköteg lett elhelyezve. A szélcsatorna megfűtéséről egy háromfázisú, 4,3 kW-os villanymotorral szerelt radiális ventilátor gondoskodott, amelyet frekvenciaváltóval vezelve lehetőség volt az áramlás sebességének beállítására. A ventilátor és a csatorna közé egy puffertartály lett beépítve, szintén áramlásrendező szerepe miatt. Ahhoz, hogy a mechanikai hatásokra kifejezetten érzékeny CTA technikát alkalmazhassam, az előbb említett elemeken túl egy filcszűrő-betét is beépítésre került közvetlenül a csatorna puffertartály felőli végén. A megfelelő minőségű áramlás létrehozása e csatorna esetén tehát nem diffúzorral történt, hanem a puffertartály, az áramlásrendező és a hosszú bevezető csőszakasz együttesével.

A csatornaszakaszban az áramlásrendező elemek legmegfelelőbb pozicionálása végett, azok különböző beépítési eseteiben vizsgáltam meg a mérőtérben kialakuló áramlást. Erre a célra szintén a CTA mérés technikát alkalmaztam: a mérőtérben belül, a kilépéstől 100 mm-re lévő síkban, 350×350 mm-es keresztmetszetben, 10×10 mm-es rácsközű raszter pontjaiban

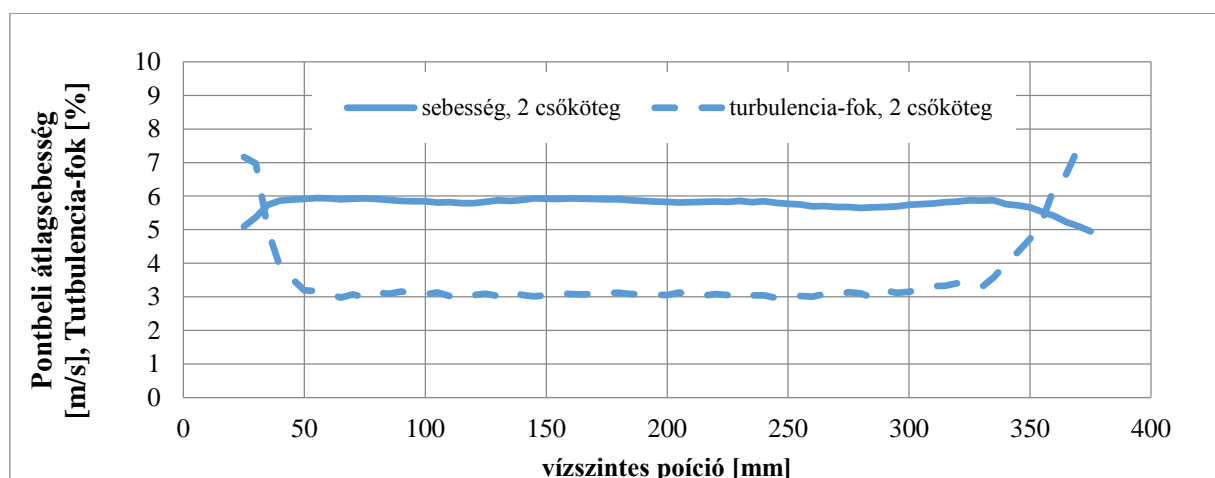
lettek kimérve az időátlagolt sebességértékek, továbbá a turbulencia-fokok. Ezeket később a MATLAB programban dolgoztam fel: a térbeli átlagok, az eloszlás-diagramok, továbbá a turbulencia-fok hisztogramok is meghatározásra kerültek. A különböző mérési esetek eredményeiről a Szaszák & Szabó (2013a) konferenciákban számoltunk be. A legjobb variációhoz tartozó turbulencia-fok értéke (a középső, 250×250 mm-es tartományra átlagolva, $U_{ref} \approx 10$ m/s átlagsebesség esetén) $T_u \approx 2\%$ -ra adódott.

A publikációkban is bemutatott három különböző áramlásrendező-variáció eredményei eltértek, így meg kellett találnom a leoptimalisabb összeállítást, amelyet a rács-kísérletekhez használhatok. Mivel egyértelműen látszott a beépített csököteg és a fémháló pozitív hatása, ezért úgy döntöttem, hogy további elemeket helyezek el a csatornában. További vizsgálataim alapján (kisebb és nagyobb áramlási sebességek, további mérési síkok/vonalak) a 11. ábrán látható variáció alkalmazása mellett döntöttem.



11. ábra A végleges áramlásrendező-variációt tartalmazó szélsatorna-szakasz.

A méréseket a mérőtér vízszintes középvonalában, a kilépéstől 100 mm-re végeztem el a középső, 350 mm széles egyenes mentén. Ezen összeállítás esetén kapott átlagsebesség- és turbulenciafok-értékeket a 12. ábrán látható diagram segítségével szemléltetem. A diagram alapján látható, hogy mind a turbulenciafok, mind pedig az átlagsebesség megfelelően homogén eloszlású a csatorna középső részében, s az egyes variációk összehasonlítása (Szaszák, 2013) alapján ezen áramlásrendező-variáció esetén alakult ki a leghomogénebb áramlás.



12. ábra A két csököteget tartalmazó variáció eredményei adott ventilátor-fordulatszám esetén.

E mérési eredményeim alapján tehát sikerült egy olyan összeállítást találnom, amely segítségével a későbbi rács-méréseimhez megfelelő minőségű alapáramlást tudtam létrehozni. Mivel egy olyan rácsot készítettem el (rezgő-szalagos rács), amely felépítéséből adódóan külső merevítő keretet igényelt, így a későbbiekben vizsgált szalag-rácsok (műanyagból, majd acélból) e szélescsatornának a mérőterébe lettek beépítve. E csatorna esetén ugyanis a mérőtér tekintetében a külső- belső hozzáférés biztosított volt a csatorna szétszerelése nélkül.

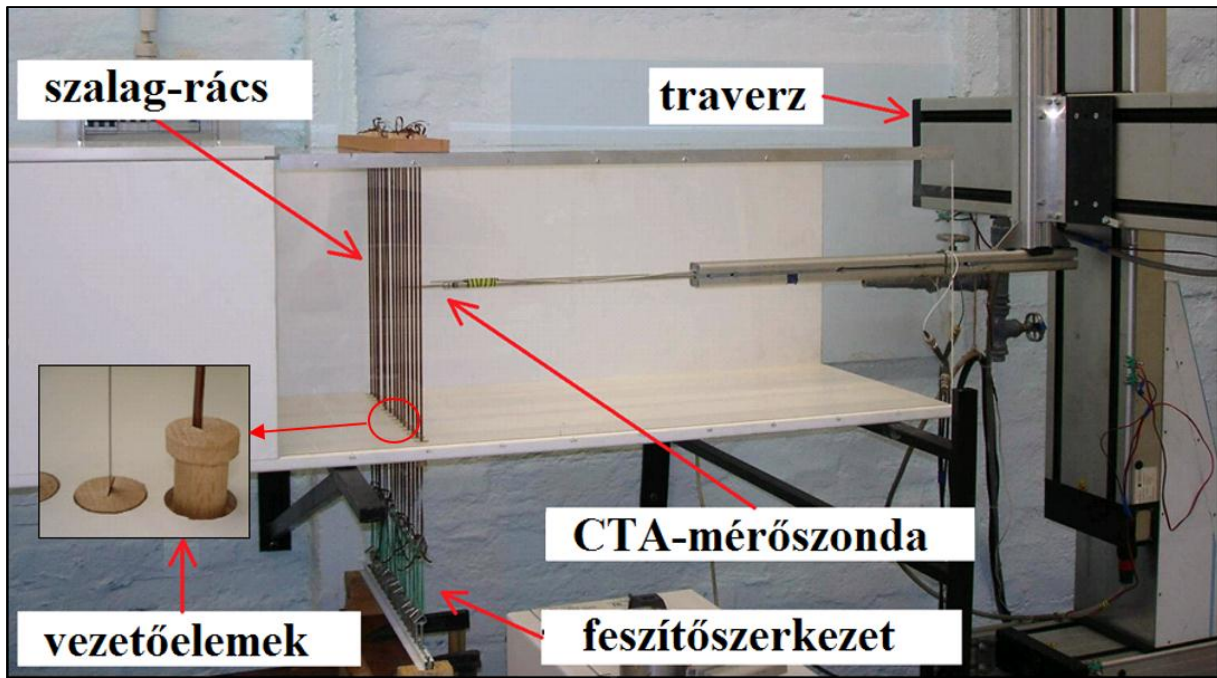
7. KÜLSŐ ENERGIAFORRÁST NEM IGÉNYLŐ AKTÍV RÁCS ÖSSZEÁLLÍTÁSA, ÁRAMLÁSTECHNIKAI VIZSGÁLATA

Párhuzamosan a csatorna építésével és vizsgálataival, új típusú aktív rács összeállításával is foglalkoztam. Akkor saját elgondolásom alapján egy olyan aktív turbulenciagenerátort építettem meg, amely rácselemeinek mozgásával hoz létre dinamikus határréteg-leválást, s ekképp növeli meg a turbulenciát. Mindezt úgy teszi, hogy a mozgásához szükséges energiát magából az alapáramlásból nyeri. Emiatt ez a rács – bár a működését tekintve aktív típusú – nem igényel külső plusz energiaforrást. A turbulencia növeléséhez az energiát a rááramló levegő nyomásából nyeri, amelyet a szélcsatorna ventilátora maga állít elő. A rács igen egyszerű felépítésű, olyan függőleges rácselemekből áll, amelyek vékony, keskeny rugalmas szalagok, s amelyek síkjai nyugalmi állapotban közel párhuzamosak a csatorna hossz tengelyével. E szalagok megfelelő erősségű légáram hatására periodikus rezgő-csavaró mozgást végeznek.

Az első ilyen prototípus rácselemei 3,81 mm széles és 15 μm vastagságú poliészterszalagból épültek fel, amelyek azonban a mérések folyamán gyakran elszakadtak. Ezért az eszköz továbbfejlesztéseként a későbbiekben acéllemez-szalagokat alkalmaztam aktív elemekként, amelyek jóval ellenállóbbnak bizonyultak. Ezek geometriai jellemzői: szélességük 6 mm vastagságuk 50 μm . Mindkét rács $M=25$ mm-es rácsállandóval rendelkezett, így a 400 mm-es szélességű csatornába összesen 15 db. szalagot tudtam beépíteni. A kialakuló turbulencia jellemzőinek meghatározásához szükséges méréseket az első, poliészter anyagú rács esetében is végeztem (Szaszák & Szabó, 2013b; Szaszák & Szabó, 2014a,b), azonban jelen dolgozatban csupán a továbbfejlesztett, erőmérővel és mechanikus feszítőszerkezettel ellátott rácson elvégzett mérések eredményeit mutatom be részletesen.

7.1. Poliészter-szalagokból felépített rács összeállítása és vizsgálata

Az első rezgő szalagos variáció tehát műanyag szalagokat tartalmazott, amelyek az áramlás hatására rezgőmozgást végeztek. Ahhoz, hogy a rácsot a csatornába építhessem, a csatorna mérőterének alsó és felső falán, a mérőtér kezdetétől 200 mm-re lévő vonalban furatokat készítettem, majd a szalagokat ezeken keresztül vezettem át az áramlási téren. A szalagokat a csatorna felső lapján mereven rögzítettem, azonban az alsó lap alatt rugalmas gumiszálakkal csavarmentes feszítőelemekhez csatlakoztattam ezeket annak érdekében, hogy a szalagok feszességét egymástól függetlenül lehessen módosítani. Ezzel a megoldással (itt még a feszítőerő egzakt mérése nélkül, csupán szubjektív megfigyelésre alapozva) úgy tudtam az egyes szalagok feszességét beállítani, hogy adott áramlási sebesség esetén mindegyik szalag közel megegyező amplitúdóval rezegjen. A csatorna falán készített furatokba olyan hengeres vezetőelemeket helyeztem el, amelyeken egy sugárirányú bevágás vezette meg a műanyag szalagokat. Így ezeknek az elemeknek a megfelelő elforgatásával tudtam a szalagokat az alapáramlás irányával párhuzamosan pozicionálni. Az első szalag-rács összeállítását a 13. ábra szemlélteti.

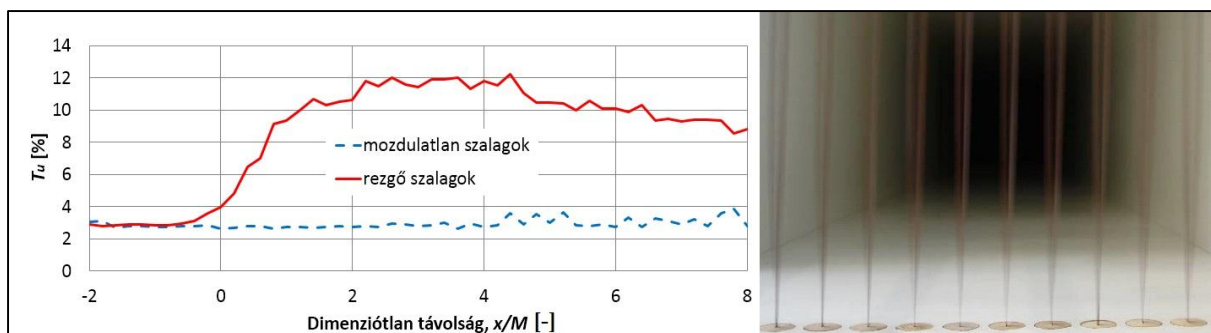


13. ábra A szélsatornába építet műanyag szalagos rács a csavaros feszítőszerkezettel.

7.1.1. Passzív és aktív működési mód összehasonlítása

A szalag-rács turbulenciára gyakorolt hatásának vizsgálatához CTA méréseket végeztem mind nyugalomban lévő, mind pedig rezgő szalagok esetén. Különböző áramlási sebességek esetén, továbbá különböző mértékű feszítőerők esetén is vizsgáltam a kialakult áramlás jellemzőit. A méréseket a csatorna hossz tengelye mentén, a vízszintes középsíkban, továbbá a rácstól különböző távolságokban, diagonális vonalak mentén is elvégeztem. A mérések eredményeit folyóiratcikkben (Szaszák & Szabó, 2013b), továbbá konferenciacikkben (Szaszák & Szabó, 2014a,b) is publikáltam. A publikált eredmények közül jelen dolgozatban csupán a legfontosabbakat mutatom be, amelyek alapján ígéretesnek találtam az ötlet alkalmazhatóságát, továbbfejlesztését.

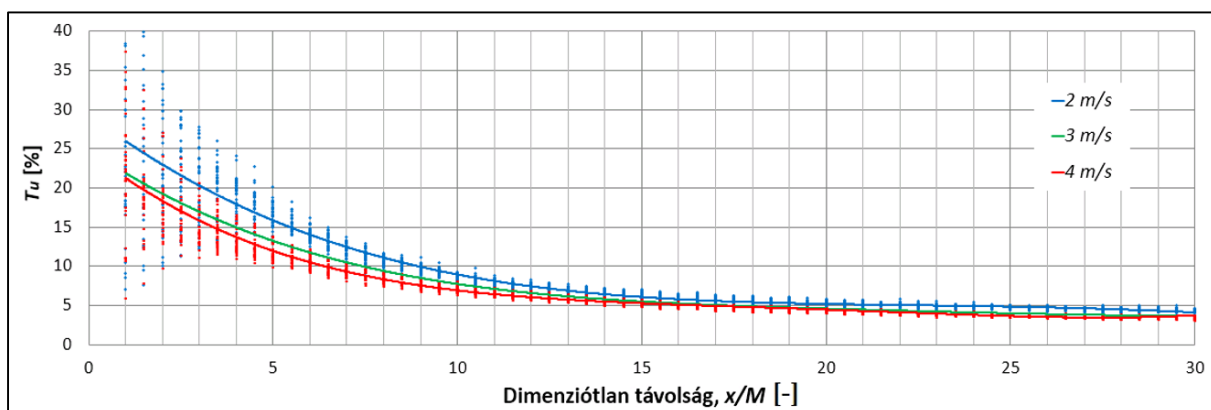
Az első méréseket a csatorna középvonalában, a rács előtti $x/M=-2$ és a rács utáni $x/M=8$ intervallumban végeztem el mind nyugalomban lévő, mind pedig rezgő szalagok esetén, 2,5 m/s-os átlagsebességű légáramlással. Adott légsebesség esetén a szalagok feszítésével érhető el az, hogy azok ne rezegjenek: ebben az állapotukban 15 μm -es áramlásra merőleges vastagságuk miatt jelentéktelen befolyással bírnak az áramlásra. E méréseim során csupán az alapáramlás irányú sebességkomponenst (u) mértem 1D-s CTA szondával, 2kHz-es mintavételi frekvenciával, mérési pontonként 2,5 s-os időtartamban. A passzív és az aktív rács esetén mért turbulencia-fok értékek, továbbá a rezgő szalagokról hosszú expozíciós idővel készített fénykép a 14. ábrán láthatók.



14. ábra A passzív és az aktív rács keltette turbulencia-fok alakulása, továbbá a rezgő szalagokról készült hosszú expozíciós idejű felvétel.

A diagram alapján megállapítható, hogy a rács aktiválása jelentős hatással van az áramlás turbulenciájára: a rácsot követően igen kis távolságon belül ($\sim 2M$) ugrásszerűen megnő a turbulencia intenzitása. Miközben passzív esetben a teljes vizsgálati tartományon belül 3%-os érték közelében, közel állandó értékű a turbulencia-fok, addig aktív esetben a maximális, 12%-os értéket is eléri a turbulencia erőssége. Ez arányait tekintve 4-szeres növekedésnek felel meg, tehát ez alapján egyértelmű, hogy a konstrukció jelentős mértékben képes növelni az alapáramlás turbulenciáját.

Ezen eredmény alapján további méréseket végeztem a csatorna vízszintes középvonalának középső, 150 mm ($\equiv 6M$) széles részében, $x=1\div 30M$ intervallumban. A megfelelően nagy felbontás miatt a rács síkjával párhuzamos irányban $0,2M$ lépésközt, míg az alapáramlás irányában pedig $0,5M$ lépésközt állítottam be. E méréseimet aktív ráccsal, $U_{ref}=2$ m/s, 3 m/s, 4 m/s-os sebességeken végeztem el. A síkbeli mérésből számított turbulencia-fok értékeket mutatja be a 15. ábra, ahol az egy-egy, x tengelyen mért távolsághoz tartozó vízszintes vonalban számolt adatok lettek feltüntetve (adatpontok), továbbá az adott x/M távolságban számolt értékek számtani átlagaiból nyert pontokra fektetett regressziós görbék láthatók.



15. ábra A vízszintes középsíkban mért turbulencia-fok értékek, s a rájuk fektetett regressziós görbék.

A 15. ábrán megfigyelhető, hogy mindhárom vizsgált sebesség esetén igen jelentős mértékben szórnak az értékek a rácshoz közel, aminek maga a rezgő rács az oka: az éppen egy-egy szalag között mért értékek jóval kisebbek (lásd 14. ábra), mint éppen a szalaggal egyvonalban számított eredmények. A korábban bemutatott szakirodalmak alapján (Roach, 1987; Djenidi & Tardu, 2012; Djenidi et al., 2013) éppen ebből az okból is célszerű legalább $10M$ távolságtól vizsgálni a turbulenciát, hiszen minimum ekkora távolság szükséges ahhoz,

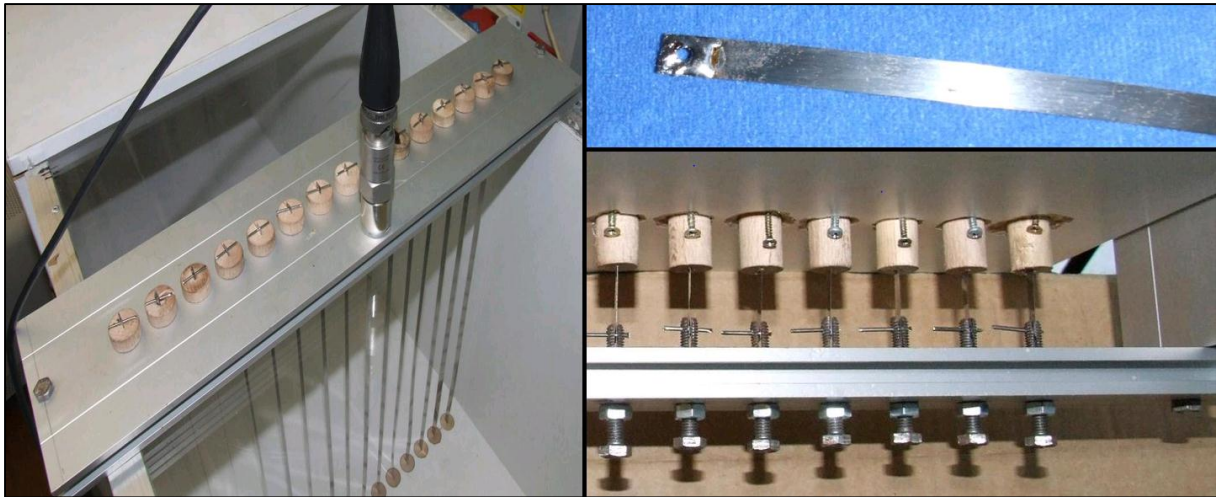
hogy homogén eloszlásúnak tekinthessük az áramlást. Továbbá a rács közelében akár negatív alapáramlás irányú sebességkomponensek is megjelenhetnek, amelyek miatt a hődrótos mérés eredményei jelentősebb hibákat tartalmazhatnak (Krogstad, 2012). Ahogy az látható is, $10M$ távolságtól már igen szűk sávban mozognak a turbulencia-fok értékek adott távolság esetén. Továbbá jól látható az átlagértékek szigorúan monoton csökkenése is a távolsággal együtt, ami a rácsok által létrehozott elhaló turbulenciának a jele. E megállapításokon túl az is megfigyelhető, hogy nagyobb sebességértékekhez rendre kisebb értékű turbulencia-fokok tartoznak. Ennek magyarázata a turbulencia-fok definíciójában kereshető. A sebesség szórásnégyzetének és az átlagsebességnek az aránya akkor csökkenhet, ha nagyobb átlagsebesség-növekedéshez kisebb szórásnégyzet-növekedés társul, azaz az arányuk csökken. Így tehát az mondható, hogy a növekvő átlagsebességgel csökkenő turbulencia-intenzitásnak az az oka, hogy a vizsgált rács esetén, növekvő átlagsebességnél a sebesség szórásnégyzete nem nő olyan mértékben, mint maga az átlagsebesség. Ez a jelenség a továbbfejlesztett rács esetében is vizsgálat tárgyát képezte, ezért erre a későbbiekben még visszatérek.

7.2. Acélszalag-rács összeállítása és vizsgálata

Mivel a műanyag szalagos rács vizsgálataival többször is előfordult az, hogy egy-egy szalag elszakadása miatt meg kellett ismételnem a mérést, továbbá a bemutatottaktól nagyobb áramlási sebességeken (5-6 m/s) szintén több esetben elszakadtak a szalagok, ezért egy olyan megoldást kellett keresnem, amely jóval megbízhatóbb működést tett lehetővé. Ebből az okból cseréltem ki a műanyag szalagokat fémszalagokra, továbbá ezekhez megfelelő merevségű fémkeretet és feszítőszerkezetet is készítettem, amelyet magához a szélcsatornához rögzítettem.

7.2.1. A fémrács és a feszítőszerkezet összeállítása, szélcsatornába történő beépítése

A műanyag szalagos rácsvariáció eredményei rámutattak arra, hogy az adott dimenziókkal rendelkező konstrukció alkalmazható turbulencia generálására. Ezért a kereskedelemben kapható, hasonló méretekkel rendelkező fémszalagokat kerestem, majd szereztem be. A választásom – a már említett - a 6 mm széles, 50 μ m vastagságú, 1.1274 anyagminőségű rugóacél szalagokra esett. Ezek előnye az, hogy nagyobb áramlási sebességeken is alkalmazhatók, kopásállóak, továbbá hőállóak (esetleges ipari alkalmazás lehetősége). Mivel ezek jóval nagyobb szakítószilárdsággal rendelkeznek, ezért a megfelelő mértékű megfeszítésükhöz az előző megoldástól lényegesen merevebb feszítőszerkezet építése vált szükségessé. E szalagok beépítésénél az előző verzióval kialakított furatok s hengeres vezetőelemek már rendelkezésre álltak, így ez esetben is $M=25$ mm-es rácsköz adódott. Ezzel tehát szintén 15 darab szalagot tudtam a csatornába beépíteni. A megfelelően merev keretet alumínium Bosch-profilokból állítottam össze a csatornán kívül. A méretre vágott hosszúságú szalagok végein egy-egy 2 mm átmérőjű, forrasztással megerősített furatot képeztem, amelyeken keresztül csapokkal rögzíthettem azokat. A keret felső lapján mereven rögzítettem a fémszalagokat a rajtuk kialakított furatokon keresztül, az alsó elemén pedig csavaros feszítőszerkezetet állítottam össze. Ebben az esetben a csavarszárok végeit átlósan bevágtam s a bevágásra merőlegesen furatokat alakítottam ki a szalagok csappal történő rögzítéséhez. A csavarokon elhelyezett extra csavaranya szolgált az egy-egy szalag megfelelő feszességének beállítására. Az egy elkészített összeállítást s annak részeit a 16. ábra szemlélteti.

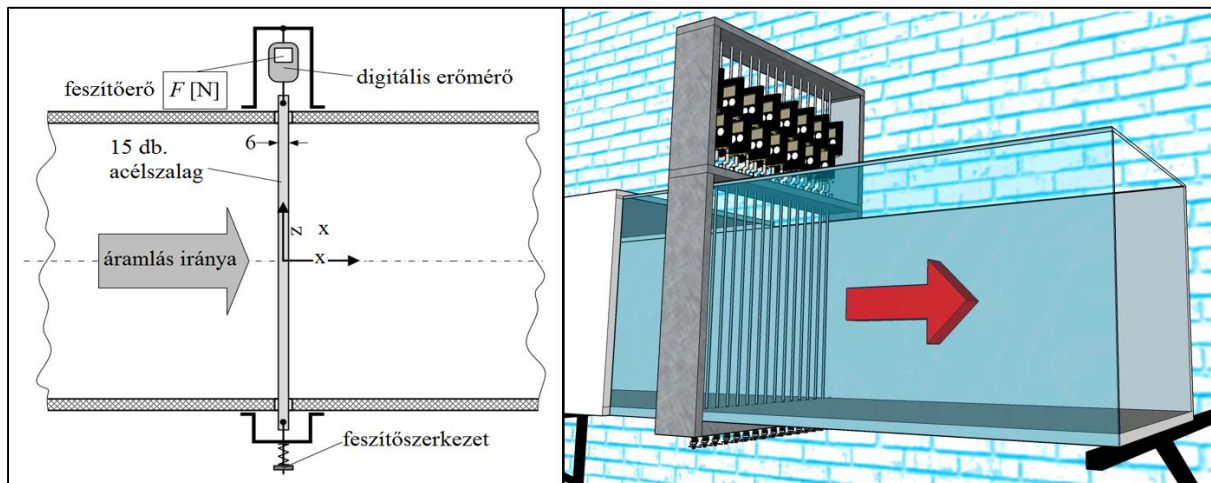


16. ábra A csatornába épített acélszalag-rács a csavaros feszítőszerkezettel s a szalagon kialakított, forrasztással megerősített furat.

Mivel ez a modell is ugyanabban a pozícióban lett beépítve a csatornába, ezért a rácsot követően 800 mm-es, azaz 32M hosszúságú mérőszakasz állt rendelkezésemre a későbbi mérésekhez.

7.2.2. Szisztematikus vizsgálatok elvégzése

Az összeállított acélszalag-rács után kialakuló áramlás turbulens jellemzőinek vizsgálatait több, különböző mérési összeállítás esetén végeztem el. Ezek közül az első vizsgálatokat a mérőtér középvonalában, s azzal párhuzamosan, egydimenziós mérőszonda alkalmazásával hajtottam végre. A különböző áramlási átlagsebességeken (3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s) elvégzett mérések eredményeit többféle megközelítés alapján hasonlítottam össze: vizsgáltam a turbulencia elhalását a rácsból mért távolság függvényében ($x/M=5\div 30$), továbbá az áramlási átlagsebességeknek a turbulens energiaspektrumra gyakorolt hatását is meghatároztam. Ezen eredményeimet a Szaszák & Szabó (2015a) tanulmányban ismertettem. Ezen túlmenően a turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának (ε) alakulását is megvizsgáltam, szintén különböző áramlási sebességek és rácsból mért távolságok esetén. A vizsgálat eredményeit a Szaszák & Szabó (2015b) cikkben ismertettem. Az elvégzett vizsgálatok eredményei ennél a rácsnál is bizonyították az acélszalagok alkalmazhatóságát, s ekképp az ötlet működését. Azonban problémaként felmerült, hogy az egyes szalagok különböző feszítettsége hatással lehet a keletkező turbulenciára, amit a bemutatott konstrukcióval nem lehetett vizsgálni, mivel nem volt lehetőség a feszítőerők meghatározására. Ezért a rácsot merevítő keret úgy lett átalakítva, hogy azon szalagonként 1-1 digitális erőmérő (*WeiHeng ES50* típus) lett elhelyezve. Ezzel a megoldással tehát szalagonként külön-külön be lehetett állítani a kívánt feszítőerőt, így egy-egy mérési esetben egymással megegyező feszítettséggű szalagok által keltett turbulenciát vizsgálhattam. A mérőeszközökkel egybeépített szerkezet a 17. ábrán tekinthető meg.



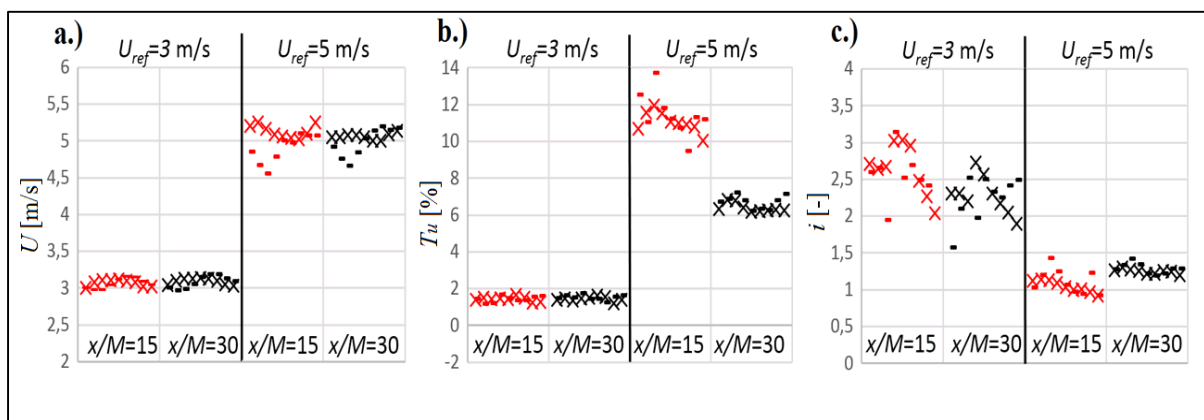
17. ábra Az erőmérőkkel ellátott rács 2- és 3 dimenziós rajzai.

Ezen összeállítással az első mérési sorozat három különböző feszítőerő ($F=5\text{ N}$, 10 N , 15 N), továbbá három referenciasebesség ($U_{ref}=4\text{ m/s}$, 5 m/s , 6 m/s) esetén lett elvégezve. A mérésekhez 2 dimenziós CTA-szonda (55R51 típusú nikkell bevonatos kvarc szálak) volt alkalmazva, amellyel a spektrális energia-eloszlás meghatározásához $1,5\text{ kHz}$ -es mintavételi frekvencián mérési pontonként 60 s -on keresztül történt a mintavételezés. A mérési pontok a szélcsatorna középvonalában, $x/M=10\div 28$ tartományban lettek definiálva. A mérések feldolgozásával igazolódott a feltételezés, miszerint a szalagok feszítőereje hatással van a turbulenciára: ennek jelentősége főként a kisebb sebességeknél mutatkozik meg, ahol is szignifikánsan más jellegű energia-eloszlás figyelhető meg $F=5\text{ N}$ és $F=15\text{ N}$ feszítőerők esetén (Szaszák et al., 2016; Szaszák et al., 2017a,c).

Az acélszalag-rács fent említett méréseinek eredményei azt mutatták, hogy a szalagok feszítésének, és az őket megfúvó áramlás sebességének is jelentékeny hatásai vannak a kialakuló turbulenciára, ezért további, szisztematikus mérések elvégzése mellett döntöttem. Egy olyan mérésorozatot végeztem el, amely CTA technikával gyűjtött adataiból mind statisztikai (időben és térben is átlagolt) eredményeket, mind pedig a turbulencia spektrális eloszlására jellemző mennyiségeket meghatározhattam. Továbbá fontos volt megfelelő számú paraméter-variáció mérése is, hogy az egyes változók hatásait nagy biztonsággal határozhassam meg. Éppen ezért az újabb méréseket (szintén az 55R51 típusú szondával) $F=5\text{ N}$, 10 N , 15 N , 20 N feszítések esetén, s $U_{ref}=3\text{ m/s}$, 4 m/s , 5 m/s , 6 m/s végeztem el. Fontos itt megjegyezni, hogy összesen öt mérési esetben egyáltalán nem rezegtek a szalagok, azokat nem tudta az áramlás rezgésbe hozni. 3 m/s -os sebesség esetén egyik feszítésnél sem rezegtek a szalagok (4 eset), továbbá a 10 N -os feszítés mellett a 4 m/s -os sebességű beállítás esetén is teljesen mozdulatlanok maradtak. Ugyancsak 4 m/s -os sebességnél a többi feszítés esetén sem rezgett az összes szalag. Ez a tény nyilvánvalóan hatással volt az eredményekre, viszont a mérések megismétlése (és a sebesség újbóli beállítása) esetén szintén voltak nyugalomban maradó szalagok. A továbbiakban ezért az $U_{ref}=3\text{ m/s}$ sebességhez tartozó eredményeket és az $U_{ref}=4\text{ m/s}$ és $F=5\text{ N}$ feszítőerőhöz tartozókat „passzívnak” nevezem, s ezeket hasonlítom össze a $U_{ref}=4\text{ m/s}$, 5 m/s , 6 m/s sebességekhez tartozó „aktív” esetekkel. A továbbiakban bemutatásra kerülő passzív és aktív eseteknek megfelelő eredmények között szignifikáns különbségek figyelhetők meg, így azok egyértelműen megkülönböztethetők lesznek. Ekkor már

a korábbi mérésekhez képest jóval nagyobb, 20 kHz-es mintavételi frekvenciával (továbbá 10 kHz-es aluláteresztő szűrővel), mérési pontonként 60 s-ig gyűjtöttem az adatokat a csatorna középvonalában, $x/M=10-15-20-25-30$ pozíciókban. Ezen túlmenően a ráccsal párhuzamos középvonalakban is történtek mérések az áramlás homogenitásának vizsgálata céljából. A mérési adatokat dedikált MATLAB script-ekkel dolgoztam fel, így eredményként számos, a 4. fejezetben részletezett, turbulenciára jellemző mennyiséget határoztam meg, amelyek segítségével össze tudtam hasonlítani a különböző beállításokkal kapott turbulencia-jellemzőket (Szaszák et al., 2016; Szaszák et al., 2017a,b,c,d).

A rács síkjával párhuzamosan, vízszintes és függőleges középvonalakban vizsgáltam az áramlás homogenitását. E méréseimet az $x/M=15$ és $x/M=30$ távolságokban, $U_{ref}=3$ m/s (nyugalomban lévő szalagok) és $U_{ref}=5$ m/s (rezgő szalagok) esetén vizsgáltam a középső, $8M$ szélességű részben. Az adatokból számított pontbeli átlagsebesség (U), a turbulencia-fok (T_u) és az izotrópia-arány eloszlását szemlélteti a 18. ábra a.) b.) és c.) része.



18. ábra A rács síkjával párhuzamos vonalakban mért jellemzők $F=20N$ feszítettségű szalagok esetén: a.) átlagsebesség; b.) turbulencia-intenzitás; c.) izotrópia-arány. Jelölés: függőleges vonalban számított értékek: x; vízszintes vonalban kapott eredmények: -.

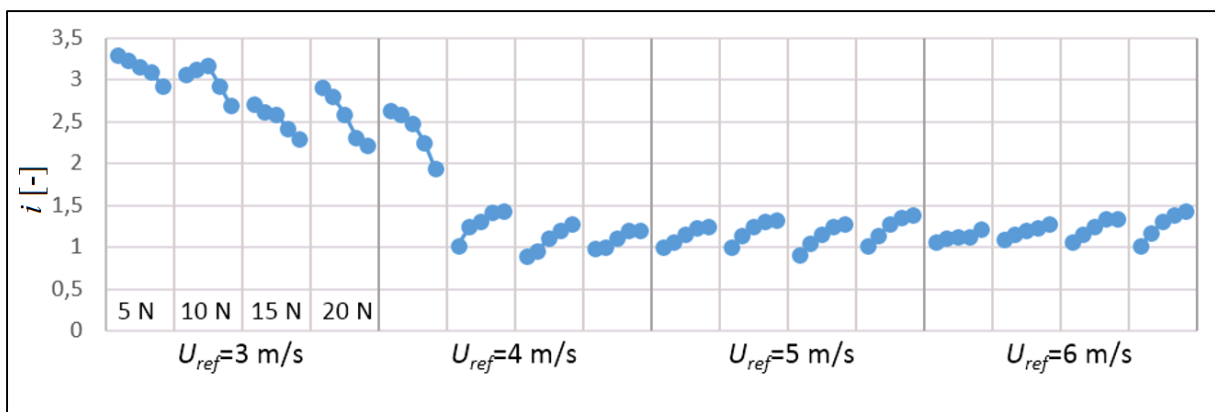
A 18. ábra mindhárom diagramja (a.), b.), c.) két-két részegységre osztható a beállított referenciasebesség alapján. Az egyes részegységek egy-egy oszlopa pedig a ráctól mért távolság szerinti eredményeket tartalmazza. A 18 a.) ábra alapján megállapítható, hogy miközben passzív rács esetén a sebességértékek közel megegyezően kis szórásúak (azaz igen szűk sávban mozognak), addig aktív esetben (azaz $U_{ref}=5$ m/s esetén) a szórás valamelyest nagyobb értékű. Főként a vízszintes irányban számított értékek szórnak jelenősen s aszimmetrikusan, s ez a tendencia nem csökken számottevően a ráctól mért távolsággal sem: a legnagyobb relatív eltérés nagysága 7%-os. Annak tényét, hogy a rács hatására csökken az áramlás homogenitása, már számos szakirodalom tárgyalta. Főként légsugaras rácsoknál számoltak be jelentős inhomogenitásról: Liu et al. (1971) cikkükben 10% körüli értéket publikáltak, Mathieu & Alcaraz (1965) pedig 15%-ról számolt be. A 18 b.) ábra egyértelműen igazolja, hogy az aktív rács jelentősen nagyobb mértékű turbulenciát állít elő, mint passzív üzemben. Azonban itt is megfigyelhető, hogy – miközben passzív esetben közel állandó értékű – aktív rács esetén szélesebb intervallumban mozognak az értékek, habár $x=30M$ távolságban már szűkebb ez az intervallum. Ennek oka visszavezethető az átlagsebességek egyenetlenségére, hiszen a turbulencia-fok összefüggésének nevezőjében éppen az átlagsebesség szerepel. Továbbá fontos észrevenni azt, hogy aktív esetben a két vizsgált távolság értékei jelentősen eltérnek, ami a rács által keltett turbulencia elhaló jellegéből adódik.

A 18 c.) ábrán látható tendencia szerint az aktív rács jelentősen javítja az izotrópia-arányt, hiszen esetében egységnyihez jóval közelebbi értékek adódnak. Itt azonban meg kell azt jegyezni, hogy az izotrópia-arány számításának alapjai a szórásértékek, amelyek értékei passzív esetben jóval kisebbek, így a velük való kalkuláció nagyobb relatív hibát eredményez.

A rácssturbulencia jellemzésére a fellelt szakirodalom alapján leginkább a rácstól mért távolságot, mint független változót alkalmazzák, s ennek függvényében vizsgálják az egyes mennyiségek alakulását. A következőkben én is a szélcsatorna középvezetékében mért mennyiségeket fogom ismertetni. A legtöbb turbulens paraméter összehasonlítása a szalag-rács passzív és aktív állapota között nem lehetséges, mert – eltérően a légsugaras rácstól – a szalag-rács passzív állapotában nem tekinthető konvencionális rácsnak, mivel ekkor elhanyagolható a szalagok áramlásra merőleges kiterjedése. Éppen ezért, ilyenkor a mért turbulencia magára a szélcsatornára jellemző, nem pedig a rácsra.

A csatorna középvezetékében az egyes mérési esetek vizsgálatakor a sebességértékek közel állandó értékűre adódtak a vizsgált $x/M=10\div 30$ tartományban. Az $U_{ref}=6$ m/s-os beállítás kivételével minden esetben 3%-tól kisebb volt a legnagyobb mértékű relatív hiba; a legnagyobb sebességen $F=20$ N-os feszítettségénél 8%-os maximális relatív eltérést kalkuláltam a rácshoz legközelebbi mérőpontban.

A következőkben eredményeimet diagramokkal szemléltetem. A diagramok egyes oszlopai az adott referenciasebességeknek felelnek meg, s egy-egy oszlopon belül rendre az $F=5\text{--}10\text{--}15\text{--}20$ N erőkhöz tartozó értékek láthatók (vonalakkal összekötött pontok). Minden adatsor első pontja az $x=10M$, utolsó pontja pedig az $x=30M$ távolságnak felel meg. Ilyen módon könnyen összehasonlíthatók a vizsgált mérési esetek eredményei. A 19. ábrán az izotrópia-arány alakulása tekinthető meg, amely arány az alapáramlás irányú (u') és a vízszintes irányú (v') szórások arányaként van definiálva.

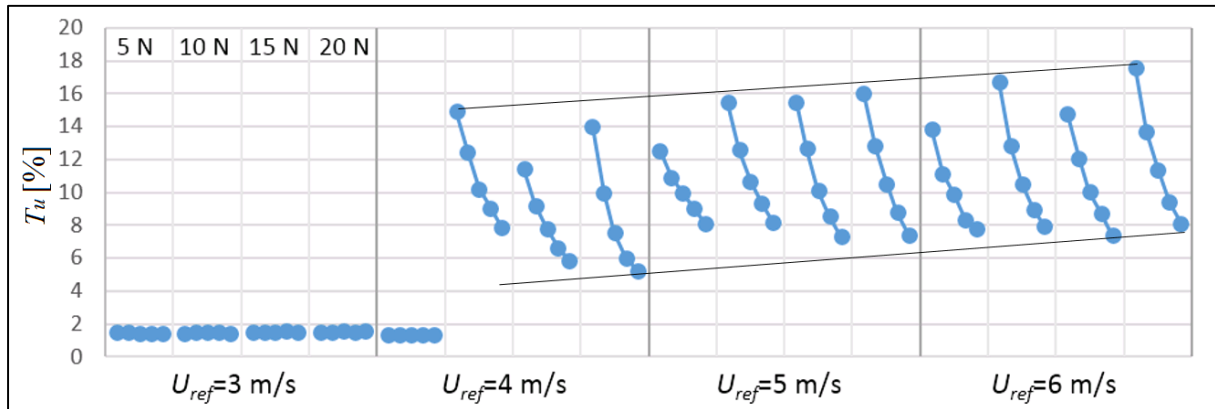


19. ábra Izotrópia-arány a vizsgált mérési esetekben.

Elsőként szembevetendő lehet, hogy passzív esetekben ($U_{ref}=3$ m/s) messze nem izotróp az áramlás (hasonlóan a 18. c.) ábrához). Ekkor ugyanis – feltételezésem szerint – a rács áramlásra gyakorolt hatása éppen olyan (áramlással párhuzamos lemezlapok), hogy az alapáramlásra merőleges, vízszintes irányú sebesség-ingadozásokat (v') csökkenti, így az izotrópia-arány (u'^2/v'^2) nagyobb értékű lesz a rács közelében. Ezzel szemben aktív esetben vélhetően éppen ellenkező folyamat játszódik le: a rezgő szalagok nagymértékben megnövelik az alapáramlásra merőleges sebességkomponens r.m.s. értékét (v'), így egy nagyobb értékkel lesz elosztva az u' komponens. Mivel a lokálisan megnövekedett értékű v' az áramlással tovahaladva

folyamatosan csökken, ezért fordulhat elő a 19. ábrán is megfigyelhető növekvő izotrópia-arány. Ez a tendencia éppen, hogy ellenkező irányú a szakirodalomban a passzív és a hagyományos aktív rácsok esetén publikáltakhoz viszonyítva. Azokban az esetekben ugyanis a rácsot követően egy egységnyitől nagyobb izotrópia-érték adódik, amely a ráctól való távolsággal együtt monoton csökken, s aszimptotikusan közelíti az egységnyi értéket (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974; Makita, 1991; Kang et al., 2003).

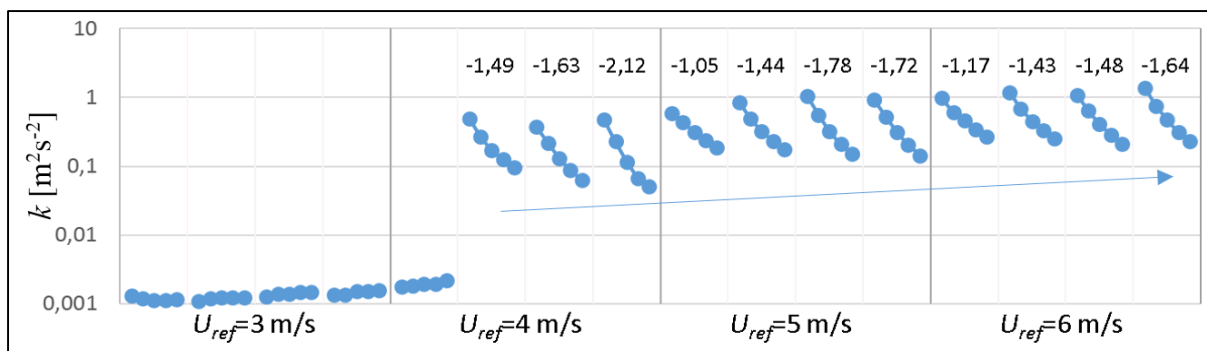
Az alapáramlás irányú turbulencia-intenzitás (T_u) a 20. ábrán figyelhető meg.



20. ábra A turbulencia-fok alakulása az egyes mérési eseteknél.

A diagram alapján számos megállapítás tehető. Elsőként jelentős különbség figyelhető meg a nem rezgő és a rezgő esetek között: a rács aktív állapotában jelentősen nagyobb értékű turbulencia-fok adódott a teljes vizsgálati x/M tartományon. Továbbá egy gyenge kapcsolat figyelhető meg a sebesség és a turbulenciafok között (enyhén emelkedő fekete egyenesek), mivel a sebesség növelésével jellemzően felfelé toldódnak el a görbék. Az állandó sebességen történő feszítőerő-változtatás azonban nem eredményezett egyértelmű változást. Az aktív eseteknél kapott görbék monoton csökkenőek, amely jelleg a rács turbulenciára jellemző. Passzív rácsok esetén az alapáramlás irányú turbulencia-fok $-5/7$ -es ($\approx -0,71$) kitevőjű hatványfüggvény szerint csökken a távolsággal (Roach, 1987), amelyet az általam vizsgált rács passzív állapota esetén nem tudtam kimutatni. Ezzel szemben a rács aktív állapotában a passzív rácsokra jellemző értéktől kisebb meredekséggel csökken a turbulencia-intenzitás: az egyes esetekhez tartozó görbékre fektetett hatványfüggvények esetén $-0,62 \div -0,26$ közötti hatványkitevőket kaptam.

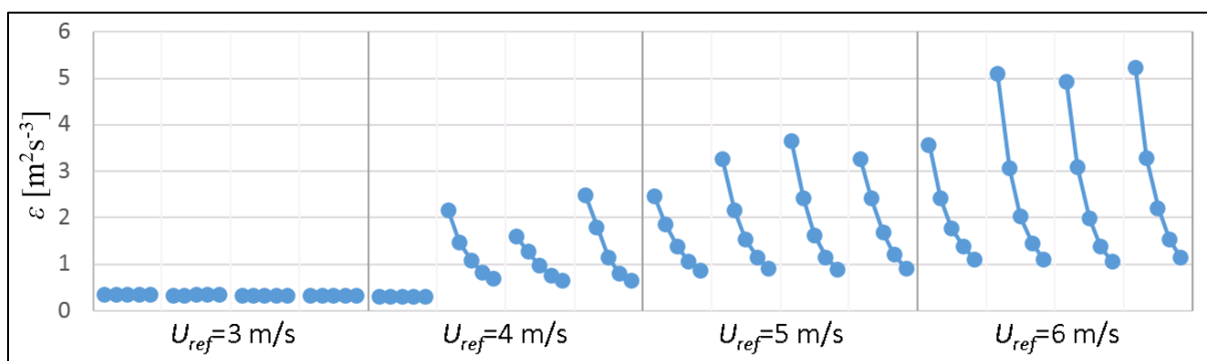
A turbulens kinetikus energia számításánál az alkalmazott 2 dimenziós mérés technika korlátai miatt lokális izotrópiát kellett feltételeznem, azaz, hogy az alapáramlásra merőleges két sebességkomponens r.m.s. értékei (v' és w') közel megegyezők. Ez a feltételezés a rács közelében nagyobb hibákat eredményez, hiszen annak környezetében a w' -höz képest megnövekedett v' szórással történő számolással túlbecsült turbulencia-eredmények várhatók. Az ilyen módon számított turbulens kinetikus energia értékek a 21. ábrán láthatók. Az ábra a turbulencia-fokhoz hasonló jellegű (ami a számítási összefüggésből adódik), azonban az összefüggés ez esetben tartalmazza a keresztirányú (v') szórásértéket is.



21. ábra A turbulens kinetikus energia alakulása az egyes mérési esetekben (lin-log skála). Számértékek: az aktív esetekhez tartozó görbékre illesztett hatványfüggvények kitevői.

Megfigyelhető, hogy a passzív esetekhez képest legalább két nagyságrenddel nagyobb értékek adódnak aktív állapot esetén, tehát az aktív rács számottevően képes megnövelni az áramlás turbulens kinetikus energiáját. Emellett az értékek közel monoton módon növekednek az áramlási sebességgel is, ami a sebességkomponensek szórásának növekedésére utal. Az adott sebességekhez tartozó különböző feszítőerőkkel kapott értékek között nem látható jelentős különbség, azonban a görbék meredeksége változik a feszítőerővel. Az ábra aktív eseteihez tartozó adatpontokra fektetett regressziós görbék (hatványfüggvények) hatványkitevői (a 21. ábrán a görbék felett) alapján elmondható, hogy egy esetet kivéve adott sebességen a feszítőerő növelése meredekebb görbét eredményezett, azaz a turbulens kinetikus energia térben gyorsabban csökkent.

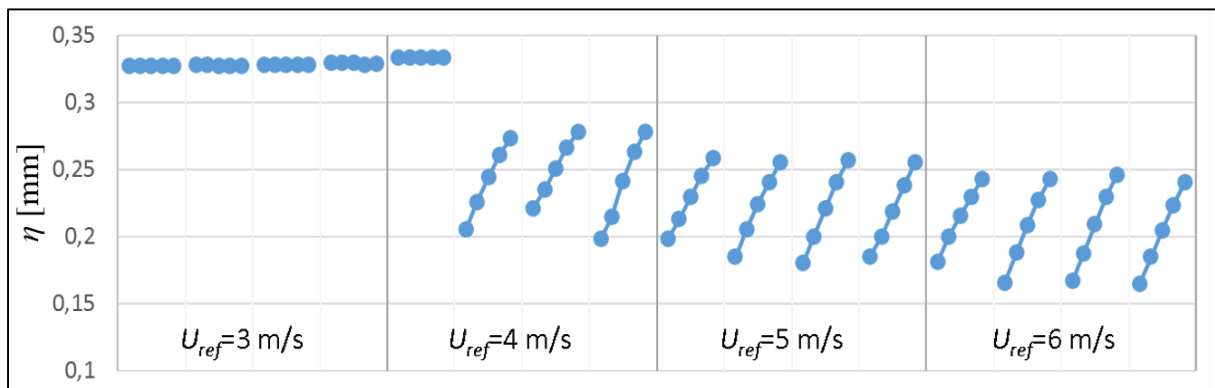
Ezen észrevételt a disszipációs ráta (ε) eredmények is megerősítették, amelyeket a 22. ábra szemléltet.



22. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának (ε) értékei az egyes mérési esetekben.

A disszipációs ráta értékek csakúgy, mint a turbulens kinetikus energia esetében, jelentősen megnőnek a rács aktív állapota esetén. Mivel passzív esetben igen gyenge a turbulencia, s lényegében a rács ekkor nincs rá hatással, ezért a disszipációs ráta értéke is közelíti a zérust. Azonban aktív esetben a rács által keltett igen erős energiájú turbulencia a szakirodalmi eredményekkel összhangban (pl. Kang et al., 2003) nagymértékben hal el a rács közelében, azonban ennek rátája folyamatosan csökken a távolság növekedésével. Mivel ε a turbulens kinetikus energia idő szerinti megváltozásának negáltjából adódik, ezért a kapott értékeknek hasonló tendenciát kell mutatniuk (s mutatnak is), mint a turbulens kinetikus energia (k) esetén, hiszen a pozíció (megtett út) és az idő között az átlagsebesség teremt – lineáris – kapcsolatot.

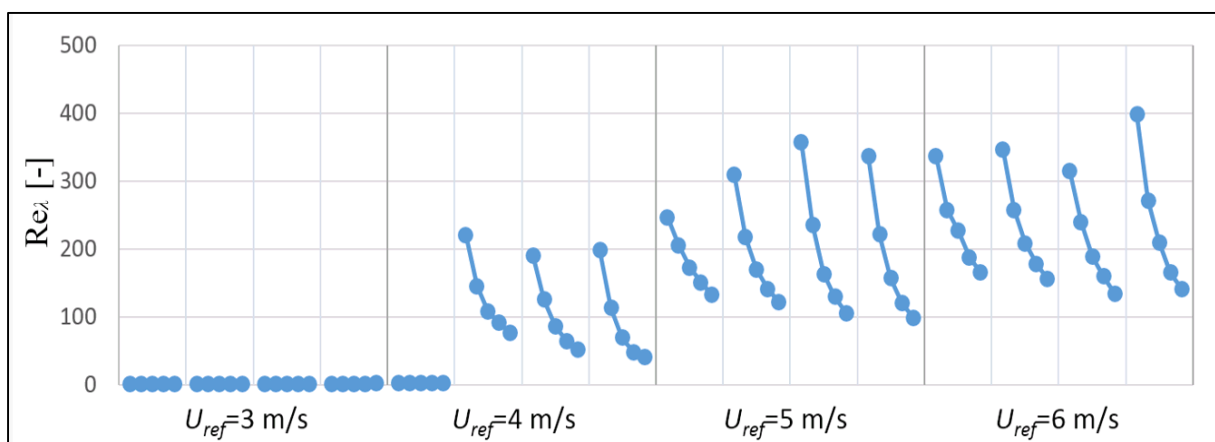
Az áramlásban jelenlévő legkisebb örvények mérete Kolmogorov (1890) szerint csupán két paramétertől, ε -tól és ν -tól függ. A Kolmogorov hosszskálára (η) passzív és az aktív esetekben kapott értékeket a 23. ábra szemlélteti.



23. ábra A Kolmogorov-hosszskála alakulása a vizsgált passzív és aktív esetekben.

Mivel a kiértékelés során állandó értékű kinematikai viszkozitással számoltam, ezért a Kolmogorov-hosszskála változása csupán a disszipációs ráta függvénye. Megfigyelhető, hogy passzív esetben közel állandó értékek adódtak, s ezek nagyobbak, mint az aktív esetben számított értékek. Passzív rácsoknál a szakirodalom is nagyobb értékeket találtam: Comte-Bellot & Corrsin (1966) $\eta=0,29$ mm-es értéket, Makita (1991) pedig $\eta=0,65$ mm-t publikált. Aktív rácsok esetén rendre kisebb értékek adódnak: például Makita (1991) a rács aktiválása után $\eta=0,21$ -es értéket tett közzé. Ezeken túlmenően megfigyelhető, hogy a sebesség növelésével aktív esetekben η csökkenő tendenciát mutat. Ez szintén többek által igazolt jelenség (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974; Kurian & Fransson, 2009; Larssen & Devenport, 2002).

A turbulencia leírásának további fontos skalár paramétere a Taylor-Reynolds szám (Re_λ). Ez a mennyiség, ahogy azt már korábban kifejtettem – hasonlóan a klasszikus értelemben vett Reynolds-számhoz – a tehetetlenségi és a súrlódási erők arányát fejezi ki. Ennek jellemző értéke passzív rácsok esetében százaz nagyságrendben mozog, de erősen függ a szélcsatorna méretétől s az áramlás sebességétől is. A szalag-rács esetében mért Taylor-Reynolds szám értékeket a 24. ábra szemlélteti.

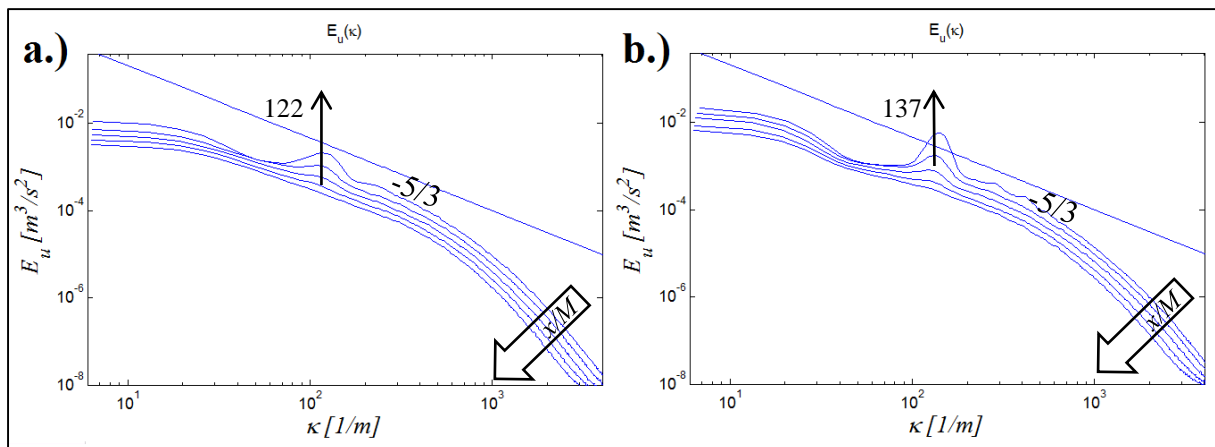


24. ábra A Taylor-Reynolds szám alakulása az egyes mérési esetekben.

Az ábrán megfigyelhető, hogy a passzív állapot esetén (főként a kis értékű turbulens kinetikus energia miatt) közel zérus értékek adódtak. Ezzel szemben rezgő rácsok esetén jelentős növekedés látható, amely (egy adatsor-pár kivételével) az átlagsebességgel együtt növekvő tendenciát mutat. Ez szintén összhangban áll a turbulens kinetikus energia alakulásával. Tehát összességében elmondható, hogy az aktív ráccsal sikerült jelentősen növelni a turbulenciát: igen alacsony sebességen, egy kisméretű szélcsatornában több esetben is néhány százás értékű Taylor-Reynolds számot sikerült elérni az aktív ráccsal.

A turbulenciát leíró skaláris mennyiségek mellett a különböző skálájú turbulens örvények energiájának spektrális eloszlását is vizsgáltam. Ennek során meghatároztam – a szakirodalom által preferált, alapáramlás irányú pillanatnyi sebességkomponens (u) fluktuációjából adódó – spektrális teljesítménysűrűségeket ($E_u(\kappa)$), azaz a turbulenciára jellemző energiadiagramokat. Ezekhez – ahogy azt már bemutattam – a MATLAB *psd* függvényét alkalmaztam. A szalagrács esetében csupán az aktív állapotokhoz tartozó spektrumokat határoztam meg, mivel passzív esetben a kismértékű turbulens kinetikus energia (21. ábra) miatt a spektrális eloszlás jelentős relatív hibát tartalmazott. Az aktív esetekhez tartozó spektrumok alapján azonban számos, a turbulencia leírása szempontjából igen fontos észrevételt tettem (Szászák et al., 2016; Szászák et al., 2017a,c,d).

A 25. ábrán látható diagramok állandó, $U_{ref}=5$ m/s és $F=10$ N (a.), továbbá $U_{ref}=6$ m/s és $F=20$ N (b.) feszítőerő esetén szemléltetik a spektrális energia-eloszlást ($E_u(\kappa)$) a rácstól mért $x/M=10, 15, 20, 25, 30$ távolságokban.

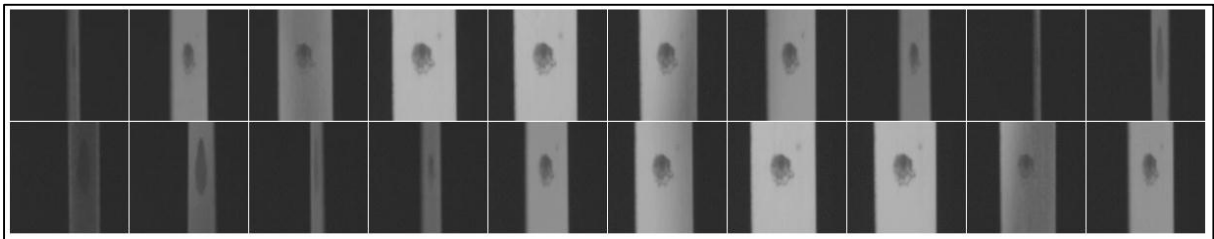


25. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok, és a $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbék. a.) $U_{ref}=5$ m/s és $F=10$ N feszítőerő esetén; b.) $U_{ref}=6$ m/s és $F=20$ N feszítőerő esetén. Mindkét esetben $x/M=10-15-20-25-30$ helyen, a középvonalban mért eredmények. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.

Mindkét diagram esetében megfigyelhető, hogy hasonló jellegűek a megfelelő görbék: a rácshoz közel mindkét mérési esetben jóval nagyobb a görbék alatti terület, amely a távolsággal együtt monoton csökken. Ennek oka az, hogy definíció szerint a görbe alatti terület arányos a turbulens kinetikus energiával, s a rácsturbulencia elhaló turbulencia, a távolsággal együtt csökken (lásd: 21. ábra). Továbbá jól észrevehető, hogy mindkét bemutatott esetben a rácshoz közeli görbék lokális maximummal rendelkeznek, amely maximumok a távolsággal együtt eltűnnek. Mindkét diagramon a rácstól mért nagyobb távolságok esetén megfigyelhető egy, az elméleti $-5/3$ -os kitevőjű hatványfüggvénnyel közel párhuzamos szakasz (log-log skála!), amelyet Kolmogorov alapján tehetetlenségi tartománynak nevezünk, s minden kifejtett

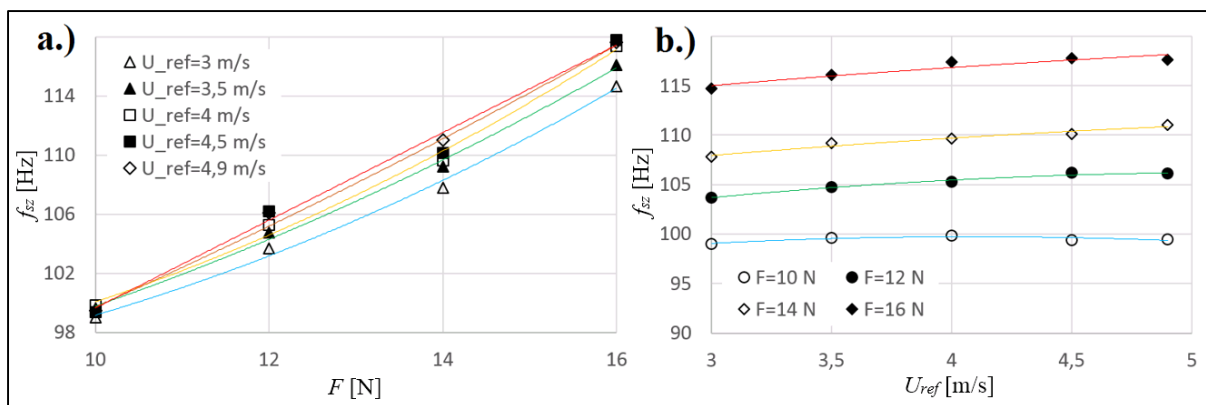
turbulencia esetén kimutatható ennek jelenléte. Azonban a kisebb távolsághoz tartó görbék esetén ezt a szakaszt megtöri a lokális maximum környezetében kialakuló púp, amelyhez tartozó hullámszám (κ) értéket a két diagramon jelöltem. Látható, hogy a lokális maximumhoz tartozó hullámszám nem változik számottevően a különböző x/M pozíciókhoz tartozó görbék esetén. A lokális maximumok megjelenésének fontos szerepe az, hogy a rezgő szalag által keltett turbulenciában a vizsgált x/M tartomány nagy részén jelen van egy olyan hullámszám (örvényméret) tartomány, amely az elméleti tendenciához képest (7. ábra) nagyobb energiával rendelkezik.

Így jogosan merült fel az a gondolat, hogy ez a jelenség a rács rezgésével szoros összefüggésben állhat. Ezért olyan vizsgálatot is el kellett végezni, amelyek segítségével meghatározhattam az aktív szalagok rezgésének frekvenciáját, továbbá azt, hogy ez milyen kapcsolatban áll a feszítőerővel és az áramlási átlagsebességgel. E vizsgálatokhoz a nagysebességű kamerát alkalmaztam: adott beállítások esetén képsorozatot (1280×240 pixel, $f_k=4489$ Hz) rögzítettem a rezgő szalagokról (négy szomszédos szalagot vizsgáltam), amely képsorokat aztán a MATLAB-ban általam erre a célra készített script segítségével dolgoztam fel (a rezgő szalagok okozta periodikus jellegű fényerősség-változáson alapult a feldolgozás). Az egyik vizsgált rezgő szalag egy rövid szeletének időben egymást követő pillanatképeit mutatja a 26. ábra, amely alapján egyértelműen látható, hogy a rezgőmozgás a szalag hossz tengelye körüli periodikus elcsavarodás.



26. ábra Az egyik rezgő szalag kamerával rögzített, időben egymást követő pillanatképei (olvasási rendben).

A MATLAB script segítségével eredményként egy-egy videó feldolgozásából megkaptam a négy, vizsgált szalag rezgési frekvenciáját. Összesen öt különböző referenciasebességen ($U_{ref}=3,5-4-4,5-4,9$ m/s) és négy feszítőerő esetén ($F=10-12-14-16$ N) készítettem felvételeket. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az azonos névleges feszítettségű szalagok közel azonos frekvencián rezegnek egy-egy mérési esetben. Az egyes esetek szórásai csupán 0÷3 Hz intervallumban mozogtak, miközben az egy-egy méréshez tartozó átlagos frekvencia 99÷118 Hz tartományban helyezkedett el. A kapott átlagos frekvenciaértékeket mind a feszítőerő (a.), mind pedig a referenciasebesség (b.) függvényében szemlélteti a 27. ábra.

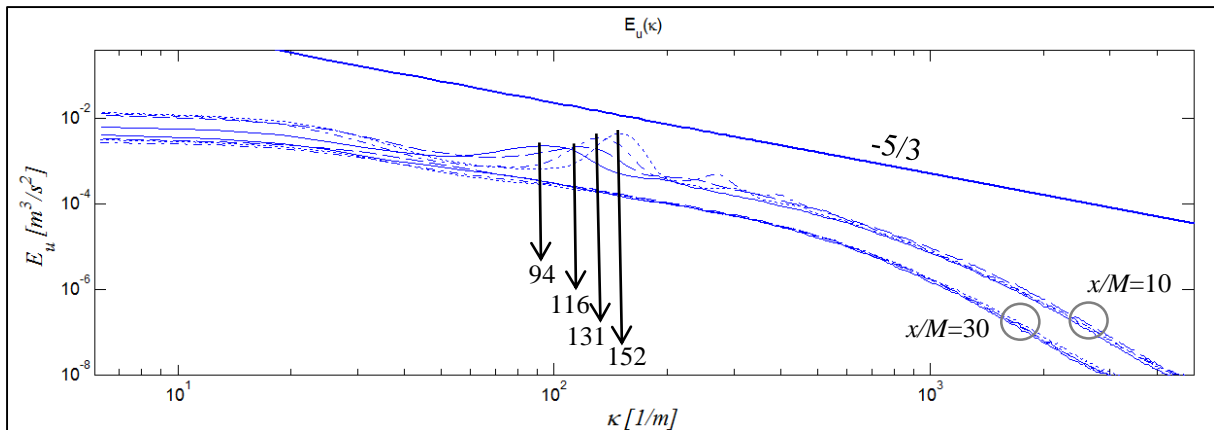


27. ábra A szalagok rezgési frekvenciái (f_{sz}): a.) a rezgési frekvencia a feszítőerő függvényében, állandó U_{ref} esetén; b.) a rezgési frekvencia a referenciasebesség függvényében, állandó F esetén. Jelmagyarázat a diagramokon található.

A 27. ábra alapján megállapítható, hogy a szalagok rezgési frekvenciája mind az áramlás átlagsebességétől, mind pedig a feszítőerő nagyságától függ. Látható, hogy a vizsgált feszítőerő-tartományban az erővel együtt jelentős mértékben, monoton növekedett f_{sz} minden referenciasebesség esetén (27 a.) ábra), tehát egy erős kapcsolat mutatható ki a két mennyiség között. Emellett a 27 b.) diagram alapján is elmondható, hogy adott feszítőerő esetén az átlagsebesség növekedése hatására kis mértékben a frekvencia is növekszik, habár ez a kapcsolat jóval gyengébbnek mondható ($F=10$ N esetén nem is mutatható ki tendencia).

Az előzőekben bemutatott, a rezgő szalagok frekvenciájának a feszítőerőtől és az áramlási átlagsebességtől való függésének ismerete alapján már további megállapítások tehetők az energiadiagramok (25. ábra) tekintetében. A 25 a.) diagramon a lokális maximum $\kappa=122$ 1/m értéknél adódott. Ahhoz, hogy ezt összevethessük a szalagok rezgési frekvenciájával, a hullámszám definícióját ($\kappa = 2\pi f / U_{ref}$) kell felhasználnunk. Ezt átalakítva kapjuk az $f = \kappa U_{ref} / (2\pi)$ összefüggést. Ez alapján a $\kappa=122$ 1/m-es érték $U_{ref}=5$ m/s esetén $f=97,1$ Hz-es frekvenciának felel meg. Ez az érték azonban igen közel esik a szalagok rezgési frekvenciáját bemutató 27 a.) ábrán az $U_{ref}=4,9$ m/s és $F=10$ N esetén számolt ≈ 99 Hz-es értékhez. A jobb oldali energiadiagramon kapott lokális csúcs értéke ($\kappa=137$ 1/m) alapján $f=130,8$ Hz adódik. Ezt azonban a rezgésvizsgálat eredményeivel nem lehet egzaktul összevetni, mivel a rezgésvizsgálat esetén nem volt vizsgálva sem ekkora feszítőerő, sem pedig ekkora áramlási sebesség. Azonban a 27 a.) diagram jellege alapján, annak extrapolációjával hasonló érték adódik: 4,9 m/s és 20N-os feszítőerő esetén 129,3 Hz-es extrapolált értéket számoltam. Így tehát megállapítható, hogy rezgő szalagok esetén a kialakult turbulencia energiaspektrumában látható lokális maximum a szalagok rezgési frekvenciájának a következménye.

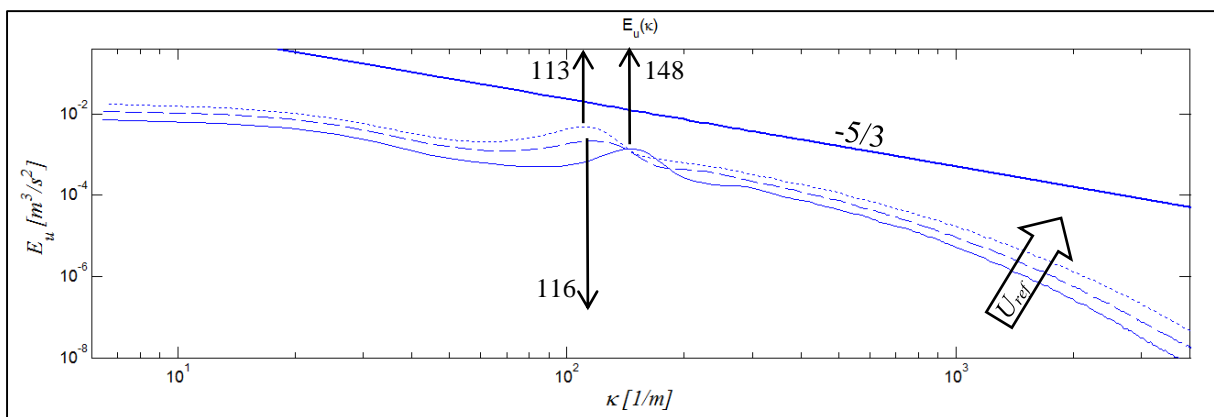
Folytatva a turbulencia spektrális elemzését, a 28. ábra egyrészt a feszítőerőnek a spektrumra gyakorolt hatását, másrészt pedig a távolság hatását kívánja bemutatni $U_{ref}=5$ m/s esetén.



28. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok $U_{ref}=5$ m/s esetén $x/M=10$ és $x/M=30$ pozíciókban, továbbá a $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbe. Ez esetben a feszítőerő volt variálva. Jelmagyarázat: '—' $F=5$ N; '---' $F=10$ N; '- · - ·' $F=15$ N; '· · · ·' $F=20$ N. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.

Az ábra alapján megállapítható, hogy a feszítés erejétől függetlenül $x/M=30$ távolságban már elenyésző az egyes esetek közötti különbség, s itt mind a négy variációnál kialakul az elméleti $-5/3$ -os görbével párhuzamos szakasz. Ettől eltérően azonban $x/M=10$ esetén látható, hogy nem alakul ki párhuzamos görbe-rész, aminek oka a megjelenő púp lehet. A lokális maximumok mindegyik feszítőerő esetén máshol jelennek meg: nagyobb feszítőerő nagyobb hullámszámnál megjelenő csúcsot okoz. Ebben az esetben is összevethetők a megjelenő csúcsokhoz tartozó hullámszámokból számolt frekvenciák a szalagok megfelelő esethez tartozó rezgési frekvenciáival. A hullámszámokból kalkulált frekvenciák rendre: $f=75$; 92 ; 104 ; 121 Hz. A $4,9$ m/s sebességen végzett rezgésmérésből $F=10$ N esetén $99,5$ Hz; $F=14$ N esetén pedig 111 Hz adódott, amely értékek jellemzően közel vannak a spektrumból számított adatokhoz. A különbség okozója feltételezhetően a mérések esetén beállított eltérő referenciasebesség ($U_{ref}=4,9$ m/s 5 m/s helyett) s feszítőerő ($F=14$ N az itteni 15 N helyett).

Az előzőekben bemutatott energiaspektrumok mellett azt is megvizsgáltam, hogy egy állandó feszítőerő ($F=10$ N) esetén miként változik a spektrum alakja különböző áramlási sebességeken ($U_{ref}=4-5-6$ m/s), azonban egy adott pozícióban ($x/M=10$). E variációt a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok $F=10$ N feszítőerő esetén, $x/M=10$ pozícióban, továbbá a $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbe. Jelmagyarázat: '—' $U_{ref}=4$ m/s; '---' $U_{ref}=5$ m/s; '- · - ·' $U_{ref}=6$ m/s. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.

A diagram alapján egyrészt igazolható, hogy nagyobb áramlási sebességek rendre nagyobb turbulens kinetikus energiájú áramlást hoztak létre (ahogy az a 7. ábrán is látható): a növekvő sebességgel együtt nagyobb területek mérhetők az egyes görbék alatt. Emellett adott feszítőerő esetén a sebesség növekedésével együtt csökken a lokális maximumhoz tartozó hullámszám értéke. Az $U_{ref}=4$ m/s sebességhez $\kappa=148$ 1/m tartozik, ami alapján $f=94,2$ Hz. Ezt összevetve a 27. ábra ennek megfelelő $f_{sz}=99$ Hz-es értékével kisebb, mint 5%-os relatív eltérés adódik.

Az e fejezet részben bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy a rezgő elemeket tartalmazó szalag-rács jelentős mértékű turbulenciát tud létrehozni alacsony áramlási sebességek esetén is. A kisméretű szélcsatornában több esetben is sikerült $Re_\lambda=300$ -as Taylor-Reynolds számtól nagyobb értékű turbulenciát előállítani, amely jelentős növekedésnek tekinthető. A vizsgált rács felépítéséből adódóan azonban a rács után több, mint $10M$ távolságban is jelentős anizotrópiát mértem, amely miatt a vizsgált tartománytól nagyobb távolságokban is ($x/M>30$) szükséges lett volna méréseket végezni, azonban a szélcsatorna dimenziói ezt nem tették lehetővé. Fontos észrevétel az, hogy a rácsok rezgési frekvenciája jelentős hatással van a turbulencia energiaspektrumára, amely a szakirodalmi eredményektől eltérően a spektrum-görbék tehetetlenségi szakaszán egy lokális maximumot eredményez. Ez az eltérés azonban a távolság növelésével csökken, $x/M=30$ esetén már elhanyagolható mértékű.

8. PRÉSLEVEGŐVEL MŰKÖDTETETT AKTÍV-RÁCS ÖSSZEÁLLÍTÁSA, LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

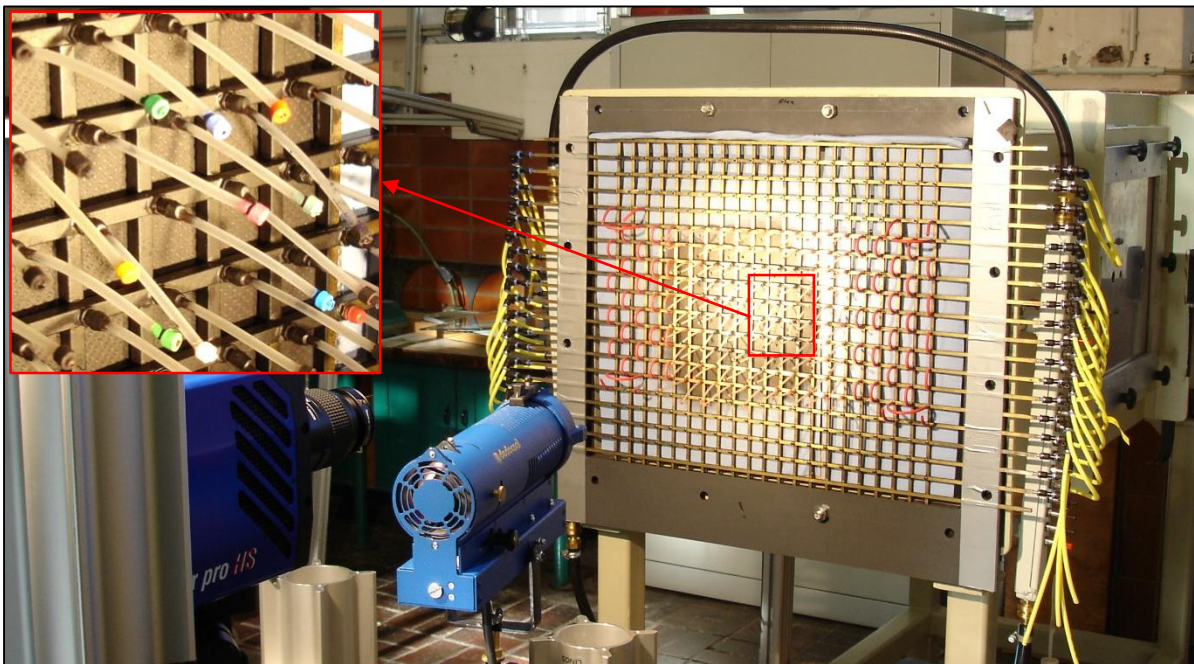
A szalag-rács kísérletek mellett doktori kutatómunkám jelentős részében a flexibilis csövecskéket tartalmazó légsugár-rács vizsgálatával is foglalkoztam. Többek között a rács aktív elemeinek mozgási jellegét, a rács által létrehozott turbulencia jellemzőit, továbbá a segítségével elérhető intenzív keveredést is vizsgáltam. E kutatásaimhoz mindig az adott feladatnak megfelelő mérés technikát alkalmaztam: CTA-t, nagysebességű kamerát, továbbá hőkamerát. Ebben a fejezetben részletesen bemutatom a nagysebességű kamerákkal készített vizsgálatokat s azok eredményeit (mind Magdeburgban, mind pedig Miskolcon végzett kísérletek); ezt követően a Miskolcon elvégzett CTA vizsgálatokat s azok eredményeit ismertetem; továbbá a rács által keltett turbulenciának különböző hőmérsékletű gázok keveredésének vizsgálatát s ennek eredményeit mutatom be.

A prototípus rács pozitív eredményei alapján (Szaszák, 2012; Szaszák et al., 2012a) Magdeburgban elkészítettek egy szélcsatornába is beépíthető sugár-rácsot. Ez a prototípussal megegyező rácsparaméterrel ($M=25$ mm) úgyszintén négyszög keresztmetszetű ($D=5$ mm oldalhosszúságú), 0,45 mm-es falvastagságú üreges rácselemekből lett összeállítva. E rács azonban a prototípustól lényegesen nagyobb, összesen 20×21 rácselemből készült el. Így a rácsfelület (a keretet nem beleszámítva) több, mint 500×500 mm-es méretével alkalmas volt a magdeburgi szélcsatorna mellett a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék laboratóriumában található Göttingen-típusú szélcsatornába történő beépítésre is. Az elkészített rács kitöltési tényezője $\sigma=0,36$ -ra adódott, amely érték jóval a $\sigma=0,5$ -es érték alatt van, ezzel teljesítve az ide vonatkozó szakirodalmi ajánlást (Villermaux et al., 1991), miszerint $\sigma=0,5$ környezetében, s attól nagyobb értékeknél a rácson áthaladó áramlás inhomogénné válik. A rácspontokba épített csatlakozóelemekre lettek rögzítve az aktiválható elemek, azaz a szilikoncsövek. A rács vízszintes rácselemeinek mindkét vége rugalmas pneumatikai csövekkel egy-egy levegőosztó-elembe csatlakozott, amelyek alsó és felső végükön is el voltak látva 1 collos csatlakozóelemekkel a minél szimmetrikusabb légbevezetés érdekében. A

rácspontokra elsőként, a nagysebességű kamerás mérések idején a diplomamunkám alapján legjobbnak ítélt aktívelem-variáció lett rögzítve, azonban a későbbi vizsgálatok során attól eltérő dimenziókkal rendelkező elemek kerültek alkalmazásra, azok előnyösebb tulajdonságai miatt.

8.1. Az aktív elemek kinematikájának vizsgálata Magdeburgban

Az első mérések során aktív elemek gyanánt a diplomamunkám alapján legjobbnak talált paraméterű szilikoncsövek lettek a minden egyes rácsponthoz illesztve. Ezek $d_i=2$ mm belső és $d_o=2,6$ mm külső átmérővel rendelkeztek, s aktív hosszuk $l_a=55$ mm volt. Fontos továbbá, hogy a szilikoncsövek mozgó végére a tehetetlenségük – s ilyen módon a mozgásjellemzőik – növelése céljából extra csövecskék lettek felerősítve (3 mm hosszú, 4 mm külső átmérőjű, 1 mm-es falvastagságú). A korábbi vizsgálataim során azt találtam, hogy az extra súllyal szerelt elemek kisebb nyomású préslevegő esetén jöttek mozgásba, mint a rászertelt tömeg nélküli variáció. Ezért az első, a rácselemek mozgásának vizsgálatát célzó gyorskamerás kísérletek is ezzel a rácsozszeállítással kerültek végrehajtásra. A szélcsatorna-szakaszra épített s nagysebességű kamerával vizsgált rácsozszeállítás a 30. ábrán látható.

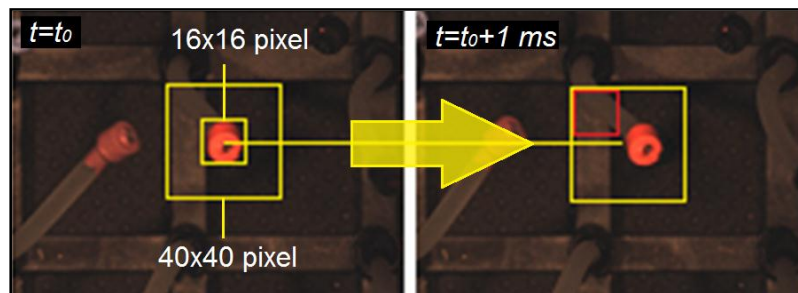


30. ábra Az első gyorskamera-vizsgálatokhoz összeállított rácsozszeállítás.

Mivel a mérések során még nem állt rendelkezésre olyan kapacitású sűrítettlevegő-hálózat, amely megfelelő mennyiségű préslevegőt tudott volna előállítani a teljes rácsozszeállítás (összesen 387 aktív elem) működtetéséhez, továbbá – mérés-technikai szempontok okán – összesen 3×3 db csövecské mozgását kívántuk vizsgálni, ezért csupán a rácsozszeállítás középső, 10×11, egymással szomszédos rácspontja lett aktív elemekkel ellátva, s sűrített levegővel működtetve. A mérések *LaVision VC-Imager Pro HS 4M* típusú kamerával történtek, továbbá a képsorokat MATLAB programmal dolgoztam fel (Blanchet & Charbit (2006) könyvét felhasználva). A mérésről s annak eredményeiről részletesen Szaszák et al. (2014) folyóiratcikkben számoltunk be.

Az aktív elemek mozgásának vizsgálata a csővégek mozgásának megfigyelésével történt. A kamerás mérés technikával a mozgó végpontoknak a rács síkjával párhuzamos elmozdulásait tudtuk detektálni, az erre a síkra merőleges mozgások nem képezték vizsgálat tárgyát. Ilyen módon a mozgó elemek vizsgálatához úgy kellett megválasztani a képkészítés gyakoriságát (Δt_k), hogy az egyes képpárokon látható végpontok között csupán néhány pixeles elmozdulás legyen mérhető. Az előzetes mérések alapján az $f_k=1\text{kHz}$ -es érték megfelelően gyakori képkészítési rátának adódott. A beállított frekvencián egy-egy mérési sorozatban 1 s ideig történt a felvételkészítés, amely eredményeként 1000 db. bitmap típusú, 24 bites színmélységű képet rögzített a kamera. E képeket aztán a MATLAB-ban írt scripttel dolgoztam fel, amelynek működése összefoglalva a következő.

Ahhoz, hogy a vizsgált, összesen 9 darab cső mozgását szoftveresen is meg lehessen különböztetni, mindegyik esetében a végükön található extra csővecske különböző színt kapott. Ennek segítségével a programban különböző R-G-B (red-green-blue) színtartományokat tudtam megadni, ami alapján a kereső algoritmus azonosította az adott színű csővég pozícióját. A program futásának gyorsítását olyan módon sikerült elérni, hogy a kereső algoritmusnak mindössze az első képkockán kellett lefutnia a teljes képen. Mivel a képfelvétel megfelelő gyakorisága miatt csupán néhány pixel elmozdulás volt várható a szomszédos képkockák között, ezért az első képen beazonosított színhalmazok jellemző pozícióit a következő képeken csupán az előző pozíció környezetében (általában választott, 40×40 pixeles) kellett keresni. Így tehát nagymértékben tudtam csökkenteni a program futási idejét. A kereső algoritmus működését szemlélteti a 31. ábra.

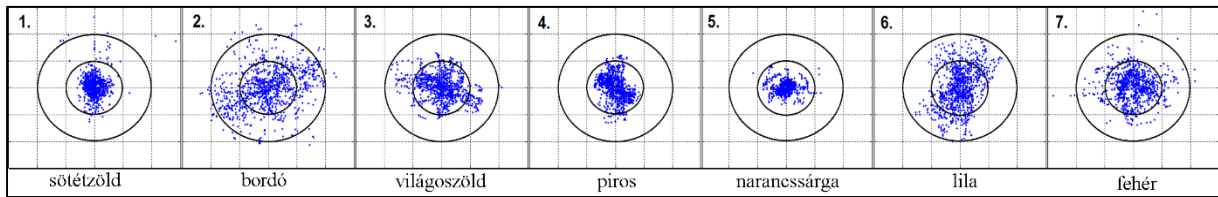


31. ábra A bordó csővég t időpillanatbeli pozíciójának keresése a t_0 idején készített képen lévő pozícióhoz képest. Sárga keret: a keresési intervallum, piros keret: bordó pixeleket számláló, soronként és oszloponként pixelről pixelre végigszaladó keresőablak (Szaszák et al., 2014).

Ezt az algoritmust a későbbi tapasztalatok alapján a kilencből hét szín esetében lehetett alkalmazni (két-két szín esetén az R, G, B tartományok részben fedték egymást), amelyeknél így tehát megkaptam az egyes csővégek pixel-pozícióját a képkockák sorszámának függvényében. Fontos megemlíteni, hogy a csővégek jellemző pozíciója (pixelpár) a kereső algoritmus által talált legtöbb, az adott színnek megfelelő pixelt tartalmazó keresőnégyzet középpontjának felelt meg. Az egyik kép alapján kiszámolt térbeli felbontással (pixel/mm aránnyal) a pixel-pozíciót fizikai pozícióba (y_{cs} , z_{cs}) számoltam át, továbbá a képkészítési frekvencia alapján az egy-egy kép közötti időtávval megkaptam a vizsgált elemek pozíció-idő függvényeit. A feldolgozás során adódtak a trendből kilógó, hibás értékek is (például beárnyékolás miatt), amely hibák korrekciójához a legkisebb négyzetek módszerén alapuló „smooth” simítófüggvényt alkalmaztam.

A program további részében a függvények feldolgozása, s különböző diagramokkal történő szemléltetése történt meg. Elsőként az egymást követő képpárok esetén a csővégek közötti

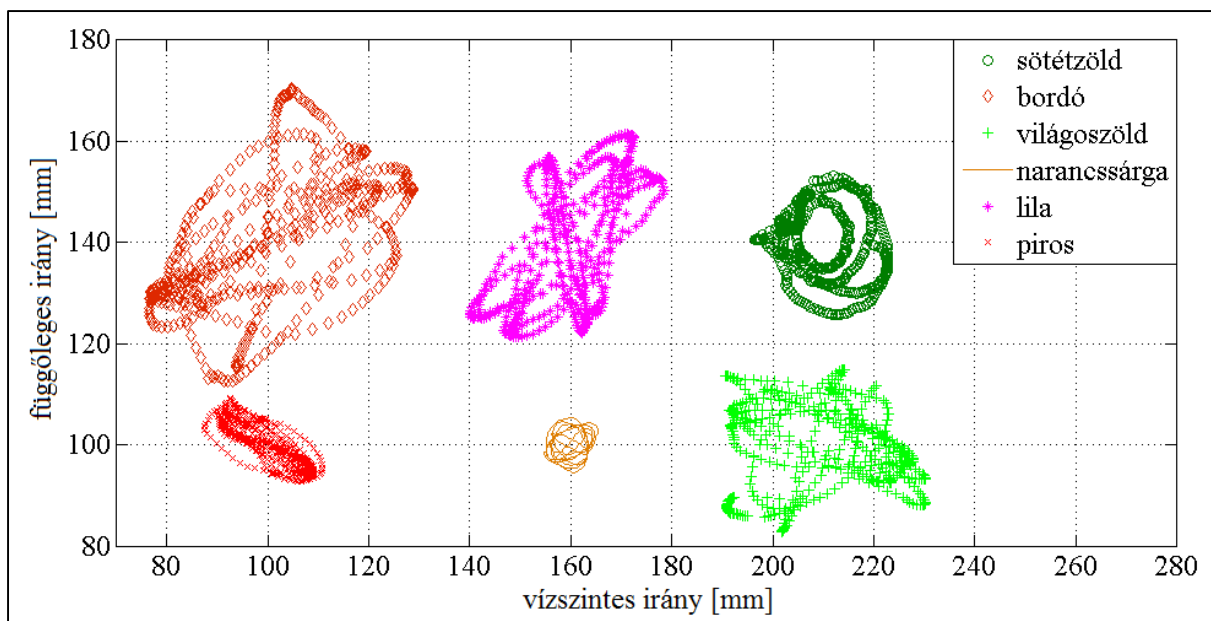
pozíció-eltérést vizsgáltam (tehát azt, hogy Δt_k idő alatt mennyi pixelt mozdul el a csővég y és z irányban), mivel ez többek között információval szolgál az adott csővég jellemző sebességértékeire (32. ábra).



32. ábra A vizsgált csővégek pixel-elmozdulásai egy-egy képkocka között. A rács osztása 5 pixelnek felel meg. (Szaszák et al., 2014)

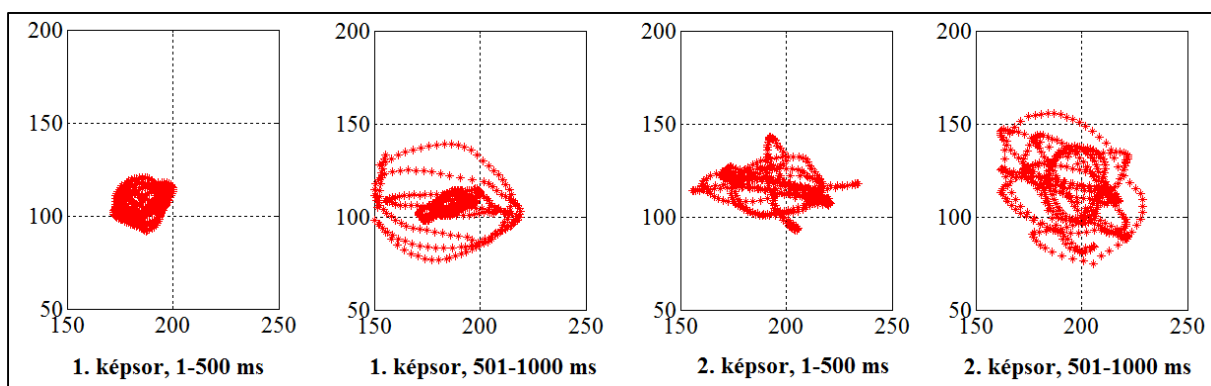
Az ábra alapján látható, hogy például a narancssárga csővég (5.) elmozdulása a vizsgálat idején 5 pixelen belül maradt (négy pont kivételével), tehát viszonylag kis sebességgel mozgott. Ehhez képest a bordó vagy a lila színű csővégek jóval nagyobb, sok esetben 5 pixeltől nagyobb elmozdulást produkáltak, amely nagyobb sebességre utal. E megállapítást a képsorozatból készült videofelvétel is igazolta.

Amennyiben a fizikai pozíciókat a mozgás síkjában (y-z) ábrázoljuk, úgy megkapjuk az egyes csővégek által a felvétel idején leírt pályagörbéket. 500 ms-os felvételi idő alatt, hat különböző színű csővég mozgásának vetületi pályáját mutatja a 33. ábra. Az ábra alapján látható, hogy összefüggés mutatkozik az elmozdulás, tehát a sebesség és a nyomvonal kiterjedtsége között: kis pixel-elmozdulásokhoz (32. ábra) rendre kisebb bejárt terület tartozik, tehát a mozgó csővég kisebb mértékű kitéréseket produkál, mint a nagyobb sebességgel mozgó elem. Ennek a magyarázata abban kereshető, hogy a nagyobb mértékben kitérő elemekre a belőlük kiáramló levegő által ható impulzuserőnek nagyobb a vizsgált síkkal párhuzamos komponense, tehát ilyen módon jobban gyorsítja a csővéget a síkkal párhuzamos irányban. Ebből adódóan nagyobb maximális sebességet is elérhetnek ezek a csővégek. Ez továbbá megfigyelhető a 33. ábrán például a bordó vagy a lila színű csővégeknél is, ahol a befutott pályák által meghatározott terület közepe környezetében nagyobb távolságok adódnak az egyes pályapontok között (Δt_k időköz állandó értékű, így ez nagyobb sebességet jelent).



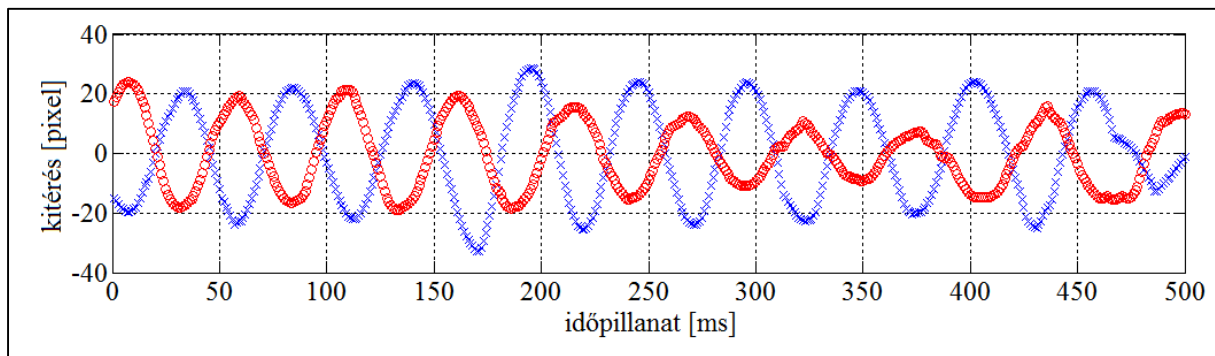
33. ábra Hat különböző színű csővég által bejárt pályák arányos nyomvonalai a 0÷500 ms időintervallumban. Az egyes pályák a jobb áttekinthetőség miatt alkalmasan el lettek tolvá.

A 33 ábra alapján azonban még egy, igen fontos megállapítás is tehető: a felrajzolt pályagörbék mindegyik vizsgált csővég esetében elliptikus jellegűek, azonban több csővég esetén is megfigyelhető, hogy az ellipszis tengelyei elfordulnak a vizsgált intervallumban. Ennek magyarázatát egyrészt az egymás irányába légsugarakat kilövellő csövek kölcsönhatásában kereshetjük, továbbá – miként azt a geometriai jellemzők lehetővé tették – a mozgó csövek számos esetben ütköznek, ami okán pályájuk igen rövid idő alatt megváltozik. Ebből adódóan arra is kerestem a választ, hogy milyen pályagörbe-eltérések mutatkoznak egy-egy adott csővégnél, ha a vizsgált időszávot változtatom. Mivel a 0÷500 ms időtartományban a narancssárga színű csővég közel állandó irányultságú ellipszis alakú pályákat futott be, ezért megvizsgáltam, hogy változik-e ez a pálya későbbi időtartományokban. A 34. ábrán látható, hogy ugyanaz a csővég más és más pályákat jár be adott, de különböző időpontoktól vizsgált időintervallumokban, így feltételezhető, hogy elegendő idő alatt a fizikailag lehetséges pályaterületen belül minden pontot érint.



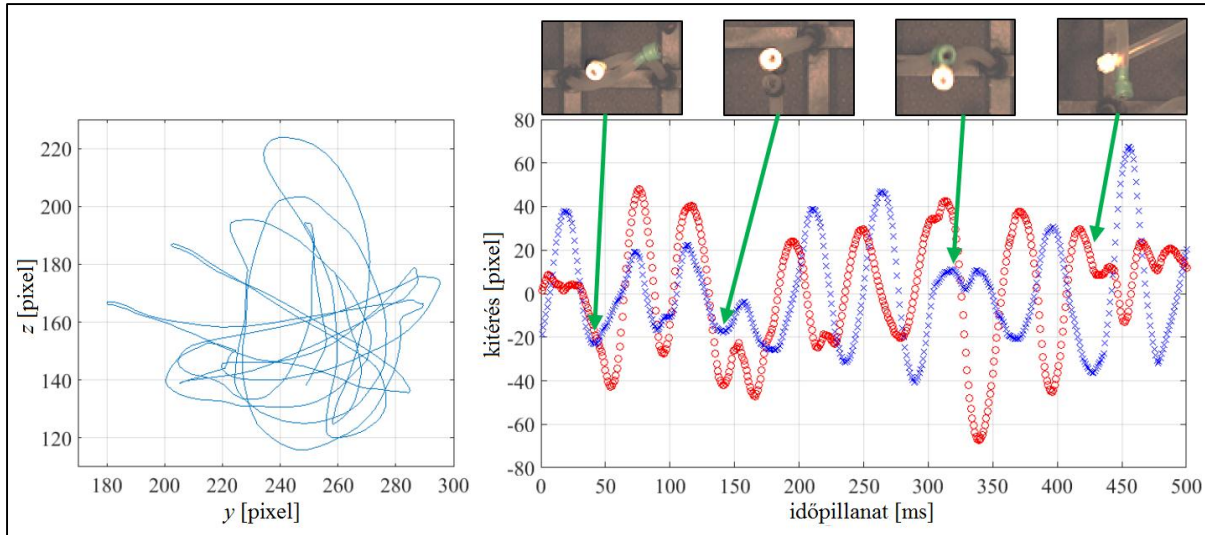
34. ábra A narancssárga csővég pályáformái különböző időintervallumokban (a vízszintes és függőleges koordináták mm-ben)

Mivel az elliptikus jellegű pályagörbék alapján felvetődik a periodikus mozgásjelleg, ezért ennek vizsgálatával részletesebben is foglalkoztam. A 33. ábrán látható piros színű csővéghez tartozó pályagörbe mutatja a leginkább periodikus jelleget, ezért ennek a pozíció-idősora alapján további megállapításokat tehettem. A vízszintes (y) és a függőleges (z) irányú pozíciók idősoraiból kivontam azok átlagértékét, így az átlagos pozícióhoz képesti elmozdulásokat tudtam megvizsgálni. Külön-külön, az idő függvényében, 1÷500 ms-os intervallumban ábrázolva az y és a z irányú eltérés a 35. ábrán tekinthető meg. Látható, hogy mindkét irányú kitérés közel azonos frekvenciájú (azonos számú teljes periódus figyelhető meg mindkét görbénél), amely esetben az ellipszis alakú pálya tengelyei nem fordulnak el. Azonban az amplitúdók egyik elmozdulás esetében sem állandóak az idő függvényében, ezért változik a pálya nyomvonala, az átlagos helyzettől való kitérés is (33. ábra).



35. ábra A piros csővég átlagos pozíciójához viszonyított y és z irányú kitérései az idő függvényében, 0÷500 ms időintervallumban. Jelmagyarázat: vízszintes irányú kitérés: ○; függőleges irányú kitérés: ×.

A bemutatott, piros színű csővég periodikus mozgásától nagymértékben eltért a fehér színű csőecske mozgása. Ennek a 0÷500 ms-os időintervallumban befutott pályáját mutatja a 36. ábra bal oldali diagramja, miközben a pálya középpontjától mért, az idő függvényében ábrázolt vízszintes és függőleges kitéréseket szemlélteti a 36. ábra jobb oldali diagramja. Ebben az esetben megfigyelhető, hogy a vizsgált intervallumon belül a csővég igen eltérő pályagörbék mentén mozgott, s a pályájának több részén is hirtelen irányváltás következett be. Ennek magyarázatát a képsorok alapján találtam meg: a fehér végű aktív elem más, szomszédos csővekekkel való ütközései okozták a hirtelen irányváltásokat. Ebből tehát feltételezhető, hogy az aktív rács mozgó elemei esetén, azok minél sztochasztikusabb működéséhez hozzájárul a szomszédos aktív elemek egymással történő összeütközése. A 36. ábra jobb oldali diagramján az előző ábrához hasonlóan a vizsgált pályaszakasz középső pontjához viszonyított y és z irányú kitérések láthatók az idő függvényében. Ellentétben a 35. ábrán látható periodikus jelleggel, ebben az esetben mind a frekvencia, mind pedig az amplitúdó jelentős mértékben változik mindkét kitérés-komponens esetében, amely az ütközéseknek tulajdonítható. E feltevésre bizonyítékul szolgálnak az ábra jobb oldali diagramja feletti képkivágások, amelyek az adott, nyíllal jelölt hirtelen pozícióváltásokhoz tartoznak.

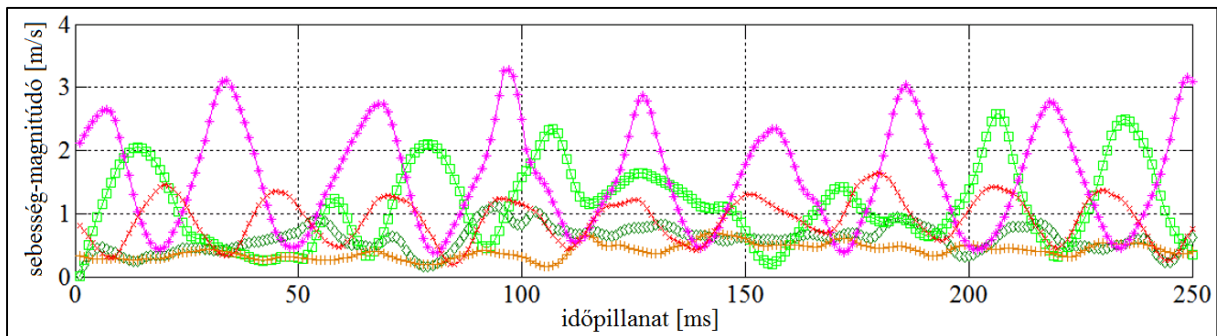


36. ábra A fehér színű csővég 1÷500 ms intervallumban befutott pályája (bal oldal) és a pálya középpontjától mért y és z irányú kitérések az idő függvényében, az egyes ütközéseket szemléltető képkivágásokkal (jobb oldal). Jelmagyarázat: vízszintes irányú kitérés: ○; függőleges irányú kitérés: ×.

A csővégek pixel-elmozdulásainak vizsgálatain túl, az egyes pixel-idősorokból előállíthatók voltak az adott csővégek sebesség-idő függvényei is. Ehhez rendelkezésre állt az egymást követő képek között eltelt Δt_k időtáv, az adott csővég pixel-pozíciójának y és z irányú komponense, továbbá az egyik képet felhasználva meghatároztam a képek térbeli felbontását, ami $C_{res}=0,3802$ mm/pixel értékre adódott. Ezek felhasználásával meghatároztam a pillanatnyi (valójában az adott képpár közötti Δt_k időtávra átlagolt) sebesség-magnitúdó értékeket, amelyeket a (8.1) definíció szerint határoztam meg:

$$v_i = C_{res} \cdot \sqrt{\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{\Delta t_k}\right)^2 + \left(\frac{z_{i+1}-z_i}{\Delta t_k}\right)^2} \quad . \quad 8.1$$

A kapott v_i sebességértékeket a képkocka sorszámának megfelelő időpillanathoz társítva megkaptam a sebesség-idő függvényt, amelyet a „smooth” függvénnyel simítottam az esetleges hibákból adódó kiugró értékek eliminálása miatt. Ennek eredményeként kapott, összesen öt különböző aktív elem mozgására jellemző sebességértékeket szemléltet a 37. ábra, amelyen a jobb átláthatóság érdekében csupán a 0÷250 ms-os időintervallumhoz tartozó értékeket tüntettem fel.



37. ábra Különböző aktív elemek végeinek sebesség-idő függvénye az 1÷250 ms-os intervallumban. Jelmagyarázat: lila színű csővég: *; világoszöld csővég: □; piros csővég: ×; sötétzöld csővég: ◇; narancssárga csővég: +.

Az ábra alapján látható, hogy több csővégnak is periodikus jelleggel változik a sebessége (lila, piros), azonban ezekkel szemben a világoszöld és a sötétzöld elemek sebessége rendszertelenül változik, amely szintén a bekövetkezett ütközésekre vezethető vissza. Emellett megfigyelhető az is, hogy a maximális sebességek is jelentősen eltérnek. A mozgásuk során nagyobb felületet lefedő csövek nagyobb maximális sebességet érnek el, mint a kisebb kitérés mutató elemek. E megfigyelés a már előzőleg bemutatott pixel-elmozdulásokkal (32. ábra) és a pályagörbékkel (33. ábra) is összhangban van. A nagyobb kiterjedésű pályagörbe esetén a csővégből kilépő áramlás impulzuserejének nagyobb része jut a csővég vizsgált síkkal párhuzamos irányú gyorsítására, így a nagyobb erőkomponens a hosszabb, az erő irányába eső úttal együtt nagyobb sebességértékre képes gyorsítani az elemet.

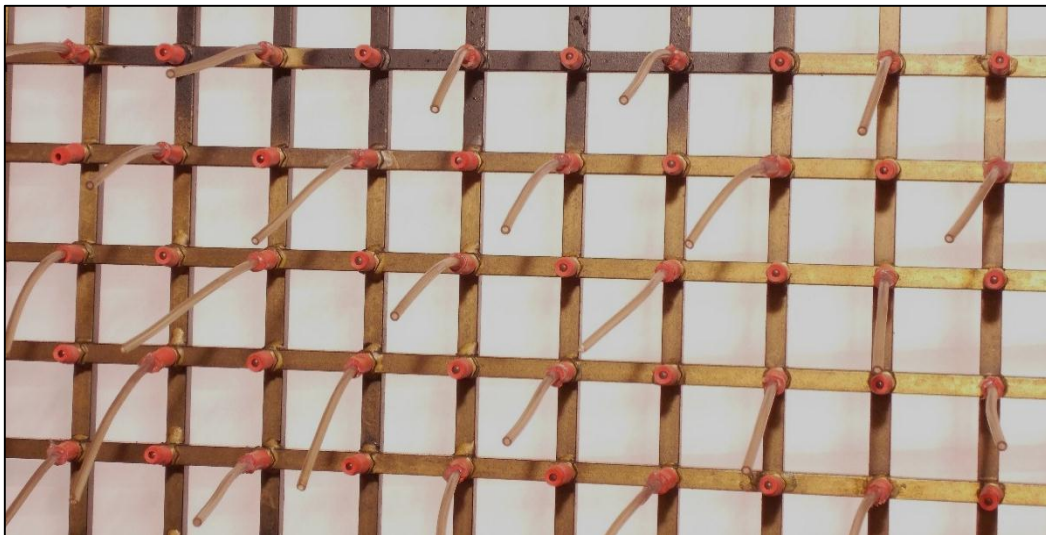
Az előzőekben bemutatott eredmények alapján egyrészt megállapítható, hogy a gyorskamerával megfigyelt aktív elemek a vizsgálat időintervallumának függvényében változó pályákat sűrűltak a vizsgált y - z síkban. Ebből adódóan elmondható, hogy megfelelően hosszúra választott időintervallum esetén az egyes csővégek által bejárt pályagörbék külső pontjait összekötő görbe közel kör alakú, amely körön belül a csővég bármelyik pozícióban előfordulhat. Megállapítható, hogy a szomszédos csövek mozgás közbeni véletlenszerű ütközése jelentős befolyással van a csövek mozgására, amelyek így megváltoztatják addigi pályájukat, amely együtt jár a belőlük kilövellő légsugár irányának megváltozásával. Így tehát a nagyszámú aktív elem interakciójából feltételezhetően időben sztochasztikusan változó irányú légsugarak jutnak az alapáramlásba. A vizsgálatok azonban arra is rámutattak, hogy az egyes aktív elemeknél a burkoló kör más és más méretű, tehát „passzívabb” és „aktívabb” elemek egyaránt előfordulnak a rácson. Ez feltételezhetően az egyes aktív elemek fizikai s mechanikai tulajdonságainak eltéréseiből adódhat, emellett továbbá a csövek végén elhelyezett extra tehetetlenségként szolgáló csődarab pontatlan mérete és elhelyezése is szerepet játszhat. Azért, hogy az egyes aktív elemek mozgásjellemzői hasonlóbbak lehessenek (közel azonos befutott pálya, hasonló sebesség-értékek), feltételezésem alapján olyan elemek használata merült fel, amelyek esetén nem szükséges az extra tömeg alkalmazása. Így olyan, az eddig vizsgált típusoktól lágyabb, rugalmasabb csövek lettek beszerezve, amelyek közel azonos mozgásjellemzőkkel bírtak, mint a vizsgált variáció.

Az új, előzőleg még nem vizsgált szilikoncsövekkel, mint aktív elemekkel felszerelt rácsot a későbbiekben Miskolcra szállítottuk, s az a Tanszék laboratóriumában található Göttingen-típusú szélescsatornába került beépítésre az általa létrehozott turbulencia vizsgálata céljából. Itt *Chronos 1.4 C* típusú monokróm gyorskamerával volt lehetőségem az újabb aktív elemek gyorskamerás vizsgálatára.

8.2. Az újabb aktív elemeket tartalmazó aktív rács gyorskamerás vizsgálata a Miskolci Egyetemen

Az előzőekben bemutatott vizsgálatok eredményei alapján tehát arra a következtetésre jutottam, hogy az aktív elemek mozgásának egységesebbé tétele céljából más típusú csöveket kell alkalmazni. A feladatra *ST-EC-60-001* referenciaszámú szilikoncső bizonyult alkalmasnak. Ennek jellemző paraméterei: belső átmérő, $d_{i,t}=1,2$ mm; a falvastagság, $w_t=0,5$ mm; rugalmassági modulus, $E_t=2,2$ MPa; anyagsűrűség, $\rho_t=1170$ kg/m³. Az aktív elemhez ebből a típusú csőből 60 mm hosszúságú szeleteket készítettem, amely hosszából 5 mm a felfogatásukhoz volt szükséges, így $l_{a,t}=55$ mm-es aktív csőhossz adódott.

A tanszéki laboratóriumban a Göttingen-típusú szélcsatorna 500×500 mm-es keresztmetszetű, a mérőtér előtt, de a konfúzor után található szakaszába lett beépítve a rács. Összesen 20×19 rácselem (üreges fémrúd) helyezkedett el az áramlási térben, a hozzájuk csatlakozó osztó-csővek a csatornán kívül, annak két oldalán kerültek kialakításra. A mérések elvégzéséhez szükséges volt az elemek aktiválásához elégséges mennyiségű préslevegő előállítása. E célra egy *BOCK F16/2050NH* típusú dugattyús kompresszort alkalmaztam. Az első vizsgálatok során megállapítottam, hogy az előállított levegő mennyisége nem elégséges az összes aktív elem együttes működtetéséhez. Megoldásként a rács minden páros sorából a páros sorszámú elemeket, továbbá minden páratlan sorából a páratlan számú elemeket vakdugókra cseréltem ki, ez tekinthető meg a 38. ábrán. Ezzel a módszerrel az első megoldáshoz képes feleannyi aktív elemet (összesen 10×9 db.) kellett működtetnie a kompresszornak, amelyhez már képes volt előállítani a szükséges mennyiségű levegőt (a későbbiekben részletesen ismertetem a mérési paramétereket s a mérési összeállítást).

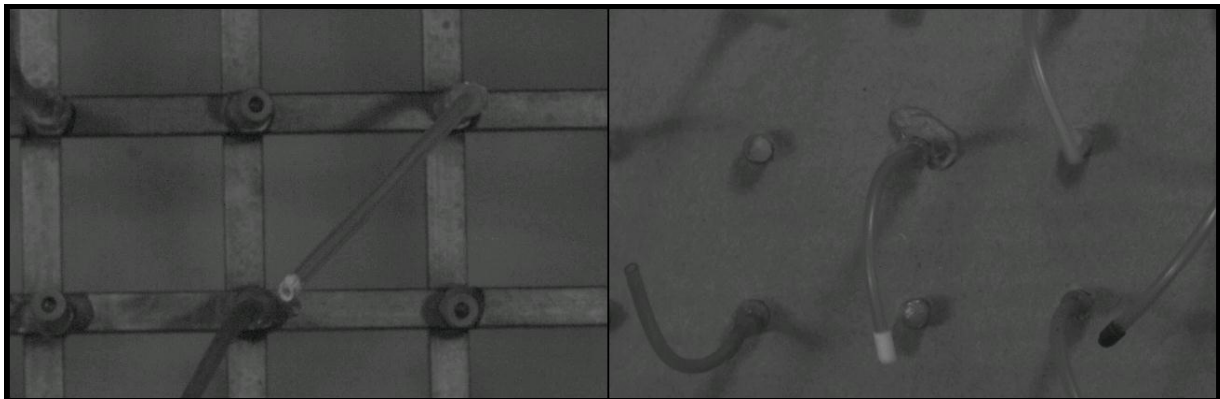


38. ábra A gyorskamerás és a turbulencia-vizsgálatokhoz használt rács részlete.

Mivel az ide vonatkozó szakirodalom alapján a légsugár-rácsokkal úgy állítható elő nagyobb intenzitású turbulencia, ha a belőlük kiáramló légsugarak az alapáramlással ellentétes irányúak (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974), ezért a vizsgálatokhoz a rácsot szintén ilyen módon építettem be a szélcsatornába. Ennek a szakirodalom szerint az az oka, hogy ilyenkor nagyobb nyomásesés alakul ki a rács előtti és az azt követő térben, amely megfelel egy nagyobb keresztmetszetű elemekből készült rács által létrehozott intenzívebb turbulenciának (Roach, 1987), továbbá ellenáramnál nagyobb sebességkülönbségek, ebből adódóan nagyobb nyíróerők alakulnak ki az áramlási térben. A gyorskamerás méréseket ezért a csatorna konfúzorának irányából kellett elvégeznem, amelyekhez a kamerát a konfúzor középvonalában egy állványra építettem fel. Fontos megjegyezni, hogy a gyorskamerás méréseket a szélcsatorna ventilátorának kikapcsolt állapotában végeztem el. Abból adódóan, hogy a kamera monokróm érzékelővel rendelkezett, e mérések során nem volt lehetőség kettőnél több, különböző színűre festett csővég vizsgálatára, hiszen azok közel azonos értéktartományban lévő színekódokat eredményeztek volna a feldolgozás során. Autókorrelációs módszert alkalmazó képfeldolgozó szoftver segítségével (mint amelyet a PIV technika is alkalmaz az egyes részecskék nyomon követéséhez) lehetőségem lett volna kettőnél több csővég mozgásának a vizsgálatára is,

azonban e vizsgálat elsődleges célja az volt, hogy meghatározzam: van-e korreláció a szomszédos csövek mozgásformái között, vagy azok egymástól független, kaotikus pályáformák szerint mozognak? Így tehát elegendőnek bizonyult két, szomszédos mozgó elemet vizsgálni.

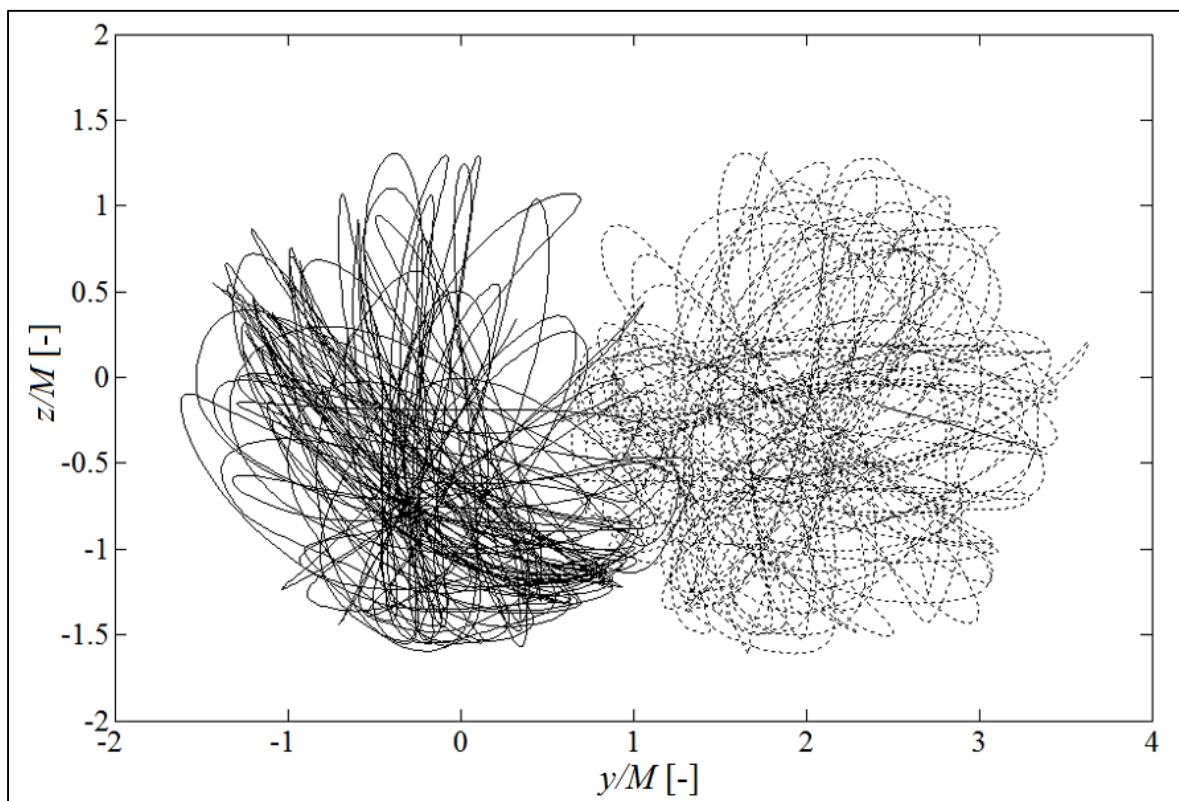
A mérések során a *Chronos 1.4-es, Fujian 35mm f/1.7* optikával szerelt gyorskamerát alkalmaztam, amellyel – hasonlóan az előző mérésekhez – a vizsgált csövek pályáinak a ráccsal párhuzamos síkvetületét vizsgáltam. A kamerával készített képsorok feldolgozhatóságához tehát szükséges volt a két, vizsgált csővég pozíciójának a nyomon követése. Ezért az egyik csővéget fehér színűre, a másikat pedig feketére festettem be, tehát a szoftverrel így két, megadott színtartományba eső pixeleket kellett keresni. A megfelelő mérési környezettel (pl. elégséges megvilágítás) és alkalmas kamera-beállításokkal ($f_k=2,359$ kHz, 1024×576 pixel) sikerült megfelelő élességű képsorokat készíteni, amelyeket a képpárokban a csővég-elmozdulások maximálisan néhányszor tíz pixeles tartományba estek, amelyek megfeleltek a feldolgozáshoz. Azonban az első képsorok alapján látható volt, hogy a képeken több, a fekete színhez közeli árnyalatú részlet is megjelenik (például a ledugózott rácspontok, továbbá a rácselemek élei), amelyek miatt a képfeldolgozás nem működne megfelelően. Azért, hogy homogénebb, szürke színű háttérrel kapjak, egy szürke kartonlemezzel takartam le a rácsot, több irányú megvilágítást alkalmaztam, továbbá szürke színű nyersgumit helyeztem a ledugózott rácspontokra. Ezzel a megoldással elértem, hogy a képsorokon jellemzően fehérebbek és feketébbek a vizsgált részletek a kép többi részétől. Az inhomogén és a homogénebb háttérrel készült felvételek egy-egy képkocka-részlete látható a 39. ábrán.



39. ábra A letakarás nélküli, sötét részeket is tartalmazó képkocka (bal oldal) és a szürke színű letakarással készített kép (jobb oldal).

Az átalakított MATLAB script ez esetben is egy, az előző képkockán megtalált pozícióhoz képest adott pixel-intervallumban végigszaladó 10×10 pixeles keresőablakban számolta a feltételnek megfelelő pixelek számát, s ahol a legtöbb pixel felelt meg a feltételnek, annak a keresőablaknak a középső pontját feleltette meg az adott csővég pozíciójának. A kiértékelés egy 3,2 másodperces képsoron lett elvégezve. Ennek oka egyrészt az, hogy ilyen időtartam alatt is sikerült a vizsgált csövek pályáinak korrelációjához elegendő adatot kinyerni. Továbbá az automatikus feldolgozást jelentősen megnehezítették egy-egy képen az aktív csövek faláról visszaverődő, a kamera érzékelőjébe jutó fénysugarak, mivel ezek a képeken fehér színként jelentek meg, számos esetben hibát okozva a kiértékelésnél. Ugyanis sok esetben előfordult, hogy a felvillanó csőfal éppen a vizsgált, fehér színű csővég közvetlen szomszédságába került, tehát a vizsgált képrészben jelent meg. Ekkor az algoritmus a későbbi képeken a nagyobb

fehérése miatt pedig a csőfal fényes részét kezdte el követni a fehérre festett csővég helyett. Ezért az ilyen képek manuális korrekcióra szorultak, amely igen időigényes feladat volt: ezeken a képeken a nemkívánatos fehér, jellemzően vonalszerű alakzatokat szürke színűre festettem be. A 3,2 másodperces időtartam alatt vizsgált, egymástól éppen $2M$ távolságban felszerelt elemek végeinek mozgási nyomvonalait a 40. ábra szemlélteti olyan módon, hogy a koordináta-rendszer origója éppen a bal oldali aktív elem rácspontjába lett tolva, így tehát a szomszédos aktív elem középpontja éppen $(2M, 0)$ koordinátájú (Szaszák et al., 2018b).



40. ábra A két vizsgált csővég mozgásának nyomvonalai 3,2 másodperces időintervallumban.

Az ábra alapján elmondható, hogy még ilyen, viszonylag rövid idő alatt is jelentős utat futnak be a vizsgált elemek. Ahogy azt már az előzőekben bemutattam, a mozgás periodicitást mutat a rácspont körül, azonban a sebességvektorok iránya rendszertelenül változik, amelynek oka az egymás mellett lévő csövek s a belőlük kiáramló légsugarak kölcsönhatásából adódik. Fontos észrevétel továbbá, hogy még a vizsgált (azaz csak minden második rácspontban elhelyezett aktív elemes) rendszer esetén is átfedés mutatkozik az egyes elemek pályái által lefedett területek között, így fizikailag lehetséges az elemek ütközése. Továbbá megfigyelhető, hogy miközben a jobb oldali elem mozgásának középpontja közel megegyezik a rácspont helyzetével, a bal oldali pályagörbe valamelyest lefelé tolódott el a rácsponthoz képest. Ennek lehetséges oka az aktív elem görbülete lehet, hiszen a csőtekercsből ledarabolt csőszakaszok eredendően görbültek. Természetesen felmerült a gravitáció hatásának figyelembevétele is, azonban véleményem szerint a gravitációs erő által a ~ 172 mg-os aktív elemre ható erő nagyságrendileg kisebb, mint az aktív esetben belőle kiáramló légsugár impulzusereje.

Miután az idő, mint paraméter függvényében meghatároztam a pályapontok koordinátáit tartalmazó kétdimenziós, y és z koordináta-párokat tartalmazó oszlop mátrixokat (**W**: fehér, **B**:

fekete), megvizsgálhattam, hogy a két pályagörbe között milyen erősségű korreláció figyelhető meg, ugyanis ez alapján dönthető el, hogy a rácselemek mozgáspályái között van-e kapcsolat. Ehhez a MATLAB program beépített, kétdimenziós korrelációs, *corr2* függvényét alkalmaztam, amely a 8.2 összefüggés alapján számítja ki a korrelációs együtthatót:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (W_{mn} - \bar{W})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (W_{mn} - \bar{W})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}}, \quad 8.2$$

ahol:

W_{mn} a fehér színű csővég pályagörbéjének m -edik értékpárjához tartozó x vagy y koordinátája,

B_{mn} a fekete színű csővég pályagörbéjének m -edik értékpárjához tartozó x vagy y koordinátája,

\bar{W} a \mathbf{W} mátrix elemeinek átlagértéke,

\bar{B} a \mathbf{B} mátrix elemeinek átlagértéke.

Így tehát a kétdimenziós korrelációs függvényt alkalmazva $r=-0,0327$ érték adódott (Szaszák et al. 2018b). Ez az érték a $\pm 0,19$ -es intervallumon belül található, amely alapján megállapítható, hogy a pályagörbék között nagyon gyenge a lineáris korreláció (Evans, 1996), azaz a lineáris összefüggés közöttük jelentéktelen. Ezt kiterjesztve a teljes rácsra valószínűsíthető, hogy a rács egyes aktív elemei – adott időtáv esetén – egymástól független pályagörbéket írnak le. Fontos azonban megjegyezni, hogy a gyorskamerás vizsgálat a valódi, háromdimenziós mozgásnak csupán a ráccsal párhuzamos vetületére terjedt ki, a harmadik dimenzióban (x) történő mozgás nem volt figyelembe véve.

8.3. Az aktív elemeket jellemző dimenziómentes paraméterek meghatározása

Annak érdekében, hogy a vizsgált légsugaras rács a jövőben más ilyen jellegű, tehát mozgó csöveket tartalmazó rácsokkal valamilyen módon összehasonlítható legyen, azt dimenziómentesített paraméterekkel kell leírni, amely mennyiségekhez nem társul fizikai dimenzió, így azok függetlenek az alkalmazott mértékegység-rendszerrel. Ilyen paraméterek segítségével a vizsgált, különböző aktív-elem variációkat (Szaszák, 2012; Szaszák et al., 2012a) is össze lehet hasonlítani, s a tapasztalatok alapján megadható, hogy a tesztelt variációk közül a legjobbnak ítélt aktív elemek esetén ezek a paraméter milyen intervallumba esnek. Így hasonló eszköz tervezésekor ezek a paraméterek felhasználhatók más dimenziókkal rendelkező aktív elemek kifejlesztéséhez is. Az ilyen dimenzió-mentes paraméterek meghatározásához Buckingham π -elméletét használtam fel (Brand, 1957). Az elmélet ide vonatkozó része alapján igazolható, hogy egy q számú változóval leírt rendszer (esetemben az aktív elemet jellemző mennyiségek) összefüggései átalakíthatók $q-s$ független dimenziómentes mennyiség közötti összefüggéssé, ahol s a rendszert leíró összefüggésekben szereplő összes különböző alaplammennyiség száma.

Az általam vizsgált különböző típusú s dimenziójú aktív elemek leírásához a következő mennyiségeket használtam: sűrűség (ρ_t), rugalmassági modulus/merevség (E_t), belső átmérő ($d_{i,t}$), falvastagság (w_t), hosszúság ($l_{a,t}$), adott esetben az aktív elem végére helyezett extra tömeg (m_{ex}), továbbá az egy-egy aktív csövön keresztülrámló átlagos légtömegáram (\dot{m}_t). A figyelembe vett mennyiségek alapján három, egymástól független dimenziómentes paramétert

tudtam meghatározni. Ezek közül kettő geometriai arányokat leíró szám: $C_t = w_t/d_{i,t}$, amely a relatív falvastagság jellemző értéke, továbbá $C_a = l^*/d_{i,t}$, amely az aktív elem relatív hosszát adja meg. Ebben az esetben l^* az aktív elem aktív szakaszának (s adott esetben a rajta elhelyezett extra tömeg) tömegközéppontjának az aktív csőszakasz kezdetétől mért távolsága. Ebből következik, hogy extra tömeg nélküli variációknál l^* értéke megegyezik az aktív csőhossz felével. A harmadik dimenziómentes paraméter nem csak az elem anyagtulajdonságait, s fizikai dimenzióit veszi figyelembe, hanem ez tartalmazza az elem dinamikájáért felelős légtömegáramot is. Ezért ezt a számot mobilitási-számnak neveztem el, s a 8.3-as összefüggés alapján számítottam ki:

$$C_m = \rho_t E_t d_{i,t}^4 / \dot{m}_t^2 . \quad 8.3$$

Az általam vizsgált aktív elem-variációk esetében a dimenziómentes értékek a következő paraméter-intervallumokon belül alakultak:

- $0,18 \leq C_t \leq 0,53$,
- $10 \leq C_a \leq 29,2$,
- $18\,196 \leq C_m \leq 146\,759$.

A végleges rács-összeállítás esetén, amelynek gyorskamerás eredményeit ismertettem, s amely esetében az áramlás jellemzőit is vizsgáltam, az előzőekben felsorolt, aktív elemre jellemző mennyiségeket s azok értékeit az 1. Táblázat tartalmazza.

1. Táblázat

mennyiség	$l_{a,t}$, mm	$d_{i,t}$, mm	w_t , mm	ρ_t , kg/m ³	E_t , MPa	m_{ex} , g	\dot{m}_t , g/s	l^* , mm
érték	55	1,2	0,5	1170	2,2	0	0,432	27,5

A táblázatban felsorolt értékekkel a következő dimenziómentes számok adódtak: $C_t=0,42$; $C_a=22,9$; továbbá $C_m=28\,600$. A bemutatott paraméter-intervallumok alapján látható, hogy a legjobbnak ítélt, végső variáció esetében kapott értékek az intervallumok alsó és felső határaitól távol helyezkednek el, tehát a vizsgált esetek között nem az egyik szélső paraméterekkel rendelkező aktív elem tanúsította a leoptimalisabbnak vélt aktivitást. Az aktív elemek dimenziómentes paramétereinek meghatározását a [Szaszák et al. \(2018b\)](#) folyóiratcikkben publikáltuk.

Az előző alfejezetekben a légsugaras rács aktív elemeinek több szempont szerinti vizsgálati rámutattak arra, hogy az alkalmazott konstrukció(k) igen összetett mozgásformákat produkálnak azok aktív állapota esetén. Az egymás szomszédságában lévő elemek nagy gyakorisággal hatnak egymásra, amely kölcsönhatás egyrészt a belőlük éppen a másik elem felé kilövellt légsugár dinamikus nyomásából adódik, másrészt pedig maguk a mozgó csőszakaszok is fizikailag ütköznek a szomszédos elemekkel, amely hatására megváltoztatják egymás haladási irányát, s ekképp egymás mozgási pályáját is. Mivel a korrelációs vizsgálat jelentéktelen fokú lineáris kapcsolatot határozott meg a vizsgált elemek között az adott időintervallumban, így megállapítható, hogy a szomszédos csövek – habár azok adott esetben, de igen rövid időtartamban hatással vannak egymás mozgására – egymástól független

pályagörbéket írnak le, így a belőlük kiáramló légsugarak irányultsága is függetlennek tekinthető. Ez tehát a teljes rácsot figyelembe véve adott időpillanatban egy sztochasztikus légsugár-eloszlást eredményez, amely a turbulencia jellegével összhangban áll.

Az aktív elemeket leíró dimenziótlan mennyiségeket felhasználva a későbbiekben további, ilyen megoldású konstrukciók összehasonlíthatóvá válnak az itt bemutatottakkal, függetlenül az adott rendszer méretétől, a rendszer leírásához alkalmazott fizikai mértékegységrendszertől.

8.4.A légsugár-rács által létrehozott turbulencia vizsgálata

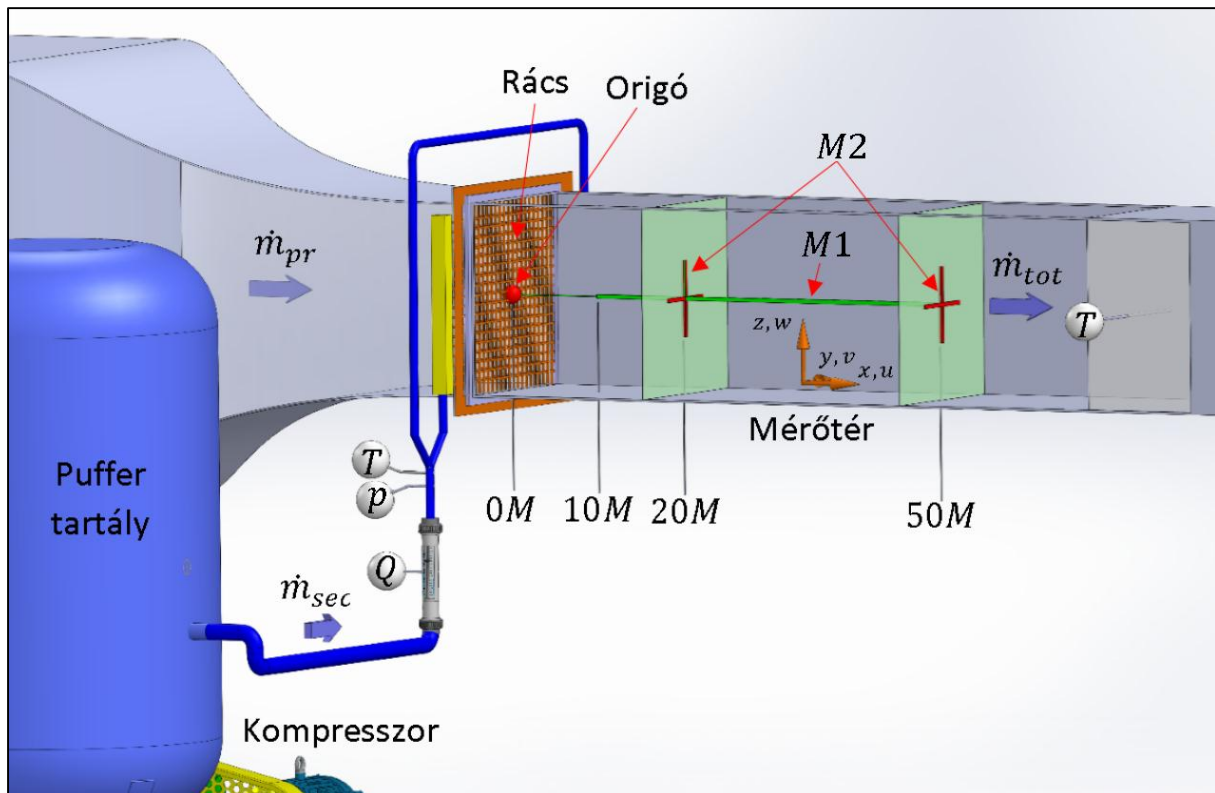
Az aktív rács esetén vizsgált elemek mozgásformáinak meghatározása és leírása mellett természetesen a vizsgálatok elsődleges célja a nyugalomban lévő (passzív állapotú) s mozgó elemeket (aktív) tartalmazó légsugaras rács áramlásra gyakorolt hatásának vizsgálata volt. Az eredeti célt figyelembe véve a kis átlagsebességű áramlás esetén létrejövő turbulencia vizsgálata volt az elsődleges elvárás. A vizsgálandó rács a már előzőleg említett szélcsatornába, – az áramlás irányából tekintve – annak közvetlenül a mérési tere előtt lett beépítve úgy, hogy az aktív elemek működés közben az alapáramlással szemben helyezkedtek el. A csatorna mérőterében traverzrendszer segítségével elhelyezett 2 dimenziós CTA szondával történtek a mérések, amelyek adatait feldolgozva összehasonlíthattam a passzív és az aktív esetben kialakult áramlás jellemzőit. Ezek közül a legfontosabb, a dolgozat következő részében bemutatott mennyiségek: sebesség-eloszlás, izotrópia-arány, turbulencia-intenzitás, turbulens kinetikus energia, disszipációs ráta, disszipációs-konstans, Kolmogorov-hosszskála, Taylor-Reynolds-szám, továbbá a turbulencia energiaspektruma. A légsugaras ráccsal végzett mérések s azok eredményei a [Szaszák et al. \(2018b\)](#) folyóiratcikkben lettek publikálva.

8.4.1. A mérési összeállítás

A rácsot a Tanszéki laboratóriumban található 500×500 mm-es keresztmetszetű, 1,5 m hosszúságú mérőtérrel rendelkező Göttingen-típusú szélcsatornában vizsgáltam. Habár a szakirodalom alapján a vizsgált áramlásban kialakuló anizotrópia csökkentése céljából érdemes a rácsot a mérőtér előtti konfúorzszakaszba beépíteni (Townsend, 1954; Comte-Bellot & Corrsin, 1966; Antonia et al., 2010), ezt egyrészt a rács méretei, másrészt pedig az egy egységből álló konfúorzszakasz nem tették lehetővé. Így tehát a vizsgált rács a konfúorzszakasz és a mérőtér csatlakozási felületei közé lett beépítve olyan módon, hogy az áramlási térben csupán a rácselemek helyezkedtek el, továbbá az aktív elemek az alapáramlás felőli oldal felé néztek (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974 alapján). Annak ellenére, hogy a szélcsatorna eredendően zárt rendszerű, a vizsgálatok nyitott rendszerben, kifúvó módban történtek. Ennek az volt a célja, hogy aktív esetben a működtetéshez szükséges préslevegővel bevitt hő ne okozhasson folyamatos léghőmérséklet-növekedést a csatornában, továbbá az állandó térfogatáram fenntartásához sem lett volna egyszerűen megoldható a kompresszor levegőigényének a szélcsatornában keringtetett levegőből való fedezése.

A vizsgálatokat az előzetesen sebesség-, és iránykalibrált 2 dimenziós CTA-szondával (55R51) végeztem. A mérések a szélcsatorna mérőterének középvonalában, a ráctól mért 10÷50M távolságtartományban, négy különböző átlagsebesség esetén (U_{ref}) történtek: $U_{ref}=3$ m/s, $U_{ref}=4$ m/s, $U_{ref}=5$ m/s, továbbá $U_{ref}=6$ m/s. Ahhoz, hogy az adott referenciasebességhez térfogatáram/tömegáram értéket is tudjak rendelni, az ISO 3966:2008 szabványt (sebesség-keresztmetszet módszer) alkalmaztam. Eszerint a vizsgált, négyzetes

áramlási keresztmetszet szabvány által megadott pontjaiban Prandtl-csővel mért nyomáskülönbségből számított pontbeli sebességeknek a megfelelő súlyozásával megkapható a térfogatáram. A méréseket különböző sebességeken ($U_{ref}=3\div 10$ m/s) elvégezve megkaptam a referenciasebesség-térfogatáram függvényt, amelyből pedig a referenciasebesség-tömegáram függvényt kalkulálhattam. A függvény meghatározásához a méréseket mind passzív, mind pedig aktív rácsok mellett is elvégeztem, azonban mivel a rácstól távol, $x=50M$ távolságban mértem a sebességet, ott mindkét állapot esetén közel megegyező értékpárokat kaptam. Ilyen módon a későbbi vizsgálatok során, aktív rács esetében lehetséges volt a préslevegő- és a mérőtéri levegő tömegáramok arányának a meghatározása. A rács passzív állapotában a rácspontokra illesztett rugalmas elemek nem mozdítottak, ekkor a rács-Reynolds-számok, (Re_M) $M=25$ mm-es jellemző hosszal számolva az átlagsebességeknek megfelelően $Re_M=U_{ref}M/\nu=4,8\times 10^3$, $6,4\times 10^3$, 8×10^3 , továbbá $9,6\times 10^3$ értékre adódtak. A rács után kialakuló áramlás turbulenciájának vizsgálatához összeállított mérőrendszert, annak elemeit, továbbá az egyes mérési eseteket a 41. ábra szemlélteti.



41. ábra A vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer.

A beépített rács aktív elemei kívülről, a rács két oldalán elhelyezett osztó-csőken (sárga színnel jelölve) keresztül lettek megtáplálva préslevegővel. Egyértelmű volt, hogy aktív rács esetén úgy hozható létre a lehetőleg leghomogénebb áramlás, ha az aktív elemek közelítőleg megegyező térfogatáramú levegőt lövellnek az alapáramlásba. Előzetes, kvalitatív vizsgálatok rámutattak arra, hogy a leghomogénebb aktív elem működés (megközelítőleg azonos térfogatáramok az egyes csövecskéken) úgy hozható létre a rács teljes területén, ha a rács két oldalán található osztócsöveket ellenkező végükön (az egyiket alulról, a másikat pedig felülről) táplálom meg. Ekkor ugyanis bármely aktív elemhez közel azonos hosszúságú utat kell

megtennie a feléje áramló préslevegőnek, így jó közelítéssel megegyező értékű nyomásveszteség alakul ki, ami eredményeként hasonló értékű térfogatáramok várhatók.

A rács aktiválásához szükséges préslevegőt egy háromdugattyús *BOCK F16/2050NH* típusú kompresszor állította elő, amelyet egy frekvenciaváltóval vezérelt AC motor hajtott meg. A kompresszor jellemző adatai $n_k = 1450$ r.p.m. esetén: $Q_{max,k} = 178,4$ m³/h, továbbá $p_{g,max,k} = 25$ bar. A préslevegő-térfogatáram egyenletesebbé tétele, továbbá a nyomáslengések kiküszöbölése céljából egy $V_p=0,315$ m³ gázterű puffertartály lett a rendszerbe építve. A rácsot megtápláló préslevegő referencianyomása az osztócsövekhez csatlakoztatott csőszakaszok találkozásánál, egy Y-elágazásnál lett mérve. A nyomás méréséhez egy *Testo 445* típusú digitális nyomásmérő műszer volt alkalmazva a hozzá csatlakoztatott *0638.1645* referenciaszámú nyomásmérő szenzorral. Az aktív-rács mérések során minden esetben 0,5 bar-os préslevegő-túlnyomást állítottam be, mivel ekkora nyomáson az összes rugalmas elem aktívan mozgott. Ennek kivitelezése a kompresszor fordulatszámának változtatásával történt meg. A préslevegő térfogatáramát (Q_{sec}) egy, az Y-elágazás előtt bekötött *LZT G-25* ($Q_{max,r} = 160$ m³/h) típusú rotaméter segítségével mértem. Ahhoz, hogy a leolvasott térfogatáram-értéket korrigálhassam (VDE, 1971), a préslevegő hőmérsékletét is mérnem kellett. Ehhez *TECPEL DTM-800* típusú digitális hőmérőt alkalmaztam *K*-típusú hőelemmel, amelyet nyomásmérés-megcsapolás után építettem be. Így tehát a préslevegő nyomásának, hőmérsékletének és térfogatáramának mérésével meghatározhattam annak tömegáramát (\dot{m}_{sec}) is.

Mind a passzív mind pedig az aktív mérési sorozat azonos CTA-mérőrendszer, s azonos paraméter-beállításokkal lett elvégezve. A mérésekhez a már említett, rendelkezésemre álló *55R51* típusú kétdimenziós szondát alkalmaztam, amelyen egymáshoz képest 90°-os szöget bezáró, 70 μ m átmérőjű, nikkelfilmmel bevont kvarcszálak vannak rögzítve, amelyek fémfilmjén 5 μ m vastagságú kvarcréteg található. Fontos megemlíteni, hogy a szálak aktív hossza 1,25 mm, továbbá a két szál között 1 mm szeparációs távolság mérhető. Ezek a méretek az áramlásban jelen lévő legkisebb örvényskálák megfelelően pontos mérésének szempontjából fontosak. A későbbi eredmények alapján az aktív hosszának a Kolmogorov-hosszskálákhoz viszonyított aránya 6,6 ($x/M=10$) és 3,9 ($x/M=50$) határok között változott, hasonlóan más szakirodalomban közzétett adatokhoz (Valente & Vassilicos, 2011); azonban belátható, hogy a kisebb arányszám pontosabb mérési felbontást tesz lehetővé (Burattini et al., 2008; Antonia et al., 2010). A méréseket megelőzően az alkalmazott szonda sebesség- (1-10 m/s), és iránykalibrációját is elvégeztem a pitch-yaw manipulátorral ellátott *DANTEC Dynamics StreamLine Pro* típusú, számítógép vezérlésű kalibrátor-egységgel. A CTA rendszer vezérlőszoftverébe beépített négyzögjel-teszt segítségével határoztam meg a rendszer frekvenciaválasztását, ami alapján az $f_s=20$ kHz mintavételezési frekvenciát választottam a mérések során, továbbá ehhez 10 kHz-es aluláteresztő szűrőt állítottam be. Az adatgyűjtés ebben az esetben is szintén a már ismertetett *NI MIO 16 bit A/D* átalakítóval történt. A szonda túlfűtési-arányát (overheat ratio) 0,8-as értékre választottam csakúgy, mint Gad-El-Hak & Corrsin (1974), Verbeek (2013), vagy Weitemeyer et al. (2013); azonban az ide vonatkozó szakirodalomban ettől kisebb s nagyobb értékekre is egyaránt van példa: Lavoie et al. (2004): 0,5; Larssen et al. (2011):1,7; Knebel & Peinke (2009):1,8.

Csakúgy, mint a szalagos rács mérési összeállításánál, ez esetben is az ott alkalmazott traverzrendszeren volt elhelyezve a mérőszonda. Azonban ennél az összeállításnál – a szélcsatorna adottságai, továbbá az áramlás minél kisebb mértékű megzavarása céljából – a csatorna mérőterének oldalfalát kellett úgy átalakítani, hogy azon keresztül lehessen

pozícionálni s mozgatni a szondát. Ezért azon egy előre definiált pályát alakítottam ki, amelyen keresztül a szondatartó kar benyúlhatott a mérőtérbe. A tömítettség fenntartása érdekében rugalmas szivacs elemekkel a kimart pálya tömítésre került. Ezen elemek szorosán körülölelték az aktuális pozícióban lévő tartókart. A kar végén egy 90°-os könyököt követően oly módon rögzítettem a szondát, hogy segítségével az alapáramlás irányú u , továbbá az arra merőleges, vízszintes irányú v pillanatnyi sebességkomponenst tudtam mérni (lásd 41. ábra). A rács után kialakuló áramlásra – a rács szimmetriájából adódóan – jellemző a rács síkjával párhuzamos sebességkomponensek lokális izotrópiája, tehát az r.m.s. értékek jó közelítéssel azonosnak vehetők ($v' \approx w'$), ahol w' a függőleges sebességkomponens r.m.s. értéke. Ezt a feltételezést tehát ennél a típusú rácsnál is alkalmaztam az egyes turbulencia-jellemzők meghatározásához.

Miként az a 41. ábra mérési összeállításán is látható, a mérőtérben két mérési sorozat, M1 és M2 lett definiálva, amelyek segítségével az áramlás más-más jellemzőit lehetett meghatározni:

- M1: az áramlás turbulencia-jellemzőinek alakulását a rácsból mért távolság függvényében vizsgáltam $U_{ref}=3$ m/s; 4 m/s; 5 m/s, továbbá 6 m/s referenciasebesség-értékek mellett. A mérőpontokat az áramlási tér középvonalában, a rácsból mért $x=10M$ -tól $50M$ távolságig, $5M$ lépésközökkel vettem fel, így összesen 9 mérési pontot (a 41. ábrán zöld vonallal jelölve) vizsgálhattam. Minden mérési pontban $t_s=60$ s ideig történt az adatgyűjtés $f_s=20$ kHz-es mintavételi frekvencián.
- M2: a rácsot követően kialakuló áramlás homogenitásának vizsgálata céljából a rácsból mérve két távolságban, azzal párhuzamos síkokban ($x=20M$ és $x=50M$), mind a vízszintes (y), mind pedig a függőleges (z) középvonalakban végeztem méréseket. Mindegyik vonal esetén a középső 200 mm szélességű részt vizsgáltam, $1M$ lépésközzel (a 41. ábrán piros keresztekkel jelölve). Minden mérési pontban $t_s=60$ s ideig történt az adatgyűjtés $f_s=20$ kHz-es mintavételi frekvencián, azonban e mérések esetén $U_{ref}=4$ m/s referenciasebesség volt beállítva mind passzív mind pedig aktív esetben.

A szélcsatorna mérőtere után, a rácsból mérve $x=77M$ távolságban (lásd a 41. ábrán) egy Testo 445 típusú, 0600-0493/411 számú érzékelővel ellátott digitális hőmérővel mértem az áramló közeg hőmérsékletét. Ezen túlmenően a mérések során a légköri nyomást is dokumentáltam egy Druck DPI 145 típusú digitális barométerrel. Az általa mért abszolút nyomás közel megegyezett a csatorna mérőterében áramló levegő nyomásával, mivel a csatorna kifúvó módban üzemelt, s az áramlási sebesség alacsony volta miatt eltekinthettem a nyomásvesztéstől. E mennyiségek ismeretében meghatározhattam a mérőtérben kialakuló áramlás tömegáramát, \dot{m}_{tot} -ot is. Ezen túlmenően a rács aktív állapotában a préslevegő jellemzőinek mérése segítségével (nyomás, hőmérséklet, térfogatáram) meghatározhattam a préslevegő tömegáramát. Ez a rendszer állandósult állapota esetén $\dot{m}_{sec} = 140$ kg/h értékre adódott a frekvenciaváltó segítségével az Y-elágazásnál beállított 0,5 bar túlnyomás esetén. A mérések alatt ezt az értéket $\pm 1,1$ kg/h ingadozással tudta tartani a rendszer, ami kevesebb, mint 0,8% relatív ingadozást jelent. Ennek ismeretében, továbbá a mérőtér teljes tömegáramának (\dot{m}_{tot}) meghatározása után egy fontos, az aktív rácsot jellemző paramétert, a tömegáram-arányt határozhattam meg. E jellemzőt a $\varphi = \dot{m}_{sec} / \dot{m}_{tot}$ összefüggéssel definiáltam. Ez tehát az aktív rácsra jellemző paraméter, s értéke a vizsgált, növekvő referenciasebességek ($U_{ref}=3, 4, 5$ és 6 m/s) esetén: $\varphi=4,1\%$; $3,2\%$; $2,6\%$; $2,2\%$. Az értékekből látható, hogy a hozzávezetett préslevegő még a legkisebb, $U_{ref}=3$ m/s sebesség esetén is csupán a teljes mérőtér-áramlás 1/25 részét, azaz csak néhány százalékát teszi ki, s ez az érték nagyobb referenciasebességek esetén tovább csökken. E paraméter egy újabb rendszer tervezésénél a szükséges kompresszor-

teljesítmény számításához, továbbá zárt rendszer esetén a csatornából elvezetendő levegő mennyiségének számításához is fontos információval szolgálhat.

8.4.2. A passzív és az aktív rendszer esetén kalkulált áramlási jellemzők összehasonlítása

Csakúgy, mint a szalag-rács vizsgálatánál, ez esetben is számos, az áramlásra jellemző mennyiséget határoztam meg. A vizsgálatok elsődleges célja a rács passzív és aktív állapotai során létrehozott áramlás paramétereinek összehasonlítása, elemzése volt. Ezért a következőkben bemutatásra kerülnek az izotrópiát és az áramlás homogenitását leíró paraméterek, amelyeket az M2 mérésorozat adataiból származtattam. Továbbá magát a turbulenciát jellemző mennyiségeket is bemutatom, amelyek alakulását a ráctól mért távolság függvényében szemléltetem. Ezeken túlmenően a turbulens kinetikus energia spektrális eloszlását is bemutatom, összehasonlítva a passzív, s az aktív állapot eredményeit.

Izotrópia és homogenitás

Ahhoz, hogy meghatározhassam a rács után kialakuló áramlás jellemzőinek a rács síkjával párhuzamos térbeli eloszlását, az M2-es mérési sorozat eredményeit elemeztem, ahol a vízszintes és a függőleges középvonalakban vizsgáltam a jellemzőket a mérőtér középső 200×200 mm-es (8M×8M) részében. Ebben a mérési sorozatban $U_{ref}=4$ m/s referenciasebességet állítottam be passzív és aktív esetben is. Az egyes vonalakban s rács-állapotokban kapott izotrópia-értékek ($i=u'/v'$) átlagait (i_m), továbbá azok szórásait (i_{std}) a 2. Táblázat tartalmazza. Az értékek alapján tett következtetések előtt fontos ismét megjegyezni, hogy a rács közvetlenül a mérőtér előtt, konfúzor szakasz hozzáépítése nélkül lett vizsgálva.

2. Táblázat

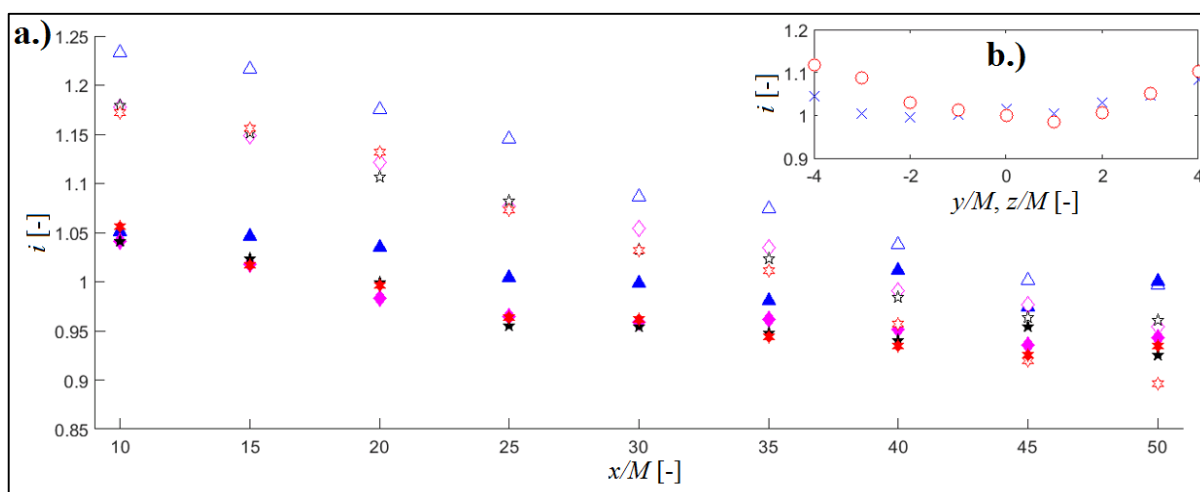
	$i_{m,20M}$ [-]	$i_{m,50M}$ [-]	$i_{std,20M}$ [%]	$i_{std,50M}$ [%]
Passzív eset	1,14	0,99	3,0	5,1
Aktív eset	1,03	0,97	4,0	3,7

A táblázat alapján több megállapítás is tehető. Egyrészt látható, hogy a vizsgált rács esetében, függetlenül annak üzemállapotától, a távolsággal együtt csökken az átlagos izotrópia-arány. Ez a rácsokra jellemző jelenség, amelyet szakirodalmi adatok is alátámasztanak (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974; Makita, 1991; Kang et al., 2003). Ezen túl látható az is, hogy a rács aktiválása mindkét távolság esetén kisebb értékeket eredményezett, 20M távolságban több, mint 10%-kal csökkent az átlagos anizotrópia. Azonban az is megfigyelhető, hogy a rácshoz közelebb 1%-kal nőtt az izotrópia-értékek szórása a rács aktiválása miatt, amely tendencia megfordult az $x=50M$ távolságnál: ott 1,4%-kal csökkent a szórás. Az adatokat szakirodalmi eredményekkel összevetve elmondható, hogy azokhoz közelítőleg hasonló értékek adódtak. Például Kang et al. (2003) cikkükben 1,14-es értékről számoltak be $x=40M$ távolságban aktív rács esetén. Gad-El-Hak & Corrsin (1974) a légsugaras-rács kísérletükben, aktív rács esetén 1,11-es értékű izotrópiát mértek a ráctól 46M távolságban. Makita (1991) a mechanikusan mozgatott aktív elemes rácsával 1,19-es értéket ért el passzív esetben, azonban 1,22-es értéket kapott a rács aktiválását követően, 50M távolságban a ráctól. Természetesen az általam elvégzett mérések esetén az aktív állapothoz tartozó értékek kaptak fontosabb szerepet.

Megállapítható, hogy a rács aktiválása hatására már a rácshoz közeli $20M$ távolságban is csökkentek az adott távolsághoz tartozó izotrópia-értékek, így tehát a rács aktiválása pozitív hatással van az áramlás izotrópiájának alakulására.

Az $U_{ref}=4$ m/s és az $x/M=20$ távolságban végzett mérések izotrópia-értékeinek vonal menti eloszlását szemlélteti a 42. ábra b.) része, amely Larssen & Devenport (2011) Makita-féle, forgó lapátokat tartalmazó aktív rács-kísérletének publikált eredményeihez hasonlóan a vizsgált keresztmetszet széleinek közelében jellemzően egységnyitől nagyobb értékeket mutat.

Az izotrópia-értékeket nem csupán a ráccsal párhuzamos vonalak mentén, hanem a rácstól mért távolság függvényében, a mérőtér középvonalában is vizsgáltam az $x=10M\div 50M$ intervallumban (M1-es mérési eset). A kalkulált értékeket passzív és aktív esetben, mind a négy referenciasebesség esetén szemlélteti a 42. ábra a.) része.

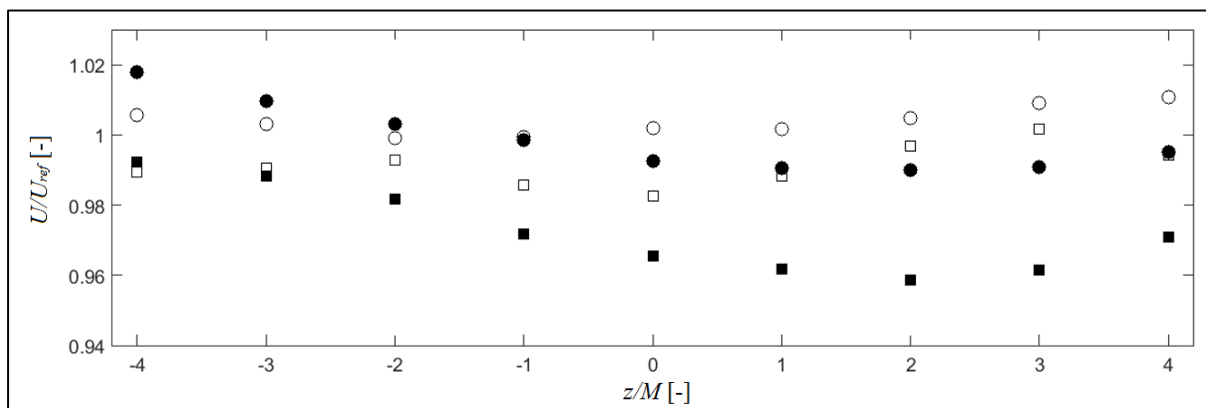


42. ábra Az izotrópia-arány (i) passzív és aktív esetben. a.) a mérőtér középvonalában mért eredmények a rácstól mért távolság függvényében; b.) $x/M=20$ távolságban, $U_{ref}=4$ m/s sebességnél, aktív rács esetén kapott értékek vízszintes (\times) és a függőleges (\circ) irányokban. Jelmagyarázat: üres jelölők: passzív eset, teli jelölők: aktív eset. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyzet: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.

A 42. a.) ábra alapján látható, hogy az izotrópia-értékek a távolsággal együtt csökkennek csakúgy, mint ahogy arról Kang et al. (2003) cikkükben beszámoltak a Makita-féle rács vizsgálatánál. Megfigyelhető, hogy a rács aktiválása szisztematikusan alacsonyabb izotrópia-értékeket eredményezett a rácshoz közel, azonban a legtávolabbi mérési pontokban már nem látható egyértelmű különbség az egyes esetek között.

Mivel számos szélcsatorna kísérlet feltétele az igen jó közelítéssel homogénnek és izotrópnek nevezhető, rács után kialakuló turbulencia, ezért fontos, hogy magának a sebességmezőnek is megvizsgáljuk a homogenitását, hiszen ez szükséges feltétele a turbulencia homogenitásának. Az áramlás inhomogenitására a pontbeli időátlagolt sebesség (U) és a referenciasebesség (U_{ref}) arányának szórása jellemző, amennyiben ezt a mennyiséget a rács síkjával párhuzamos irányokban vizsgáljuk (esetemben az M2-es mérési sorozatban). A szakirodalomban fellelt korábbi légsugaras-rács kísérletek eredményei rámutattak arra, hogy aktív rács esetén az inhomogenitás igen széles tartományban változik. A legkisebb, 5%-os értéktől (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974), ahol egyenként beállított légsugár-erőségekkel értek el igen magas homogenitást, a talán legmagasabb, dokumentált, 30%-os értékig (Luxenberg & Wiskind, 1969) terjed ki a skála. E határokon belüli értékekről számolt be többek között Liu et al., 1971: esetükben 10%-os érték adódott, továbbá Teunissen (1969) és Mathieu & Alcaraz

(1965) 15%-os értéket publikáltak. Mindezt én $U_{ref}=4$ m/s esetén vizsgáltam az M2 mérési sorozat ($x=20M$ és $x=50M$) eredményeit feldolgozva. A referenciasebességhez viszonyított, függőleges vonal mentén mért pontbeli átlagsebesség-értékeket a 33. ábra szemlélteti a rács mindkét üzemi állapotában.



43. ábra Az áramlás homogenitása: a pontbeli átlagsebességek referenciasebességhez viszonyított aránya. Jelmagyarázat: üres jelölők: passzív eset, teli jelölők: aktív eset. Négyzet: $x/M=20$; kör: $x/M=50$.

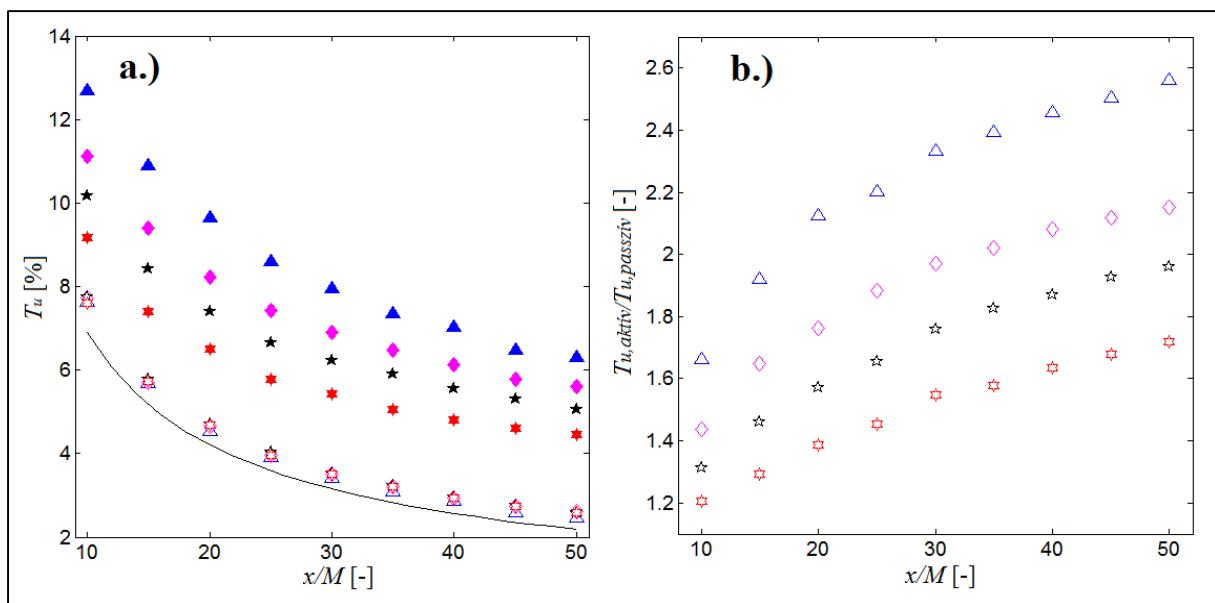
A 43. ábrán megfigyelhető, hogy a szakirodalomban leírtakhoz hasonlóan a rács aktiválása némileg nagyobb eltéréseket okoz a pontbeli átlagsebességek értékeinél (teli jelölők), tehát az aktív esethez valamelyest nagyobb inhomogenitás társítható, főleg a rácshoz közelebbi vonalban. Miközben passzív módban $x=20M$ távolságban (négyzet jelölők) az inhomogenitás 1,9% alatt maradt a vizsgált térrészben, ez az érték 3,4%-ra növekedett aktív esetben. Az $x=50M$ távolságban (kör jelölők) kapott értékek alapján elmondható, hogy a rács aktiválása 1,8%-ig növelte az inhomogenitást, miközben a passzív esethez némileg kisebb, 1,2%-os érték tartozik. Mindezeketől függetlenül, habár a rács aktiválása némileg növeli az áramlás inhomogenitását, még így is sok irodalmi adattól kisebb érték adódott, amely alapján a vizsgált tartományban megfelelően homogénnek tekinthető mind az áramlás, mind pedig a turbulencia.

Turbulencia-intenzitás

Az alapáramlás irányú turbulencia-intenzitás (T_u) mint arról már korábban beszámoltam, az egységnyi átlagsebességű turbulens áramlásban előforduló, alapáramlás irányú sebességingadozások erősségére jellemző mennyiség. Ebből adódóan a turbulencia leírásnak egyik alapvető paramétere, amely segítségével összehasonlítható a passzív és az aktív ráccsal létrehozott turbulencia. Az M1 mérési sorozat alapján kapott turbulencia-intenzitás értékeket szemlélteti a 44. ábra a.) része. Az ábra alapján megállapítható, hogy passzív rács esetén (üres jelölők) a rácstól adott távolságban jó közelítéssel azonos értékeket kaptam, függetlenül a beállított referenciasebességtől; tehát passzív esetben a turbulencia-intenzitás nem függ az áramlás átlagsebességétől. Továbbá ezek az értékek messze az aktív állapothoz tartozó értékek alatt helyezkednek el: passzív esetben csupán 2,5%-tól 7,7%-ig terjedő értékek adódtak. Az észrevétel egyébként a szakirodalom által leírt jelenséget támasztja alá (Roach, 1987), ugyanis passzív négyzet-rácsok esetén a rács után kialakuló turbulenciafok megadható a $T_u = 1,13 \cdot (x/D)^{-5/7}$ empirikus függvényvel, amelyben D a rácselem vastagsága, azonban nem szerepel benne az áramlási sebesség. Az összefüggéssel kapott görbét szintén ábrázoltam

a 44. ábra a.) részén, amely jól közelíti a kapott értékeket; a kismértékű eltérést feltehetően a rácsponthoz elhelyezett elemek okozzák.

Ezzel szemben az aktív állapot eredményei több szempontból is eltérők. A vizsgált aktív esetekben a megfelelő passzívhoz képest jelentősen nagyobb értékek adódtak, aminek oka egyrészt az ellenáramban kilövellt légsugarak okozta megnövekedett nyomásesés, továbbá a mozgó elemek általi „virtuális ellenállási-tényező” növekedés. Mint az látható, az aktív állapotban kialakuló turbulenciafok nagymértékben függ az átlagsebességtől, hiszen az egyes vizsgált sebességeken kapott értékek nem esnek egybe a vizsgált x/M intervallumon, azonban az adott távolsághoz tartozó értékek közötti abszolút különbségek együtt csökkennek a távolsággal. Látható, hogy a legkisebb átlagsebesség esetén kaptam a legmagasabb turbulenciafok értékeket, míg a legnagyobb sebesség esetén a legkisebbeket, azonban még ezek is a megfelelő passzív-eredményektől magasabb értékűek voltak. Például $U_{ref}=6$ m/s esetén a turbulenciafok-értékek 4,5%÷9,2%-os tartományban változtak, miközben 6,3%÷12,7%-os intervallum adódott kisebb, $U_{ref}=3$ m/s esetén. Tehát a rács aktív állapotában az átlagsebesség jelentős hatással van a kialakuló turbulencia-intenzitásra. Ezen eredmények alapján tehát megállapítható, hogy a vizsgált, aktív elemekkel ellátott légsugár-rács képes jelentősen növelni az áramlás turbulenciáját, amely növekedés kisebb referenciasebességeken még szignifikánsabb.



44. ábra a.) A turbulenciafok (T_u) alakulása a rácstól mért távolság függvényében. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s; folytonos vonal: $T_u = 1,13 \cdot (x/D)^{-5/7}$. b.) Az aktív és a passzív esethez tartozó értékpárok aránya.

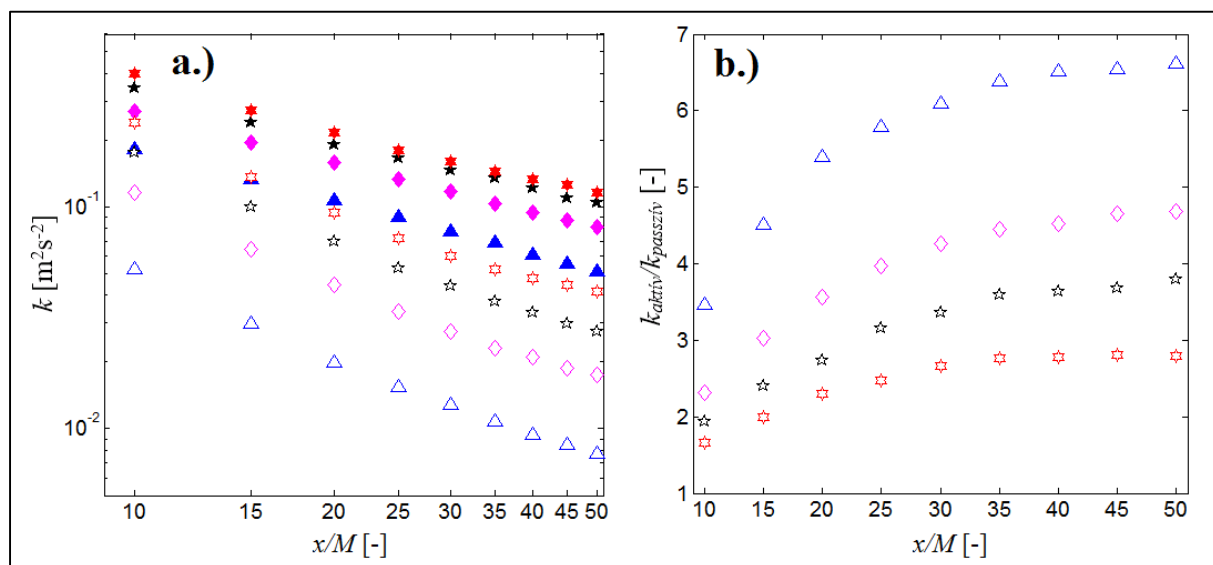
Az aktiválás hatását számszerűsíthetjük, s ekképp még szemléletesebbé tehetjük úgy, ha meghatározzuk az egyes összetartozó aktív és passzív turbulenciafok-értékpárok arányát, amit a 44 b.) ábra szemléltet. Az ábra alapján megállapítható, hogy a legkisebb sebesség esetén kapható a legnagyobb mértékű növekedés, amely – az összes vizsgált sebesség esetén – a távolsággal együtt nő. Az aktiválás 1,2-szeres legkisebb és 2,6-szoros maximális növekedést okozott a vizsgált esetekben.

A kialakuló turbulencia homogenitásának vizsgálata érdekében a turbulenciafok alakulását a rácstól mért fix távolságokban is megvizsgáltam (M2-es mérési sorozat, $x=20M$ és $x=50M$

távolságban). Passzív módban a vízszintes és függőleges vonalakban kapott T_u értékek szórása 0,053-ra adódott $20M$ távolságban, továbbá 0,04-et kalkuláltam $50M$ távolságban. Aktív esetben ezen értékektől valamelyest nagyobbak adódtak, igazolva az előző részben bemutatott tendenciákat: $x=20M$ esetén 0,168; $x=50M$ távolságban ettől valamelyest kisebb, 0,166-os szórásértéket kaptam.

Turbulens kinetikus energia

Talán a legfontosabb skaláris paraméter, amely a turbulenciát jellemzi, egy energia-típusú mennyiség: a fajlagos turbulens kinetikus energia (k), amely az áramló közeg sebességingadozásaiból számítható. Pontos számításához a méréseim során a 2 dimenziós CTA szonda alkalmazásával mért u és v pillanatnyi sebességkomponenseken túl a harmadik, függőleges irányú sebességkomponens (w) ismeretére is szükség lenne, hogy azokból számíthatók legyenek azok r.m.s. értékei. Ennek hiányában a rácturbulenciára jellemző feltételezéssel éltem, miszerint a lokális izotrópia okán az alapáramlásra merőleges két sebességkomponens r.m.s. értékei közel azonosak ($v' \approx w'$), így az előzőekben definiált 4.1 összefüggéssel számíthattam ki a turbulens kinetikus energiát. E mennyiség alakulását mutatja a 45. a.) ábra a ráctól mért távolság függvényében. Az előzőekben bemutatott turbulenciafokkal ellentétben passzív rács esetén a turbulens kinetikus energia jelentősen függ az áramlás referenciasebességétől: nagyobb sebességekhez rendre nagyobb értékek tartoznak, miként azt passzív-rács témájú munkáinkban Kurian & Fransson (2009) és Danesh-Yazdi et al. (2015) is bemutatták. E jelenségnek az oka a mennyiség definíciójában rejlik, hiszen itt nem szerepel az átlagsebesség, mint a normalizáláshoz használt osztótényező, viszont nagyobb sebességeken jellemzően nagyobb r.m.s. értékek adódtak. Emellett látható, hogy a rács aktiválása az összes vizsgált sebesség és pozíció esetén jelentős mértékben növelte k értékét.



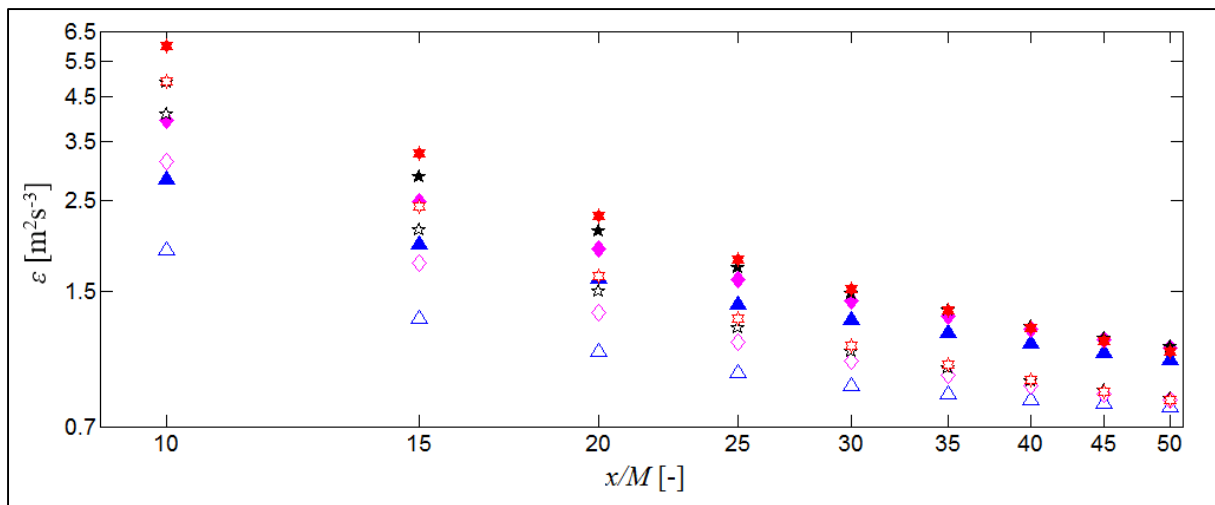
45. ábra a.) A turbulens kinetikus energia alakulása a ráctól mért távolság függvényében (log-log skála). Passzív eset: üres jelölök; aktív eset: teli jelölök. b.) Az aktív és a passzív értékpárok aránya. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.

Csakúgy, mint a turbulencia-intenzitás esetében, az aktiválás hatásának kvantitatív jellemzéséhez itt is meghatároztam az összetartozó aktív és passzív értékpárok arányát, amelyet

a 45. b.) ábra mutat be. Ez alapján megállapítható, hogy a vizsgált tartományokban a távolsággal együtt monoton nő az energianövekedés aránya, habár – a távolsággal együtt csökkenő meredekség miatt – feltételezhetően nagyobb távolságnál egy aszimptotikus értékhez közelít az arányszám. Emellett a T_u alakulásához hasonlóan szintén a legkisebb, $U_{ref}=3$ m/s sebesség esetén volt a rácsnak a legszignifikánsabb energianövelő hatása: a legnagyobb vizsgált távolságban közel 6,5-szeres turbulens kinetikus energia adódott. Ezek az eredmények ismét bizonyítják a rács-konceptió működőképességét: alacsony sebességű alapáramlás esetén – a passzív rácshoz képest – jelentős energiájú turbulencia hozható létre.

Disszipációs ráta

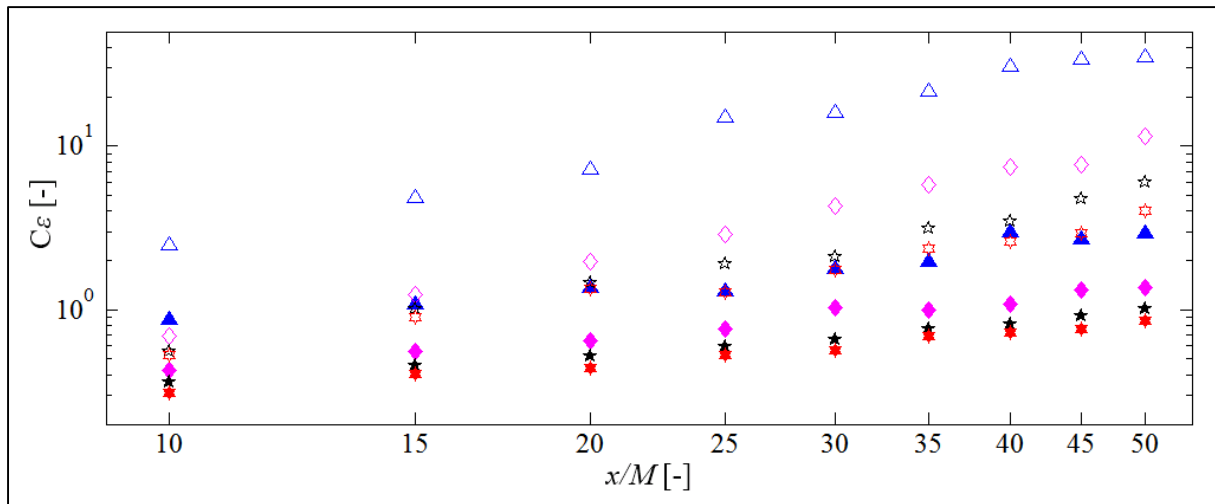
A turbulens kinetikus energia disszipációs rátája (ε) az alapdefiníciója szerint nem más, mint az alapáramlás sebességével együtt haladó rendszer egy pontjában a turbulens kinetikus energia idő szerinti deriváltjának negált mértéke, ahogy azt már a 4.1-es alfejezetben bemutattam. Azonban mivel nem ismert k időfüggvénye, sem mindhárom sebességkomponens, ezért meghatározásához Taylor fagyott-örvény hipotézisét kell alkalmazni, továbbá lokális izotrópiát kell feltételezni. Ezek figyelembevételével a turbulencia spektrális energiaeloszlásából becsülhető meg a disszipációs ráta, a 4.2 összefüggés alapján. A passzív és az aktív esetekben kalkulált ε értékek a rácstól mért távolság függvényében, log-log skálán a 46. ábrán tekinthetők meg.



46. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának (ε) alakulása a rácstól mért távolság függvényében. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyzet: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.

Az ábra alapján megállapítható, hogy a rácshoz közelebb mind passzív, mind pedig aktív állapotban nagyobb fokú a disszipáció, amely a rácstól való távolsággal együtt csökken, megerősítve ezzel Kang et al. (2003) eredményeit. Mind passzív, mind pedig aktív esetben elmondható, hogy a referenciasebességnek a rácshoz közelebb nagyobb hatása van ε értékére, miközben $x=50M$ távolsághoz közeledve ez a hatás már nem érvényesül. Az adott, passzív vagy aktív állapothoz tartozó, különböző U_{ref} sebességek esetén kalkulált értékek közel megegyezőek lesznek a távolabbi mérési pontokban, ám a passzív és az aktív esetekben más-más értékek adódnak. Megállapítható, hogy vizsgálati tartományban a passzív állapothoz viszonyítva minden esetben nagyobb ε értékek adódtak a rácstól való távolsággal együtt.

A szakirodalomban a disszipációs rátával kapcsolatos másik, dimenziómentesített mennyiség is használatos a rács-turbulencia jellemzésére, ez az ún. disszipációs konstans (C_ε). A kiszámításához a disszipáción túl az alapáramlás irányú integrál hosszskála (L) és az alapáramlás irányú sebességkomponens r.m.s. értéke (u') is szükséges, amelyekből a $C_\varepsilon = \varepsilon \cdot L \cdot u'^{-3}$ összefüggéssel adódik a disszipációs konstans. Ennek értékei (x/M függvényében) mind passzív, mind pedig aktív esetben jó közelítéssel hatványfüggvény szerint alakulnak, ahogy ez a log-log skálázású 47. ábrán látható.



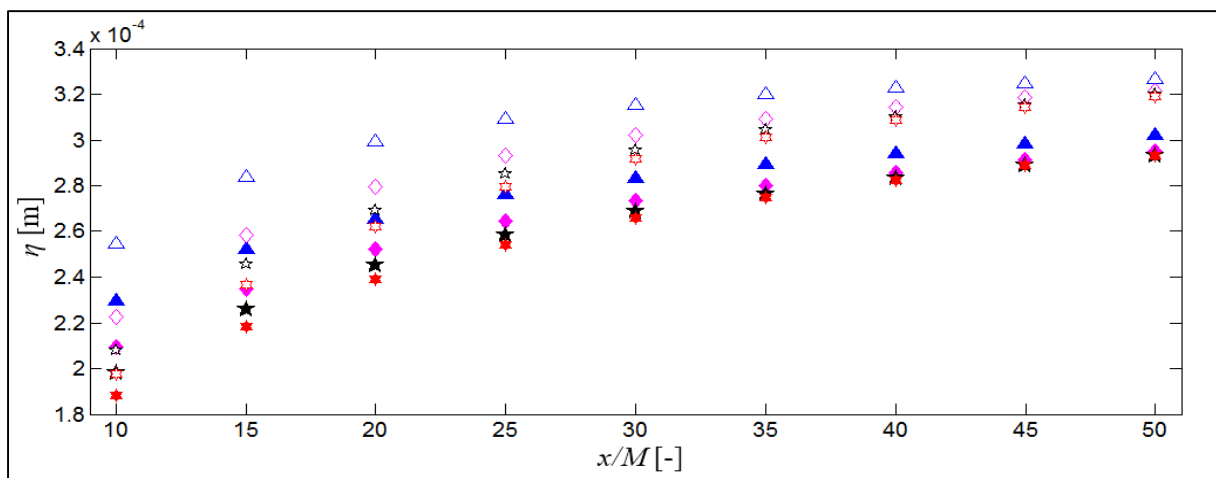
47. ábra A disszipációs konstans (C_ε) alakulása a mérőtér középvonalában, log-log skálán ábrázolva. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.

Megfigyelhető az ábrán, hogy a passzív esethez tartozó értékek (üres jelölők) szisztematikusan magasabb értékűek, mint aktív esetben. Ezek az észrevételek megegyeznek korábbi, légsugaras-rács kísérletek tapasztalataival. Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugar nélkül végzett kísérleteikben (passzív eset) $C_\varepsilon=2,43\div 2,63$ értékekről számoltak be az $x/M=30\div 46$ intervallumban, miközben az áramlással szemben kilövellt légsugarak esetén (aktív rács) ezektől kisebb, $C_\varepsilon = 1,30\div 1,44$ közötti értékeket publikáltak. Az általam végzett kísérletek alapján a teljes intervallum $C_\varepsilon=0,31\div 2,99$ között adódott a teljes $x/M=10\div 50$ tartományon.

Kolmogorov-mikroskála

Ahogy azt már a 4.1-es alfejezetben bemutattam, a Kolmogorov-skálák a turbulens áramlásban jelen lévő legkisebb, disszipatív örvényeket jellemzik. E skálákat behelyettesítve a Reynolds-szám összefüggésébe éppen egységnyi értékű Reynolds-szám adódik, ami az ilyen méretű örvényekre ható súrlódási és tehetetlenségi erők azonosságát jelenti. Kolmogorov elmélete (Kolmogorov, 1890) alapján ezek a skálák – függetlenül az áramlás kezdeti feltételeitől, s a nagyobb skáláktól – univerzálisak, s értékeik csupán a kinematikai viszkozitás (ν) és a disszipációs ráta (ε) értékétől függenek (a 4.5-4.7 összefüggések alapján). Mivel a mérések során eltekintettem az áramló közeg hőmérsékletének kismértékű megváltozásából adódó kinematikai viszkozitási tényező változásától, ebből következően a Kolmogorov-skálák változása a disszipációs ráta megváltozásának közvetlen következménye. A Kolmogorov-hosszskála (η) alakulását a vizsgált esetekben, a ráctól mért távolság függvényében a 48. ábra szemlélteti. Mind passzív mind aktív esetben megfigyelhető, hogy nagyobb áramlási

sebességekhez rendre kisebb Kolmogorov-hosszok tartoznak, függetlenül a rácstól mért távolságtól, azonban nagyobb távolságok esetén kisebb különbségek tapasztalhatók az értékek között. E megfigyelés több, ebben a témában publikált eredményeket is igazol: Gad-el-Hak & Corrsin (1974), Kurian & Fransson (2009) továbbá Larssen & Devenport (2002). Ezen túlmenően az azonos referenciasebességű passzív és aktív esetek összehasonlításakor látható, hogy a rács aktiválása jellemzően kisebb értékeket eredményezett csakúgy, mint ahogy arról Makita (1991) cikkében beszámolt. Továbbá bármely mérési beállítás esetén a távolsággal együtt növekvő értékek adódtak. Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugaras-rács témájú publikációjukban az általam is kapott értékekkel közel megegyező eredményeket kaptak: $x/M=30$ esetén passzív rácsnál 0,31 mm-es értéket kalkuláltak (esetemben 0,29 mm-t kaptam az $U_{ref}=6$ m/s sebességű passzív-rács mérésénél); az aktív ráccsal végzett kísérleteikben valamivel kisebb, $\eta=0,29$ mm-es értéket kaptak, amely esetemben 0,27 mm-re adódott.

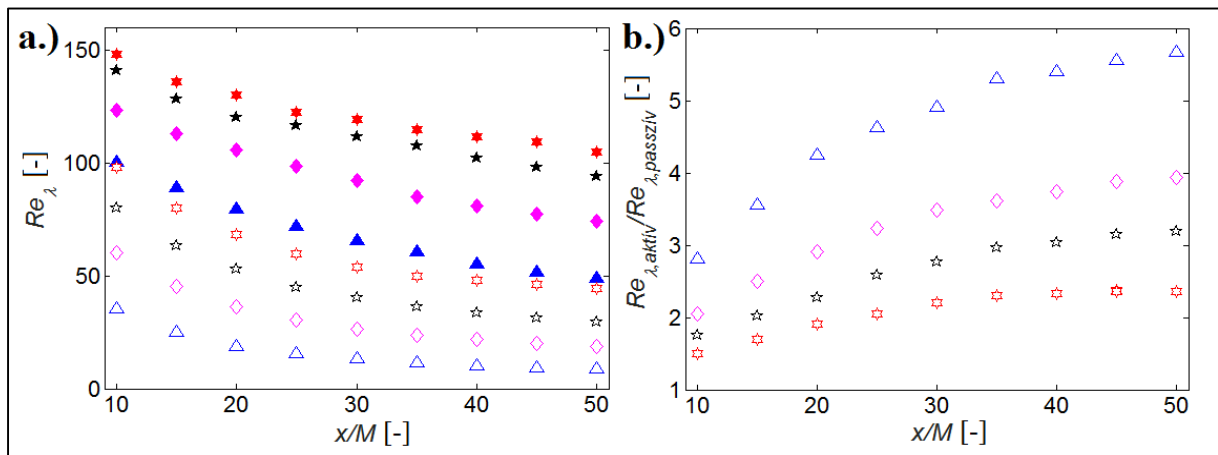


48. ábra A Kolmogorov-hosszskála (η) alakulása a mérőtér középvonalában. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyzet: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.

Taylor-Reynolds-szám

Az eddig bemutatott mennyiségek mellett a turbulencia szintén fontos skaláris jellemzője a Taylor-Reynolds-szám (Re_λ), amely ismerete főleg kisebb méretű szélcsatornában létrehozott áramlások esetében fontos, mivel nagysága információval szolgál a turbulencia kifejltségéről. Izotrópnak feltételezett turbulencia esetén k , ε és ν ismeretében a korábban definiált 4.9 összefüggéssel becsülhető meg értéke. Passzív ráccsal felszerelt szélcsatornában azok méretkorlátai miatt csupán százaz nagyságrendű Taylor-Reynolds-számok érhetők el. Kétsíkú, polírozott alumínium rudakból készített passzív ráccsal ($M=25,4$ mm, $D=4,76$ mm) végzett kísérletükben Mohamed & LaRue (1990) $Re_\lambda=28,37$ -től $Re_\lambda=41,60$ -ig változó értékeket dokumentáltak a rácstól $40M$ távolságban. Comte-Bellot & Corrsin (1966) is hasonlóan alacsony, $Re_\lambda=36\div 72$ közötti értékeket regisztráltak a vizsgált passzív rácsot követően. Ezekből jelentősen nagyobb értékek adódtak Kistler & Vrebalovich (1966) kísérleteiben, ahol is egy relatíve nagy keresztmetszetű ($2,59$ m \times 3,51 m) szélcsatornában végeztek passzív-rács méréseket igen magas, 61 m/s-os légsebesség esetén. Ilyen beállításokkal maximálisan $Re_\lambda=670$ -es értéket sikerült elérniük. A jelenlegi vizsgálat egyik célja szintén az volt, hogy alacsony áramlási sebesség esetén, kisméretű szélcsatornában lehetőleg minél nagyobb értékű Taylor-Reynolds-számot lehessen elérni. A vizsgált esetekben, a csatorna középvonalában

kalkulált Re_λ értékekről a 49. a.) ábra szolgál információval, az aktív és a passzív esetek megfelelő értékeinek arányát pedig a 49. b.) ábra szemlélteti.



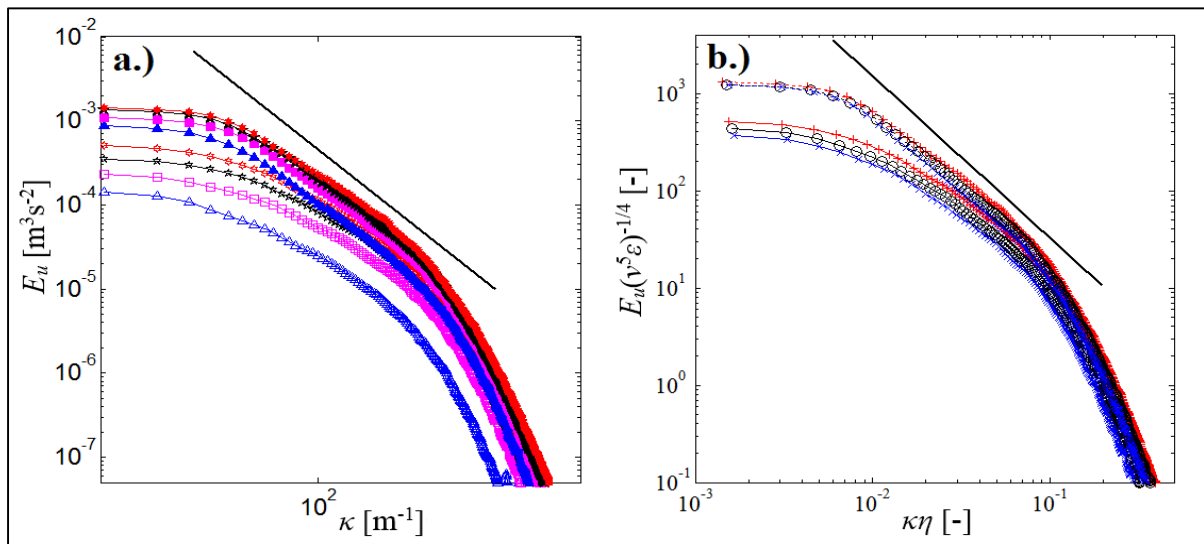
49. ábra a.) A Taylor-Reynolds-számok alakulása a szélcsatorna középvonalában. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. b.) az aktív és a passzív értékpárok aránya. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.

A 49. a.) ábra szerint, ahogy az elvárható a létrehozott, elhaló turbulencia jellemzői alapján, az Re_λ értékek minden esetben a távolsággal együtt csökkennek, továbbá az átlagsebességgel együtt növekednek (adott távolság mellett). Passzív esetben jellemzően alacsony értékek adódtak, amelyek oka egyrészt az alacsony áramlási sebesség, másrészt pedig a kis csatorna-keresztmetszet (500×500 mm). Az így kapott értékek nagyságrendileg megfelelnek az előzőekben bemutatott szakirodalmi eredményeknek. Aktív esetben közel 150-es maximális értéket sikerült elérni a rács közelében, 6 m/s-os átlagsebesség esetén, amely sebességen még $x=50M$ távolságban is nagyobb, mint 100-as érték adódott. A rács működésének hatása számszerűleg jól összevethető Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugaras rácsának kísérleti eredményeivel: esetükben 9,02 m/s-os átlagsebesség esetén passzív rácsnál $Re_\lambda=105$, aktív rácsnál pedig $Re_\lambda=150$ adódott $x/M=30$ távolságban, amely 1,43-os Re_λ aránynak felel meg. Ezzel megegyező távolságban, az általam vizsgált legnagyobb sebesség esetén ($U_{ref}=6$ m/s) passzív esetben $Re_\lambda=54$, míg aktív rácsnál $Re_\lambda=119$ -es értéket kalkuláltam, amely 2,2-es aránynak felel meg. A 49. b.) ábra alapján azonban belátható, hogy nagyobb áramlási sebesség esetén kisebb értékű arány várható az aktív és a passzív esethez tartozó Taylor-Reynolds-számok között. Így a maximális Taylor-Reynolds-szám növekedés, amely meghaladta az 5,6-es értéket alacsony, $U_{ref}=3$ m/s sebesség esetén $x/M=50$ -nél található

Energiaspektrum

A turbulenciát a skaláris jellemzőkön kívül az egyes méretskálakon mérhető energiájának spektrális eloszlása is jellemzi, ezért a kialakuló turbulencia jellemzéséhez ennek ismerete is szükséges. E mérések kiértékelésekor is a MATLAB programkörnyezetben megírt script segítségével határoztam meg a szakirodalom által jellemzően használt alapáramlás irányú egydimenziós teljesítménysűrűség-függvényeket ($E_u(\kappa)$). E függvények nem csupán a szemléltetés céljából hasznosak, hanem a 4. fejezetben bevezetett, majd később mind a szalag-rács, mind pedig a légsugaras rács turbulenciájának leírásához használt több turbulencia-paraméter (ε , $C_\varepsilon \eta$, Re_λ) származtatásához is nélkülözhetetlenek. Így tehát minden mérési

beállítás esetén s minden mérési pontban meghatároztam ezeket a függvényeket, azonban jelen dolgozatban ezek közül csak a legszemléletesebb eseteket, variációkat mutatom be. Az 50. ábra a rácstól mért $x/M=30$ távolságban, a csatorna középvonalában mért alapáramlás irányú pillanatnyi sebességkomponens (u) idősorából kalkulált energiaspektrumok láthatók az összes vizsgált referenciasebességre, mind passzív, mind pedig aktív esetben. Elsőként érdemes megfigyelni azt, hogy a passzív és az aktív esetekhez tartozó görbék a sebességgel együtt a nagyobb értékek felé tolódnak el, azaz a görbék alatti területek a referenciasebességgel együtt nőnek. Ebből tehát (a 4.4 összefüggés alapján) U_{ref} sebességgel együtt növekvő turbulens kinetikus energiák adódnak, amely észrevételt a 45. a.) diagram is alátámasztja. Ettől azonban sokkal jelentősebb észrevétel is tehető: a passzív esetekben a görbéknek jellemzően egy rövidebb hullámszám-intervallumba eső szakasza közelíti meredekségében az elméleti, $-5/3$ -os kitevőjű görbét (a diagramon e meredekséget fekete egyenes jelzi); aktív esethez tartozó görbék esetén ettől jelentősen szélesebb hullámszám-tartomány felel meg ennek. Ez Kolmogorov-elmélete alapján azt jelenti, hogy aktív rács esetén a kialakuló turbulencia spektruma szélesebb tehetetlenségi tartománnyal rendelkezik, így a passzívhoz képest kifejtettebb s izotrópabb turbulenciát lehet előállítani a rács aktiválásával, amely az aktív rácsok passzívakkal szembeni egyik előnyös tulajdonsága. Ezt a tulajdonságot jellemzi kvantitatív módon a Taylor-Reynoldszám, amely értékének nagysága szoros kapcsolatban áll a tehetetlenségi tartomány szélességével (Makita & Sekishita, 2006), így a teljesen kifejtett, izotróp turbulencia feltétele a megfelelően nagy értékű Re_λ (a vizsgált aktív ráccsal maximálisan közel $Re_\lambda=150$ értéket sikerült elérni). A szakirodalom alapján (Uberoi, 1963) az energiaspektrum legnagyobb energiájú hullámszáma éppen az áramlási tér jellemző méretével arányos: az 50. a.) diagramon ábrázolt legkisebb hullámszám éppen a csatorna jellemző méretéből kalkulált érték ($\kappa_H = \pi/H = 6,28$ 1/m, ahol H a csatorna mérőterének magassága), amelyhez – a szakirodalmat igazolva – a legmagasabb energia tartozik.



50. ábra a.) Alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum $x/M=30$ pozícióban. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s. b.) Normalizált, alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum $U_{ref}=6$ m/s esetén. Jelölés: $x/M=30$ (+), 40 (○), 50 (×). Passzív mód: folytonos vonalak; aktív mód: szaggatott vonalak. Mindkét diagramon a fekete egyenes a $-5/3$ -os kitevőjű hatványfüggvény meredekségét szemlélteti (log-log skála).

Szakirodalmi ajánlások alapján pontosabb összehasonlítás tehető az energiaspektrum normalizálásával, dimenziótlánításával. Az irodalomban többfajta módszer is használatos. Esetemben a normalizálást Larssen & Devenport (2002), Kang et al. (2003), továbbá Larssen & Devenport (2011) szerint végeztem el: a hullámszámot (κ) a Kolmogorov-hosszkálával (η) normalizáltam, miközben az $E_u(\kappa)$ spektrális energiát a $(v^3\varepsilon)^{-1/4}$ összefüggéssel dimenziómentesítettem. Ennek eredménye látható az 50. b.) diagramon. E diagramon az állandó, $U_{ref}=6$ m/s sebességhez tartozó passzív és aktív esetben kalkulált eredmények láthatók három különböző távolság esetén: $x/M=30, 40, 50$. Megfigyelhető, hogy a normalizálás hatására a nagyobb hullámszámok esetén összerendeződtek a görbék. Megfigyelhető továbbá, hogy mindhárom vizsgált távolság esetén az aktív esetekben jellemzően szélesebb, s a $-5/3$ -os meredekséget jobban közelítő tehetetlenségi tartomány alakult ki. A távolsággal együtt mind passzív, mind pedig aktív esetben csökken a görbék alatti terület, habár ez a skálázás miatt aktív esetben nem olvasható le egyértelműen.

Az ebben az alfejezetben bemutatott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a rugalmas csövecskékkel ellátott légsugaras rács mind passzív, mind pedig aktív állapotában is képes a rácesturbulenciára jellemző paraméterekkel bíró áramlást létrehozni az áramlási térben. Az aktiválás segítségével számottevő mértékben képes növelni az áramlás turbulenciafokát, továbbá a turbulens kinetikus energiát is, amely növekedés kisebb áramlási sebességek esetén még jelentősebb. Fontos megállapítani, hogy az aktiválás nem okoz jelentős anizotrópiát, sem pedig számottevő inhomogenitást az vizsgált áramlási térben; sok, a szakirodalomban ismertett adatoktól jobb értékek adódtak. A kialakuló turbulencia számos jellemző paraméterét a szakirodalmi adatokkal összehasonlítva megállapítható, hogy egyetlen jellemző esetén sem tapasztalható szignifikáns különbség, amely bizonyítja az eredmények hitelességét, s az alkalmazott mérési módszertan megfelelőségét. Ezen túlmenően a vizsgált rács lényeges tulajdonsága az is, hogy aktív állapotban – a passzívhoz viszonyítva – számottevően nagyobb Taylor-Reynolds-számok érthetők el, amelyek kifejtettebb – s egyben izotrópabb – turbulenciát garantálnak. Így tehát az eredeti célkitűzésnek megfelelő, viszonylag egyszerű felépítésű turbulencia-generáló rács került kifejlesztésre. Az ebben az alfejezetben bemutatott mérések és azok eredményei a [Szaszák et al. 2018b](#) folyóiratban jelentek meg.

8.5. A légsugar-rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálata

Az eddigiekben bemutatott – légsugaras rács tekintetében elvégzett vizsgálatok – a kifejlesztett rács működését, s az általa módosított áramlási jellemzőket voltak hivatottak feltárni. Ezek eredményei alapján bebizonyosodott, hogy a kifejlesztett rács jelentős mértékben növeli meg az áramlásnak a turbulencia erősségét leíró jellemzőit, így segítségével jelentős intenzitású, az alapáramlás sebességével áramló örvényesség hozható létre (lásd a 3.1-es alfejezetben, a turbulencia, mint jelenség definiálásánál). Ahogy azt már ismertettem, a turbulencia segítségével a molekuláris diffúziótól nagyságrendileg nagyobb intenzitású keveredés várható az áramlásban létrejövő deformációsebességek okozta nyírófeszültségek miatt. Miként azt Pope (2000) a turbulencia témájú könyvében is megfogalmazta, a keveredés számos alkalmazás esetén igen lényeges folyamat: a szennyezőanyagok légkörbe történő kibocsátásától egészen a kémiai reagenseknek égőterekben vagy reaktorokban végbemenő keveredéséig. A keveredés tehát számos ipari, kémiai folyamatnál igen fontos, ahol a reakciók hozadékai és azok szelektivitása nagyban függ a keveredés hatékonyságától. Nem megfelelő keveredés nem reprodukálható folyamatot és nem megfelelő minőségű terméket

eredményezhet. Főként kis sebességű áramlásoknál jelent ez gondot, ahol a nem megfelelő keveredés inhomogenitásokhoz vezethet, amelyek a gyengén kevert fluidum-tartományok miatt alakulnak ki. Mivel a keveredés tehát számos (ipari) folyamatban nagy jelentőséggel bír, így annak intenzifikálási lehetőségei is jelentős szerepet kaptak. Hasonlóan, mint a turbulenciageneráló rácsok esetében, e téren is megkülönböztethetünk statikus és dinamikus (aktív) keverőket.

Ghanem et al. (2014) munkájukban részletesen összefoglalják a statikus mixerek különböző típusait, azonban az ilyen típusú keverők fontos jellemzője, hogy a keverendő fluidum alapáramlásának irányával párhuzamosan viszonylag hosszú szakaszon kell beépíteni ezeket a mozgó elemeket nem tartalmazó eszközöket a megfelelő keveredés érdekében. A Kenics-típusú az egyik ilyen, igen elterjedt statikus keverő, amely felváltott perdítési irányú perdítőelemeket tartalmaz, s segítségével háromdimenziós kaotikus áramlás hozható létre (Hobbs & Muzzio, 1997). Coffey et al. (2007) – az e dolgozatban már bemutatott – fraktál-rács keveredés segítő hatását vizsgálták. Sok esetben gázok tökéletes égéséhez szükséges előállítani megfelelő turbulens paraméterekkel rendelkező áramlást. E célra az alapáramlás sebességétől függetlenül változtatható turbulencia-intenzitású keverőt vizsgáltak Marshall et al. (2011), továbbá Bedat & Cheng (1995). Azonban kísérletükben passzív elven működő keverőt alkalmaztak, amelynek a σ kitöltési tényezőjét változtatták.

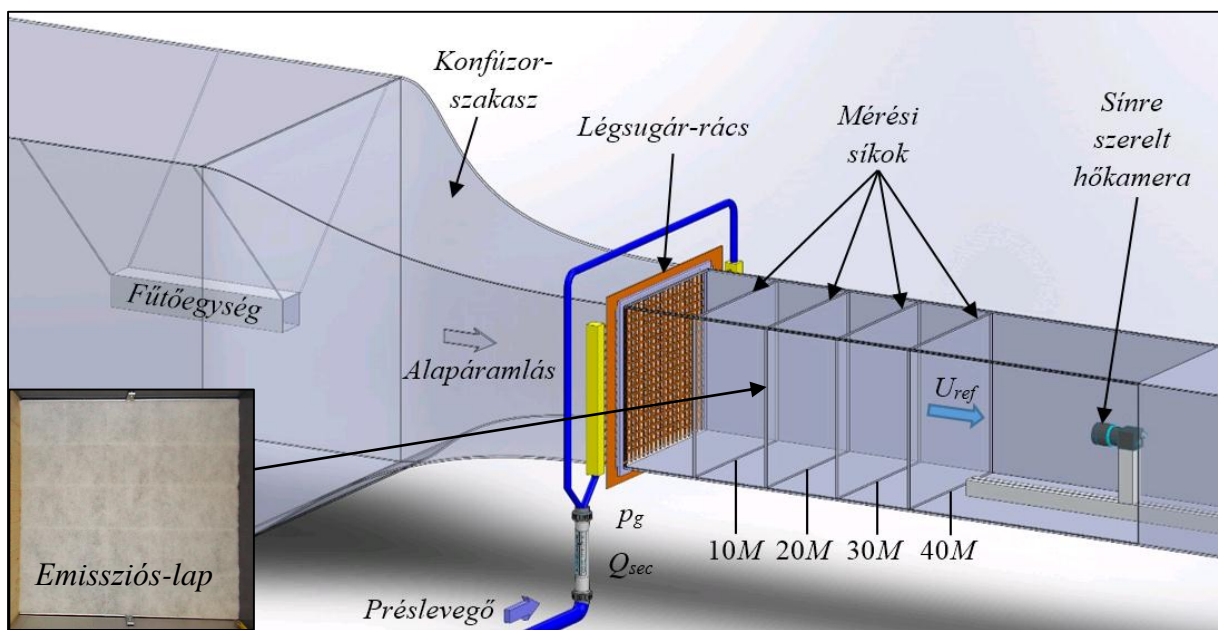
Az aktív keverők előnye abban rejlik a passzívakhoz képest, hogy segítségükkel jelentősen lerövidíthető a keverési úthossz, így adott alkalmazásokban jelentősen kisebb helyigénnyel rendelkeznek. Továbbá az aktív keverők fontos tulajdonsága az is, hogy segítségükkel kontrollálható a létrejövő turbulencia, ezzel együtt javítható a keveredési fok (Cekli et al. 2010b; Ckiekh et al., 2012; Verbeek et al., 2013) csőben áramló közeg keverésére szolgáló aktív rácsos keverőt vizsgált, amely egy álló és egy forgó, perforált tárcsát tartalmazott.

Mindezek alapján – mivel a kifejlesztett rácsokkal jelentős mértékben tudtam növelni az áramlás turbulenciáját – a laboratóriumi felhasználáson túl felmerült ezek aktív keverőként történő alkalmazása is. Ennek vizsgálata céljából egy olyan mérési módszert dolgoztam ki, amely segítségével meghatározhattam a rács homogenizáló hatását a rács különböző működési állapotokban több átlagsebesség, továbbá több rácstól mért távolság esetén. A mérési módszer sajátosságai miatt a vizsgálatokat az 500×500 mm-es mérőtér-keresztmetszetű szélcsatornába beépített légsugaras rácson végeztem el. A rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálatát és annak eredményeit a Szaszák et al. 2018a és a [Szaszák et al. 2019](#) publikációkban mutattuk be.

8.5.1. A mérési összeállítás, az alkalmazott mérési elv

A kifejlesztett légsugaras rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálatához egy olyan mérőrendszert kellett felépíteni, amely segítségével megvizsgálhattam, hogy milyen hatással van a rács aktiválása az azon keresztüláramló közeg keveredésére. Ebből a célból tehát inhomogén fizikai jellemzőkkel bíró áramlást kellett létrehoznom a rács előtti áramlási térben, majd ennek az áramlásnak kellett vizsgálnom az inhomogenitását a szélcsatorna mérőterében, miután az keresztülhaladt a rácson, amely jelen esetben a keverő szerepét töltötte be. Mivel nem állt rendelkezésemre olyan mérés-technika, amely eltérő kémiai tulajdonságú gázok eloszlását detektálta volna, ezért nem kémiailag, hanem fizikailag inhomogén áramlást hoztam létre, ahol az inhomogenitás az áramló közeg hőmérsékletében jelentkezett. A rácsot megelőző konfúzor előtti tér középvonalába építettem be egy saját készítésű, alacsony áramlási ellenállású

elektromos fűtőegységet, amely segítségével az áramlási tér középvonalában magasabb hőmérsékletű légáramot tudtam létrehozni. Ez a légáram a konfúzoron átáramolva felgyorsult, keresztmetszete lecsökkent, s ezt követően haladt keresztül a rácson. A rácstól követő mérőterben attól függően, hogy milyen mértékű a keveredés, eltérő homogenitású hőmérsékletmező alakult ki a rácossal párhuzamos, de attól fix távolságban lévő mérési síkokban. Így tehát a keveredés vizsgálatát hőmérsékletmező-vizsgálatra vezettem vissza. E vizsgálataimhoz már rendelkezésemre állt a dolgozatban bemutatott hőkamera, azonban a kamerával – annak működési elve alapján – nem lehetséges gázok hőmérsékleti sugárzását detektálni. Ennek a problémának a megoldására egy olyan porózus, az áramlás által könnyen átjárható emissziós-lapot készítettem filc szűrőbetétből, amelyet a szélcsatorna mérőterében, a rácossal párhuzamosan, attól diszkrét távolságokban építettem be. A filcen átáramló levegő nyomásesésének hatására bekövetkező kihasasodás megakadályozása végett a filclapot annak a rácslap felőli oldalán egy 100×100 mm rácsközű acélhálóra rögzítettem, amelyen egyúttal egy merev keretet is kialakítottam. Ezen a kereten csavarmentes rögzítőelemeket helyeztem el, amelyekkel az emissziós lapot a mérési esetnek megfelelő pozícióban tudtam rögzíteni. A hőkamerát az áramlási térben az emissziós-laptól megfelelő távolságban elhelyezve már mérhetővé vált a felület hőmérséklet-eloszlása, amely a lapnak választott filcanyag alacsony hőtehetetlenségének okán igen gyorsan képes volt lekövetni az áramló közeg hőmérsékletváltozásait. A mérési összeállítást az 51. ábra szemlélteti.



51. ábra A hőkamerás mérésekhez összeállított mérőrendszer vázlatja.

Az ilyen módon készített felvételeket kielemezve meghatározhattam az áramlási tér egy-egy keresztmetszetében a hőmérsékletmezőt, amely adataiból pedig következtethettem az adott távolságbeli keveredésségi mértékére.

Ahogy az a mérőrendszer vázlatán is megfigyelhető, a rácstól mért négy különböző, a rácossal párhuzamos síkban végeztem méréseket: $x/M=10$; 20 ; 30 ; 40 . Egy-egy adott távolság beállítása esetén az emissziós lapot rögzítettem, majd a csatorna középvonalába pozicionált, sínen csúszatható hőkamerát tőle megfelelő – minden x/M beállítás esetén azonos –

távolságban rögzítettem. Ilyen módon biztosítottam, hogy a mérés helyétől függetlenül azonos térbeli felbontású hőmérsékletmező-képeket rögzíthessek, amelyeket később a MATLAB programban erre a célra készített programmal dolgoztam fel.

Mivel a légsugaras rács által létrehozott turbulencia vizsgálatai rámutattak arra, hogy kisebb sebességek esetén jelentősebb mértékű a turbulencia erősödése (lásd 44. és 45. ábrák), ezért a keveredést is kisebb referenciasebességeken vizsgáltam, amelyek értékei a következők voltak: $U_{ref}=1,5$ m/s; 2 m/s; 2,5 m/s; 3 m/s.

A rács homogenizáló hatását annak három különböző üzemállapotában vizsgáltam attól függően, hogy a rácshoz vezetett préslevegő mekkora mértékű túlnyomással rendelkezett az Y-elágazásnál kialakított mérőpontban:

- a.) $p_g=0$ hPa, amely esetben nem volt préslevegő-hozzávezetés, a rács passzív módban üzemelt nyugalomban lévő aktív elemekkel.
- b.) $p_g=250$ hPa, amely esetben a rács hagyományos légsugaras rácsként üzemelt: az aktív elemei a síkjára közel merőlegesen, de mozdulatlanul helyezkedtek el, továbbá belőlük nagyobb sebességű légsugarak lövelltek az alapáramlással ellentétes irányba.
- c.) $p_g=500$ hPa, a rács turbulencia-vizsgálatánál is alkalmazott túlnyomás (aktív rács-állapot), amely esetén az aktív elemek kaotikus mozgást végeztek, miközben belőlük folyamatosan változó irányú légsugár lövellt ki.

A levegő melegítéséhez villamosság- és hőtani számításaim alapján egy olyan légfűtő-egységet megterveztem meg majd állítottam össze, amely segítségével változtatható fűtőteljesítménnyel tudtam melegíteni a rajta átáramló levegőt. Emellett fontos szempont volt az eszköz lehetőleg minimális légellenállása, hogy a sebességmezőben minél kisebb anomáliákat, s ezzel együtt minél kisebb zavarást okozzon. Ehhez egy négyzet keresztmetszetű (100×100 mm), 600 mm hosszúságú alumíniumlemez-csatornát állítottam össze, amelynek belsejébe előzetes kalkulációim alapján a szükséges hőteljesítményhez megfelelő hosszúságú ellenálláshuzalt építettem be olyan módon, hogy az közelítőleg a teljes keresztmetszeten átáramló levegőt melegíthesse. Ezt az egységet a szélcsatorna konfúzor szakasza előtt, annak középvonalában huzalokkal pozicionáltam, továbbá az adott áramlási sebességhez megfelelő villamos teljesítményt egy csatornán kívül elhelyezett *MPower-8A* típusú toroid transzformátorral állítottam be. Ahhoz, hogy közelítőleg azonos hőmérsékletű levegő hagyhassa el a fűtőegységet, annak villamos teljesítményét (amely jó közelítéssel megegyezett a légáramlás által elszállított hőteljesítménnyel) az U_{ref} sebességgel arányosan változtattam, így $P_{vill}=150$ W, 200 W, 250 W, 300 W értékeket állítottam be az adott referenciasebességnek megfelelően. A villamos teljesítményt a toroid transzformátor kimeneti ágán egy *Voltcraft Energy Logger 3500* típusú digitális mérőeszköz segítségével állítottam be. A b.) és a c.) mérési esetben bejuttatott másodlagos levegő mennyiségével – konstans U_{ref} mellett – ugyan némileg csökkent a primer légáram mennyisége, azonban ennek a mérésre gyakorolt esetleges hatásait nem vettem figyelembe.

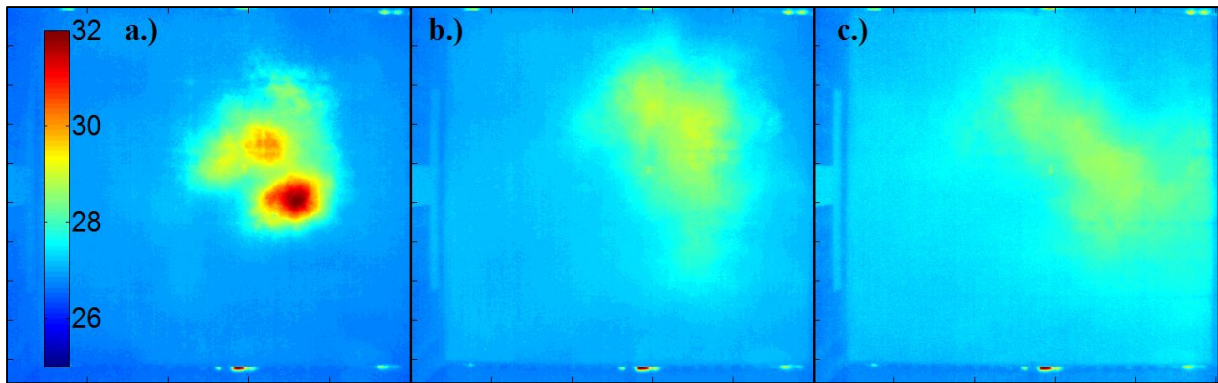
Az előbbieken bemutatott paraméterek alapján összesen 4×4×3, azaz 48 mérési esetben volt szükséges a hőkamerával termogramokat készíteni. A hőkamera beállításainál 1-es emissziós értéket állítottam be, amelytől vélhetően alacsonyabb értékkel rendelkezett a vizsgált emissziós-lap, azonban az összehasonlító vizsgálatok eredményeit ez vélhetően nem befolyásolta. Egy-egy mérési esetben 10 termogramot készítettem a kamera maximális, 640×480 pixeles felbontásán, így a későbbiekben az adatfeldolgozásnál ezek eredményeit átlagoltam majd értékeltem ki. A termogramok esetén az egyes pixelek helyén maguk a hőmérséklet-értékek voltak eltárolva (Celsius-skálán, két tizedes értékkel), így tehát

kétdimenziós mátrixokat, mint bemenő adatokat dolgozhattam fel a MATLAB programban erre a célra általam készített script segítségével.

A program az adatbeolvasást követően mérési esetenként $10 \times 640 \times 480$ méretű mátrixokba rendezte a hőmérsékletértékeket. Mivel a kamera által készített „nyers” termogramok az emissziós felület értékein túl a szélsatorna oldalfala egy részének irreleváns hőmérsékleti értékeit is tartalmazták (az 52. ábrán a termogramok széleinél megfigyelhető hőmérséklet-anomáliák), ezért elsőként levágtam a nem kívánt részeket, így eredményül $10 \times 420 \times 430$ méretű hőmérséklet-mátrixokat kaptam, s a későbbi feldolgozáshoz ezek adatait használtam fel. Ezen értékek minden mérési esetben a vizsgált felület fizikailag azonos pontjainak feleltek meg, mivel a sínrendszer segítségével a kamera és az emissziós felület relatív pozíciója s irányultsága nem változott a vizsgálatok alatt. Minden termogram esetén azonos statisztikai paramétereket határoztam meg: átlag, szórás, medián, módusz, torzultság, továbbá az adathalmazból hisztogramokat is készítettem. A hisztogramok összehasonlíthatósága végett azokat normalizálni kellett, ehhez pedig az egy-egy termogramon szereplő leggyakoribb hőmérsékletértéket, azaz a móduszt alkalmaztam. Így tehát a pontbeli hőmérsékletértékek és a módusz hányadosainak készítettem el a hisztogramját, amelyen a normalizálásnak köszönhetően minden termogram-görbe az egységnyi értéknél érte el a maximumát (mivel az egység felelt meg a leggyakoribb hőmérséklet-értéknek). Ezt követően az egy-egy mérési esethez tartozó termogramok statisztikai paramétereinek értékeiből kiszámítottam azok átlagát és szórását is, amely értékeket Excel-táblázatba exportáltam, hogy ezek ismeretében a keveredést kvantitatív módon jellemezhessem.

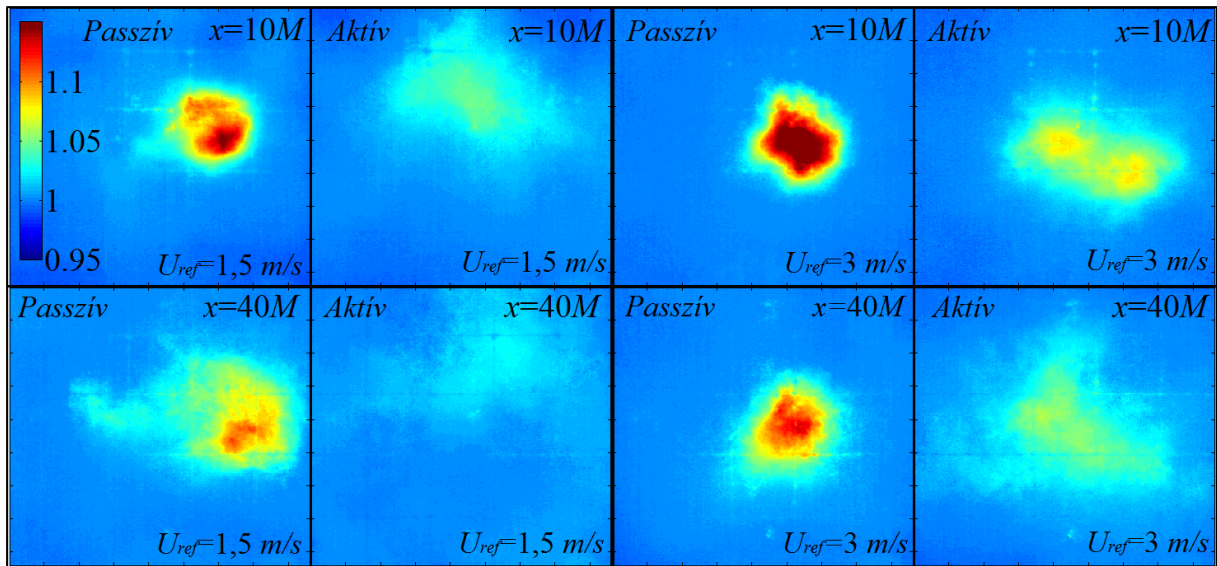
8.5.2. A keveredéssel kapcsolatos paraméterek bemutatása

Az adatfeldolgozást megelőzően is jól szemléltetik a rács keveredés-javító hatását maguk, az emissziós felületről készült termogramok is. A referenciasebességet állandó, $U_{ref}=1,5$ m/s értéken tartva, a rácstól mérve állandó, $x=10M$ távolságban rögzített emissziós felület hőmérsékletértékeit szemléltetik az 52. ábrán látható termogramok. A három hőtérkép (a.), b.) és c.)) rendre a rács három működési állapotát (passzív, fél-aktív, aktív) mutatja. Fontos megjegyezni, hogy az ábrán látható termogramok még a csatorna faláról visszavert hőmérsékleti értékeket is mutatják; ezeket a részeket az adatfeldolgozás során nem vettem figyelembe. Megállapítható, hogy állandó értékű légsebességen már a legkisebb vizsgált, $10M$ távolság esetén is a rács aktiválása jelentős mértékben növelte a keveredést: a passzív eset (a.)) jellemzően inhomogén hőmérséklet-mezejéhez képest homogénebb hőmérséklet-eloszlás látható az ábra b.) részén az ellenirányú légsugarak alkalmazásakor, s ettől is homogénebb mezőt eredményezett a c.), mozgó aktív elemekkel megvalósított üzemi állapot.



52. ábra Termogramok a rácstól mért $x=10M$ távolságban, $U_{ref}=1,5$ m/s esetén a három vizsgált rác-állapotban, azonos hőmérsékleti skálázással ($^{\circ}C$). a.) $p_g=0$ hPa (passzív eset); b.) $p_g=250$ hPa (fél-aktív eset); c.) $p_g=500$ hPa (aktív eset).

Egy másfajta összehasonlítást tesz lehetővé az 53. ábra, ahol egy-egy mérési beállítás esetén a legközelebbi ($x=10M$) és a legtávolabbi ($x=40M$) vizsgált keresztmetszetekben kialakuló sebességmezőket hasonlíthatjuk össze. A minél szignifikánsabb különbségek bemutatása érdekében a szemléltetéshez a legkisebb ($U_{ref}=1,5$ m/s) és a legnagyobb ($U_{ref}=3$ m/s) sebességeken, továbbá a passzív (a.) és aktív (c.) esetekben üzemelő rác esetében készített termogramokat ábrázoltam. Ebben az esetben a későbbi adatfeldolgozáshoz felhasznált, az emissziós lap hőképeit szemléltetem (a termogramok egyéb részeit levágtam). Az összehasonlíthatóság végett az adott termogram móduszával normalizáltam annak hőfokértékeit, így az ábra skálázása ennek megfelelően lett feltüntetve. Az 53. ábra termogramjainak egyik tanúsága a rácstól mért távolság szerepének hatása: mindegyik mérési esetben megfigyelhető, hogy a nagyobb távolsághoz rendre kisebb maximumok tartoznak, továbbá az egységnyitől nagyobb értékek is szélesebb tartományt fednek le. Ezek alapján megállapítható, hogy mind passzív, mind pedig aktív esetben a távolsággal együtt homogénebb hőmérsékletmező alakul ki az áramlásban. Ezen túlmenően megfigyelhető mind passzív, mind pedig aktív esetben az áramlási sebesség keveredésre gyakorolt hatása is. Mindegyik összetartozó képpár esetén a magasabb, $U_{ref}=3$ m/s sebességhez tartozó esetekben nagyobb inhomogenitás figyelhető meg, mint a kisebb sebességek esetén. Ebből tehát arra lehet következtetni, hogy az áramlási sebességnek szintén jelentős hatása van a homogenizációra. Mivel a vizsgált sebességtartományban jellemzően turbulens az áramlás ($Re \approx 48\,000 \div 96\,000$), ezért a tapasztalt különbségek valószínűsíthetően abból adódnak, hogy kisebb áramlási sebesség esetén az áramló közegnek hosszabb idő alatt jut el a vizsgált keresztmetszetig, így az alapáramlással együtt sodródó örvények jelentősebb mértékű keveredést tudnak okozni.



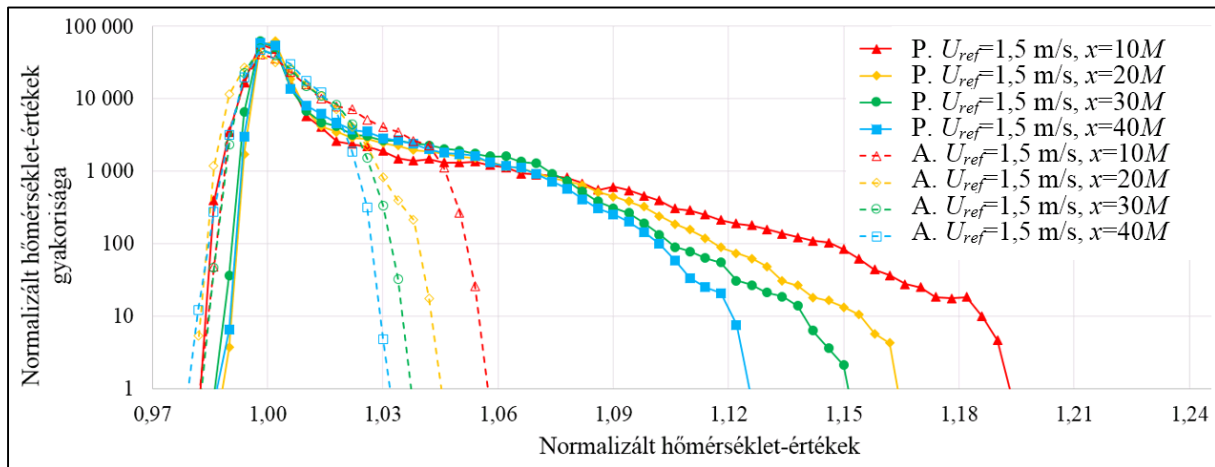
53. ábra A módusszal normalizált termogramok a rácshoz legközelebbi ($x=10M$) és legtávolabbi ($x=40M$) mérési síkokban $U_{ref}=1,5$ m/s és $U_{ref}=3$ m/s sebességek esetén, a rács passzív (a) és aktív (c) állapotaiban.

Az előzőekben bemutatott ábrák bár szemléletesen használhatók a hőmérsékletmezők inhomogenitásának vizualizálására, mégis csupán kvalitatív módon minősítik azt. Ezért a későbbiekben egyéb módszerekkel kívántam jellemezni a keveredési-fokot, amelyhez a MATLAB programban kalkulált mennyiségeket használtam fel.

Elsőként a termogramok értékei alapján készített hisztogramokat ismertetem, mivel ezek alakja szoros összefüggésben áll a tömörséklelet-eloszlással. Ahogy azt az előzőekben részleteztem, az egyes hisztogramok összehasonlíthatósága végett minden esetben az adott hőkép móduszával normalizáltam a hőmérséklet-értékeket. Az összes mérési eset közül kiválasztottam a leginhomogénebbet ($x=10M$, $U_{ref}=3$ m/s, passzív eset), s annak normalizált hőméréséklelet-intervalluma alapján $[0,8\div 1,4]$ -es értékhatárok közötti tartományt használtam fel a hisztogramokhoz; így azok minden mérési esetben lefedték a kapott eredményeket. A hisztogram az eloszlás-függvényhez hasonló jellegű görbét ad, azonban a vízszintes tengelyén nem diszkrét értékek, hanem adott szélességű tartományok (bin-ek) találhatóak. A vizsgált adatsor elemeit tehát a megfelelő részintervallumokba rendezi, s eredményül az adott tartományba eső értékek darabszámát adja meg. Az általam kalkulált hisztogramok esetén a $[0,8\div 1,4]$ relatív-hőmérséklet tartományt összesen 150 részintervallumra (bin-re) bontottam fel, így minden normalizált hőkép esetén megkaptam a hisztogram 150 adatpárját. Mérési beállításoként az adott esethez tartozó hőképek eredményeit átlagoltam, így a kiértékeléshez mérési esetenként egy-egy hisztogram-függvényt kaptam. Amennyiben a hőmérsékletmező teljesen homogén, azaz csupán egyetlen hőmérsékletértéket tartalmaz, abban az esetben a hisztogram tú alakú, s a tú hossza megegyezik az összes hőmérsékletérték darabszámával. Inhomogénebb mező esetén az értékek szélesebb értéktartományban vannak jelen, így a hisztogram egy-egy résztartományának megfelelő értékek darabszáma széteszlik a részintervallumok között, tehát a hisztogram alakja egy szélesebb tartományt lefedő görbe, amely görbe maximuma minden esetben az 1-es értéknél jelentkezik, hiszen a módusszal történt normalizálás éppen ezt a célt szolgálja. Ezek alapján tehát minél szűkebb a görbék által lefedett tartomány, annál homogénebb a hőmérsékletmező.

Az 54. ábrán a legkisebb, $U_{ref}=1,5$ m/s átlagsebesség esetén vizsgált passzív- (a.) és aktív rács (c.) állapotokhoz tartozó normalizált hőmérséklet-értékek hisztogramjait ábrázoltam mind

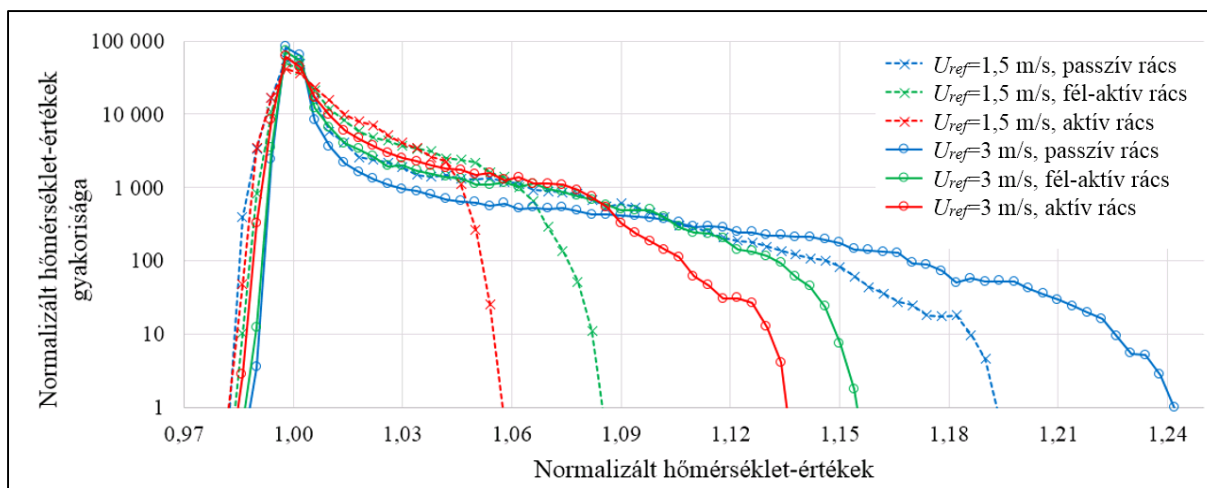
a négy megfigyelt pozíció esetén. Miként az az előző, 53. ábrán is látható, passzív esetben lényegesen nagyobb mennyiségű egységnyihez közeli értéket tartalmaz egy-egy hőkép, mint attól eltérő értéket, ezért a jobb szemléltetés végett logaritmikus léptékben ábrázoltam a függőleges tengelyt.



54. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők histogramjai passzív (P) és aktív (A) esetekben $U_{ref}=1,5$ m/s átlagsebesség esetén, a rácstól mért $x=10M-20M-30M-40M$ távolságokban lin-log skálázással. Jelmagyarázat: a diagramon feltüntetve.

Az ábra alapján több, a hőmérséklet-eloszlást jellemző megállapítás is tehető. Mind passzív (folytonos görbék), mind pedig aktív esetben (szaggatott görbék) a távolsággal együtt monoton csökkenő szélességű tartományt fednek le a görbék. Ebből tehát ismét arra lehet következtetni, hogy a távolsággal együtt mind passzív, mind pedig aktív esetben nő a hőmérsékletmező homogenitása, tehát a rácstól mért távolság, mint paraméter – függetlenül a rács üzemmódjától – fontos szerepet játszik a keveredésben. Amennyiben az azonos távolsághoz, de különböző rács-üzemmódhoz tartozó görbéket vizsgáljuk, akkor megállapíthatjuk, hogy e mérési beállítások esetén az aktív állapot mindenkor jelentősen szűkebb intervallumot eredményezett, amely az egységnyi érték környezetére szűkült. Ebből adódóan igazolható a rács aktiválásának keveredés-intenzifikáló hatása, hiszen a távolságtól függetlenül kisebb mértékű hőmérséklet-eltéréseket eredményezett az aktiválás.

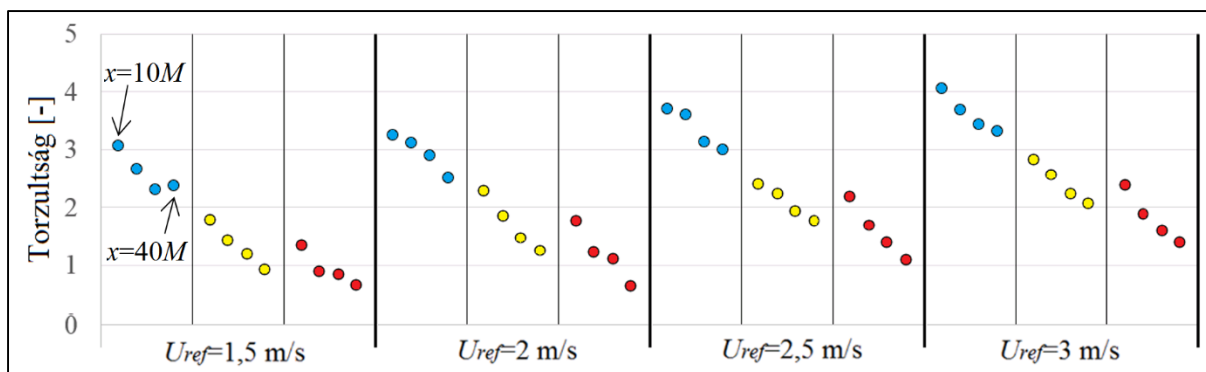
Egy másféle összehasonlítást tesz lehetővé az 55. ábra, amely szintén normalizált hőmérséklet-histogramokat jelenít meg. Ebben az elrendezésben a rácshoz legközelebbi, $x=10M$ távolságban, $U_{ref}=1,5$ m/s és $U_{ref}=3$ m/s referenciasebességeken vizsgált sík eredményei láthatók a rács mindhárom üzemállapota (a.), b.) és c.)) esetén. Megállapítható, hogy mindkét rögzített sebesség esetén rendre csökkenő szélességű tartományt lefedő körbékét eredményeztek a passzív, fél-aktív és aktív rácsállapotok, így tehát az aktiválás homogenizáló hatása a vizsgált sebességtartományban, még a rácshoz legközelebbi távolságban is egyértelműen kimutatható. Továbbá megfigyelhető, hogy a fél-aktív rács eredményei a passzív és az aktív állapotokban kapott görbék közé esnek, amely eredmény az 52. ábra megfigyeléseit igazolja.



55. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők histogramjai passzív, fél-aktív és aktív esetekben $U_{ref}=1,5$ m/s és $U_{ref}=3$ m/s átlagsebességek esetén, a rácstól mért $x=10M$ távolságokban lin-log skálázással. Jelmagyarázat: a diagramon feltüntetve.

Emellett azonban az is látható, hogy a rács aktív üzemiállapotában ebben a távolságban messze nem érhető el azonos homogenitás a két sebesség esetén: 3 m/s esetén jelentősen szélesebb intervallumot fed le a görbe, így nagyobb a hőmérsékletmező értékeinek tartománya is. Mindezek alapján tehát levonhatjuk a következtetést, miszerint a teljesebb keveredés, tehát a homogénebb hőmérsékletmező elérése érdekében a rács aktív állapota mellett egyrészt az áramlási átlagsebesség csökkentése, másrészt pedig a keveredési úthossz növelése szükséges.

A histogramokon túl más, statisztikai paramétereket is meghatároztam, amelyekkel szintén a keveredés mértékét kívántam minősíteni. Az egyes statisztikai mennyiségek vizsgálatakor úgy találtam, hogy bár az adatok szórása szoros összefüggésben áll a mérések alatt változtatott paraméterekkel (átlagsebesség, távolság, rács-aktivitás), azonban a keveredési-fokra legjellemzőbb mennyiség a torzultság. A statisztikában használatos torzultság (skewness) az adatsor valószínűség-eloszlásának az aszimmetriáját kifejező mennyiség. Amennyiben normál-eloszlású az adatahalmaz (az átlag megegyezik a mediánnal és a módusszal), úgy a torzultság zéró értékű. Olyan esetekben, amikor a normál eloszláshoz képest valamelyik irányban torzult az eloszlás, a torzultság értéke pozitív vagy negatív is lehet. Az olyan esetekben, amikor a módusztól nagyobb értékű az átlag, pozitív torzultságról beszélünk, s az általam vizsgált összes mérési esetben is ilyen reláció állt fenn a két mennyiség között. Ez egyébként a histogramokon is megfigyelhető: a módusztól balra található görbeszakaszok minden mérési esetben meredeken, igen közel, futnak egymáshoz, azonban a módusztól jobbra található görbeszakaszok jelentősen eltérnek egymástól, továbbá jóval szélesebb értéktartományt fednek le, amely alapján a módusztól nagyobb értékű átlag várható. Az összes mérési esetben, továbbá mérési beállításonként az összes mért síkban kapott torzultság-értékeket ábrázolja az 56. ábra.



56. ábra Torzultság-értékek az összes vizsgált mérési esetben és síkban. Jelmagyarázat: kék körök: passzív rács, sárga körök: fél-aktív rács, piros körök: aktív rács, továbbá az azonos színű csoportok elemei a rácstól mért távolság függvényében ábrázolva.

Az ábra alapján egyértelműen megállapítható, hogy az eloszlás torzultságát jellemző mennyiség szoros kapcsolatban áll a vizsgálatok során módosított paraméterekkel. Talán a legerősebb kapcsolat a torzultság-értékek és a rácstól mért távolságok között figyelhető meg: egyetlen kivétellel minden vizsgálati esetben monoton csökkenő értékek adódtak a távolság függvényében, amely eddigi megállapításokat is megerősíti, amennyiben a homogénebb eloszlást a kisebb értékű torzultságnak feleltetjük meg. Emellett a rács aktivitása is erősen befolyásolja a torzultság értékét, hiszen bármely vizsgált sebesség esetén az aktívabb rács rendre kisebb értékeket eredményezett adott, rácstól mért távolságokban. Továbbá az áramlás átlagsebességének hatása is egyértelműen megfigyelhető a diagramon: az áramlási sebesség növekedésével mindhárom rács-állapot esetén nagyobb torzultság-értékek adódtak, tehát a hőmérsékletmező inhomogénebb, amiből a kisebb keverési fokra lehet következtetni. Annak eldöntése céljából, hogy az elkeveredés mértékét bizonyosan megfeleltethetem-e az eloszlás torzultsági jelzőszámának, kontrollmérést végeztem. Ekkor nem működtettem a légmelegítő egységet. E vizsgálatot $U_{ref}=3$ m/s referenciasebességen és aktív rács esetén végeztem el az $x=20M$ mérési síkban. Eredményül $-0,16$ -os torzultság-értéket kaptam, amely a fűtött állapotokhoz képest (pl. fűtés esetén ugyanezen mérési beállításoknál $1,9$ adódott) jelentősen közelebb áll a zero értékhez, amely statisztikailag a normál-eloszlásnak felel meg. Mindezek alapján tehát egy olyan statisztikai mérőszámot találtam, amely segítségével kvantitatív módon lehet kapcsolatot teremteni az egyes mérési állapotok és a keveredétség mértéke között.

Az előzőekben bemutatott eredmények alapján különböző hőmérsékletű gázok segítségével lehetőségem adódott a kifejlesztett, új típusú légsugaras rács turbulens keveredésre gyakorolt hatását vizsgálni hőkamerás mérés technika alkalmazásával. A termogramok adatai alapján több szempontból mind kvalitatív, mind pedig kvantitatív módon sikerült karakterizálni a hőmérsékletmezőt, s ez alapján magát, a keveredést is. Ezen eredmények alapján megállapítható, hogy relatíve kis áramlási sebességek esetén is jelentős mértékben csökkenti a keveredéshez szükséges úthosszt az aktív állapotú rács, amely sok lehetséges alkalmazás esetén hasznos tulajdonsága lehet. Ezen túlmenően sikerült egy olyan statisztikai mennyiséget találnom (torzultság), amely mennyiség alakulása szoros összefüggésben áll a hőmérsékletmező inhomogenitásával, azaz ebből adódóan az áramlás keveredétségével.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen értekezés témája új típusú, turbulencia generálására alkalmas aktív rácsok kifejlesztése és azok laboratóriumi vizsgálata. A dolgozat első részében bemutattam a doktori témám alapjául szolgáló, Németországban végzett kutatómunkám legfontosabb eredményeit, amelyek alapján arra az elhatározásra jutottam, hogy a diplomám megszerzése után doktori kutatómunka keretein belül folytatom az aktív rácsokkal kapcsolatos tudományos tevékenységeimet.

A saját kutatásommal kapcsolatos munkám leírása előtt, annak bevezetéseként részletes szakirodalmi összefoglalót készítettem, amely részletesen bemutatja többek között a turbulenciát, mint jelenséget, továbbá annak generálásához alkalmazható különböző típusú rácsokat, a létrejött turbulens áramlás minőségét jellemző fizikai mennyiségeket.

Kutatómunkám első részében a szükséges vizsgálatokhoz egy kisméretű szélcsatornát terveztem meg. Az összeállított szélcsatornában végzett vizsgálatok segítségével optimalizáltam a csatornába beépített áramlásrendező elemek elhelyezését annak érdekében, hogy minél homogénebb sebességmező alakulhasson ki annak mérőterében, amely a turbulenciagenerátorok vizsgálatának egyik feltétele.

Saját ötletem alapján egy olyan, külön energiaforrást nem igénylő rácsot terveztem meg majd építettem be az előzőleg általam tervezett majd összeállított szélcsatornába, amely aktiválását maga az alapáramlás idézi elő. Megfelelő sebesség esetén a rácselemeket alkotó rugalmas szalagok periodikus torziós mozgást végeztek, így a mozgó szalagok egyrészt folyamatosan változtatják a rácsra jellemző kitöltési tényező értékét, továbbá a mozgó elemek dinamikus határréteg-leválást okozva jelentős mértékű örvényképződést okoznak. Az első prototípus esetén műanyag szalagokat alkalmaztam aktív elemekként, azonban azok rövid működési élettartama miatt más megoldást kerestem. A rács továbbfejlesztéseként a műanyag szalagok helyét acélszalagokat alkalmaztam. Ezek feszítéséhez megfelelően merev tartószerkezetet is készítettem, amelyen csavarrugós feszítőegység szolgál a szalagok egyenként történő megfeszítésére. A feszítőerő adott értékre történő beállításához szalagonként erőmérő egységgel láttam el a turbulenciagenerátort.

A szalag-rács által létrehozott turbulenciát a rács utáni mérőtérben, állandó hőmérsékletű légsebességmérő technikával (CTA) vizsgáltam. A szisztematikus vizsgálatok során különböző áramlási sebességeket, továbbá különböző feszítőerőket állítottam be, s ezek adott beállításai mellett vizsgáltam az áramlási jellemzőket a rács utáni mérőtérben. Az általam készített programsor segítségével kalkulált eredmények alapján megállapítottam, hogy a rács aktiválása jelentős hatással volt kialakuló turbulenciára. A turbulenciát szintén jellemző turbulencia-energiaspektrumok vizsgálata rámutatott arra, hogy az ilyen módon előállított turbulencia bizonyos hullámszám-tartományában lokális energia-maximumok jönnek létre. Mivel feltételezésem szerint ez kapcsolatban állhatott a szalagok rezgési frekvenciájával, ezért gyorskamera segítségével is megvizsgáltam a szalagok mozgását különböző referenciasebességek és feszítőerők esetén. A vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy a szalagok rezgési frekvenciája és az energiaspektrumban jelentkező lokális maximumok között szoros kapcsolat áll fenn, hiszen minden vizsgált esetben a rezgési frekvenciának megfelelő hullámszám környezetében figyelhető meg a jelenség. Ezen túlmenően szoros kapcsolatot mutattam ki a szalagok rezgési frekvenciája és az azokat feszítő erő nagysága között.

E vizsgálataimmal egy időben, a Magdeburgban még 2011-ben az általam elvégzett mérések eredményei alapján megtervezett majd összeállított, rugalmas elemekkel ellátott légsugaras rács aktív elemeinek mozgásformáit is tanulmányoztam. Ehhez elsőként különböző színű aktív elemek mozgását vizsgáltam nagysebességű kamera segítségével. A képsorokat erre a célra általam készített számítógépes programmal dolgoztam fel. Ennek eredményeként megállapítottam, hogy a rugalmas elemek – a rács aktív állapotában – periodikus jellegű mozgást végeznek, azonban a befutott pálya jellege s irányultsága az időben változik, továbbá a gyakori ütközések miatt jelentősen eltérnek egymástól a különböző időintervallumokban vizsgált pályafarmák. A gyorskamerás vizsgálatokat követően az addig használttól nagyobb rugalmasságú csövekkel láttuk el a rácsot, amely változtatástól még aktívabb működést – s ezáltal magasabb turbulenciájú áramlást – lehetett várni. Az ilyen elemeket tartalmazó rácsot a mérésekhez célszerűen átalakítva, azon újabb gyorskamerás méréseket végeztem el az aktív elemek mozgásának leírása céljából. A gyorskamerás eredmények alapján megállapíthattam, hogy a vizsgált, szomszédos csövecskék pályafarmái között értelmezett korrelációs együttható értéke közel zérus, tehát közöttük nem állt fenn lineáris kapcsolat.

Ahhoz, hogy az aktív elemként alkalmazott csövecskéket a célnak történő megfelelés (azaz minél aktívabb működés adott paraméterek esetén) szempontjából leírhasam, összesen három, egymástól független, az aktív elemre jellemző fizikai mennyiségekből képzett dimenziómentes mennyiséget definiáltam. Az előzetes vizsgálatok alatt általam tesztelt aktív elem-variációk fizikai jellemzői alapján meghatároztam az azokhoz tartozó dimenziótlan mennyiségek értékeit, így megadhattam a vizsgált esetekhez tartozó intervallumokat, továbbá a végleges variációhoz tartozó számértékeket.

Csakúgy, mint a szalag-rács esetében, a rugalmas elemekkel szerelt légsugaras rács által létrehozott turbulenciát is szélcsatorna-mérőtérben vizsgáltam CTA mérés technikával. E rácsot egy - az általam fejlesztett csatornától nagyobb méretű - Göttingen-típusú szélcsatorna konfúzor-szakasza és a mérőtere közé építettem be olyan módon, hogy a rácson található rugalmas elemek a rács alapáramlással szembeni oldalán helyezkedtek el. A méréseket a rácsból különböző távolságokban, továbbá a ráccsal párhuzamos vonalakban végeztem el négy eltérő referenciasebesség mellett, a rács passzív és aktív állapotában egyaránt. A mérési eredményekből számolt turbulencia-paraméterek alapján megállapítottam, hogy a rugalmas elemekkel ellátott légsugaras rács aktiválása jelentős mértékű turbulencia-növekedést okozott, amelynek következtében számos, a turbulenciát leíró mennyiség értéke jelentősen megváltozott. A turbulencia energiaspektrumai alapján megállapítottam, hogy az aktiválás hatására adott referenciasebesség esetén a passzívhoz képest jobban kifejlett, hosszabb tehetetlenségi tartománnyal rendelkező turbulencia alakult ki.

A turbulencia-vizsgálatokat követően a légsugaras rács impresszív eredményei alapján érdemesnek tartottam megvizsgálni annak keveredés-intenzifikáló hatását is. Ebből a célból egy olyan mérés technikát fejlesztettem ki, amely alkalmazásával a mesterségesen, még a rács előtt létrehozott inhomogén hőmérsékletű légáram rács utáni síkban vizsgált hőmérsékletmezéjének inhomogenitása alapján lehet következtetni az elkeveredetségi mértékére. Ezzel a technikával négy referenciasebesség, továbbá a rácsból mért négy különböző távolság esetén a rács passzív, fél-aktív majd aktív üzemiállapotaiban vizsgáltam az inhomogenitási mértékét. A hőkamerával készített termogramok értékeit erre a célra írt programsorral dolgoztam fel. Eredményképp az egyes esetek normalizált hisztogramjait, továbbá különböző statisztikai mennyiségeket határoztam meg. Megállapítottam, hogy az egyes esetekhez tartozó hisztogramok alakjai, továbbá az hőmérsékletadatok eloszlására jellemző torzultság-értékek szoros kapcsolatban

állnak a hőmérsékletmező homogenitásával. A passzív, a fél-aktív és az aktív esetek megfelelő eredményeit összehasonlítva megállapítottam, hogy a rács aktiválása jelentősen homogénebb hőmérsékletmezőt hoz létre, amely a nagyobb fokú keveredés eredménye, tehát az aktív rács keveredés-intenzifikáló hatása bizonyítást nyert.

Összefoglalóan tehát elmondható, hogy a doktori kutatómunkám során elvégzett vizsgálatok eredményei rámutattak arra, hogy az általam vizsgált s tervezett új típusú, aktív turbulenciagenerátorok alkalmasak a passzív állapotukhoz viszonyítva jelentős mértékű turbulencia létrehozására, amely eredmények a szakirodalmi, aktív rácsokra vonatkozó adatokkal összhangban állnak. Így tehát ezek a rácsok – viszonylagos egyszerű felépítésük ellenére – a jelenleg laboratóriumokban alkalmazott aktív turbulenciagenerátorokhoz viszonyítva költséghatékony alternatívát jelenthetnek.

10.SUMMARY

11. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK- TÉZISEK

TÉZIS I. Bizonyítást nyert, hogy létrehozható egy új típusú, fémszalagokat, mint aktív elemeket alkalmazó turbulencia-generáló rács, amelyhez az áramlási téren kívül elhelyezett merevítőkeret, továbbá arra rögzített szalagonkénti feszítőerő-beállítást biztosító csavarrugós feszítőszerkezet tartozik. Az alkalmazott, függőleges beépítésű szalagok síkjai passzív állapotban az áramlási tér hossz tengelyével párhuzamosak, ezért passzív esetben jelentéktelen mértékben zavarják meg az alapáramlást. Megfelelően nagy áramlási sebesség esetén a szalagok aktiválódnak, periodikus torziós mozgást végeznek, amely hatására jelentős mértékben növelhetők az áramló közeg turbulencia-jellemzői. A rács kiemelkedő előnye, hogy az alapáramlás energiáján kívül nem igényel semmilyen kiegészítő energiaforrást, mozgató szerkezetet.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák & Szabó 2013b; Szaszák & Szabó 2014a,b; Szaszák & Szabó 2015a,b; Szaszák et al. 2016; Szaszák et al. 2017a,b,c,d.

TÉZIS II. A kifejlesztett fémszalag-rács segítségével, annak aktív állapotában a rács passzív üzemállapotához képest jelentős mértékű turbulencia-fok és turbulens kinetikus energia növekedés hozható létre. Ez a vizsgált $U_{ref}=3\div 6$ m/s referenciasebesség-tartományon a ráctól mért $x/M=10\div 30$ távolság-intervallumban egyértelműen igazolható volt. Ezek alapján megállapítható, hogy a kifejlesztett fémszalag-rács, mint turbulenciagenerátor jelentős hatással van az áramlás turbulenciájára.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák & Szabó 2013b; Szaszák & Szabó 2014a,b; Szaszák & Szabó 2015a,b; Szaszák et al. 2016; Szaszák et al. 2017a,b,c,d.

TÉZIS III. A fémszalag-rács aktív állapotában a rácsot követő áramlási tér vizsgált ($x/M=10-30$) térrészében kialakuló turbulencia egydimenziós alapáramlás irányú energiaspektrumában szignifikánsan megjelenik a fémszalagok periodikus mozgására jellemző frekvenciának megfelelő hullámszámhoz tartozó lokális spektrális-energia maximum. Ezen eltérés a ráctól mért távolsággal együtt fokozatosan elhal és $x/M>25$ értékek esetén már nem jelentkezik. Az aktív elemként alkalmazott fémszalagok periodikus mozgásának frekvenciája jelentős mértékben függ a szalagokat feszítő erő nagyságától; a vizsgált feszítőerő-intervallum ($F=10\div 16$ N) esetén nagyobb feszítőerőkhöz rendre magasabb frekvenciaértékek tartoznak, a változás jellege jó közelítéssel ($R^2\sim 0,99$) lineáris.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák & Szabó 2015a; Szaszák et al. 2016; Szaszák et al. 2017a,b,c,d.

TÉZIS IV. Szisztematikus fejlesztési tevékenység eredményeképpen létrejött egy új típusú légsugar rács, amely esetén – az irodalomban ismert, légsugarat alkalmazó rácsok továbbfejlesztéseként – a légsugarak rugalmas csövecskéken keresztül lépnek be az áramlási térbe. A kiáramló levegő impulzusereje a csöveket intenzív mozgásba hozza, ezzel az időben változó irányú légsugarakkal a rács által indukált turbulencia jellemzői kedvező irányba változnak.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák 2012; Szaszák et al. 2012a; Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2018b; Szaszák et al. 2019.

TÉZIS V. A légsugár-rács mozgó elemeinek gyorskamerával felvett képsorai feldolgozás után megmutatták, hogy a préslevegővel működtetett turbulenciagenerátor aktív üzemiállapotában a mozgó elemek mozgásformái periodikus jellegűek. A mozgásra azonban jelenetős hatással van a szomszédos aktív elemek és az azokból kiáramló légsugarak interakciója. A rács aktív üzemiállapotában – a megfigyelt ($t=3,2$ s) időintervallumban – lineáris kapcsolat nem állt fenn a vizsgált szomszédos elemek között, azaz egymástól lineárisan függetlennek tekinthetők az aktív elemek pályagörbéi.

A tézishez kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018b.

TÉZIS VI. A légsugaras turbulenciagenerátorban alkalmazott aktív elemek aktivitása leírható három újonnan – a Buckingham π elmélet alapján – definiált dimenziómentes mennyiséggel. Ezek:

$C_r = w/d_{i,t}$, az aktív elem relatív falvastagsága (falvastagság/belső átmérő);

$C_a = l^*/d_{i,t}$, az aktív elem relatív hossza. Ebben az esetben l^* az aktív elem tömegközéppontjának az aktív csőszakasz kezdetétől mért távolsága;

$C_m = \rho_t E_t d_{i,t}^4 / \dot{m}_t^2$, mobilitási számnak elnevezett jellemző, amely az elem anyagtulajdonságait (anyagsűrűség, rugalmassági modulus), s fizikai dimenzióit továbbá az elem dinamikájáért felelős légtömegáramot is tartalmazza.

A tézishez kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018b.

TÉZIS VII. A kifejlesztett, rugalmas elemekkel felszerelt légsugaras rács növekvő aktiválása (a működtető préslevegő mennyiségének növelése) jelentős hatással volt az $x/M=10 \div 50$ mérőtér-tartományban, továbbá $U_{ref}=3 \div 6$ m/s referenciasebesség-intervallumban vizsgált, a szakirodalomban a rács-turbulencia jellemzésére elterjedten alkalmazott turbulenciát leíró paraméterekre. E hatások a rács passzív üzemiállapota esetén mértekhez arányítva az aktivitás növelésével a következőképpen alakultak:

- a.) Az alapáramlás irányú turbulenciafok az összes vizsgált esetben növekedett. A legkisebb arány (1,205) $U_{ref}=6$ m/s és $x/M=10$ esetén adódott, a legnagyobb (2,56) pedig $U_{ref}=3$ m/s és $x/M=50$ esetben.
- b.) A turbulens kinetikus energia minden esetben növekedett. A legkisebb arányszám (1,66) $U_{ref}=6$ m/s és $x/M=10$ esetén adódott, a legnagyobb (6,61) pedig $U_{ref}=3$ m/s és $x/M=50$ esetben.
- c.) A turbulens kinetikus energia disszipációs rátája a teljes vizsgálati tartományon, növekedett, míg a disszipációs konstans és a Kolmogorov-hosszskála értéke csökkent.
- d.) A Taylor-Reynolds-szám minden mérési esetben nőtt. A legkisebb arányszám (1,505) $U_{ref}=6$ m/s és $x/M=10$ esetén adódott, a legnagyobb arány (5,66) pedig $U_{ref}=6$ m/s és $x/M=10$ paraméterek esetén adódott.
- e.) Az egydimenziós, alapáramlás-irányú, normalizált energiaspektrumok alapján megállapítható, hogy azonos vizsgálati paraméterek esetén a rács aktiválása a passzív esetben kalkulálttól szélesebb, az elméleti, -5/3-os meredekségű görbét jobban közelítő tehetetlenségi tartományt eredményez.

A tézishez kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2018b.

TÉZIS VIII. A kifejlesztett légsugaras rács keveredés-intenzifikáló hatásának laboratóriumi vizsgálatára egy újonnan kifejlesztett hőkamerás mérési eljárás alkalmazható. Ennek alapja a rács előtt létrehozott inhomogén hőmérsékletmező változásának a rácsot követő mérőtérben hőkamerával történő vizsgálata. Az inhomogén hőmérsékletmező előállítása a rácsot megelőzően, az áramló levegő egy részének villamos fűtésével történik. A mérőtérben kialakuló áramlás adott keresztmetszetbeli hőmérsékletmezőjének meghatározásához egy, az alapáramlás irányára merőlegesen beépített – alacsony ellenállású - porózus emissziós-felület hőkamerával készített termogramja alkalmazható.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2019.

TÉZIS IX. A hőmérsékletmező homogenitásán alapuló keveredettségg-vizsgálatok a légsugaras rács passzív, fél-aktív és aktív állapotai esetén, $U_{ref}=1,5\div 3$ m/s sebességtartományban, $x/M=10\div 40$ távolság-intervallumban kerültek elvégzésre. Az egyes mérési esetekben s távolságokban készített termogramok alapján kalkulálhatók a leggyakoribb hőmérséklet-értékkel normalizált hisztogramok alakjai. Továbbá a hőmérséklet-adatokból számított torzultság-értékek egyértelmű kapcsolatban állnak a hőmérsékletmező homogenitásával. A normalizált hisztogramok alapján megállapítható, hogy a vizsgált esetekben a hőmérsékletmező homogénebbé tehető a rácstól mért távolság növelésével, az áramlási sebesség csökkentésével, továbbá a rács aktiválásával. Bármely vizsgált sebesség- és rács-mód beállítás esetén a távolság növelésével a torzultság-értékek monoton csökkennek. Adott sebesség és távolság mellett a rács aktiválásának növelése rendre csökkenő, míg adott rács-mód és távolság esetén növekvő sebességek rendre növekvő torzultság-értékeket eredményeznek.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2019.

12.GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁG ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A kifejlesztett rácsok eredményei igazolták, hogy mindkét rács esetén jelentős turbulencia-növekedés érhető el kis áramlási sebességek esetén. A szalag-rács előnye abban rejlik, hogy az aktiválásához nem szükséges külső energiaforrás, így tehát igen egyszerű felépítésű, s költséghatékonyan üzemeltethető. A szalag-rács hasznosíthatóságát mégis inkább olyan területen képzelem el, ahol a kialakított nagyobb intenzitású turbulencia keverési feladatokat láthat el. Ilyen alkalmazás lehet például poros gázokat – például pernyetartalmú füstgázokat – szállító csővezeték-hálózatba történő beépítés, ahol a csőhálózat bizonyos részein (például könyökökben, ívekben) porlerakódás vagy porcsóva alakulhat ki, amennyiben alacsony mértékű a turbulencia. A beépített rács által keltett intenzívebb turbulencia okán a porlerakódások megszüntethetők, továbbá a porcsóvák is szétverhetők, így védve a csőrendszert azok abrazív, koptató hatásától. Emellett acélszalagok alkalmazása esetén a rács viszonylag magas füstgázhőmérséklet esetén is beépíthető a rendszerbe. E rácsok által igényelt energiatöbbletet a csőrendszerbeli áramlást létrehozó ventilátor teljesítménytöbbletével lehet fedezni, így nem szükséges további rendszerelemek beépítése. A jövőben éppen ezért olyan vizsgálatokat is érdemes lehet elvégezni, amelyek esetén portartalmú gázt áramoltatunk keresztül a rácson annak aktív s passzív állapotában egyaránt. A rácsot követően a por kiülepedési fokából lehetne következtetni a rács ilyen célú felhasználhatóságára. Amennyiben a szalag-rácsot laboratóriumi vizsgálatokhoz, turbulencia generálásához kívánjuk alkalmazni, úgy a továbbfejlesztési irány az általa létrehozott turbulencia izotrópiájának javítását célzó megoldás lehetne. Ennek egyik módja a már megépített, függőleges irányultságú szalagokra merőleges, tehát vízszintes irányú szalag-rácsnak a jelenlegi rendszerhez történő hozzáillesztése.

A rugalmas elemeket tartalmazó légsugaras rács – annak meggyőző eredményei alapján – kifejezetten alkalmas a jelenleg alkalmazott aktív turbulenciagenerátorok helyettesítésére vagy kiváltására, hiszen számos esetben azokhoz hasonló paraméterekkel rendelkező turbulenciát képes produkálni. Ehhez a típusú rácshoz – annak működési elvéből adódóan – préslevegőre van szükség, így természetesen egy megfelelően méretezett légkompresszor is nélkülözhetetlen annak működtetéséhez, azonban a préslevegő mennyiségének szabályzásával beállítható a rács aktivitása, így a kialakuló turbulencia (bizonyos tartományon belüli) paraméterei is. E típusú rács – laboratóriumi alkalmazásához kapcsolódó – továbbfejlesztését az aktív elemek módosításában, átalakításában látom. A bemutatott szakirodalom alapján látható, hogy a legelterjedtebb, Makita-féle aktív rács működésének alapja a rács kitöltési tényezőjének (σ) időben történő gyors változtatása. Ezt az általam fejlesztett légsugaras rács felépítéséből adódóan csak kis mértékben képes variálni (a kis külső átmérőjű aktív elemek mozgásuk közben viszonylagosan kismértékben változtatják a rács geometriailag effektív kitöltési tényezőjét). Ennek növelése céljából érdemes lenne a jelenleg alkalmazott csövecskék aktív végei közelében azokra elhanyagolható tömegű testeket (például a tengelyüknél a csövekre illesztett 10-20 mm átmérőjű korongokat) rögzíteni. Ezzel a megoldással attól függően, hogy éppen milyen irányultságú az aktív elem, a vékony korongok vetülete a közel elhanyagolható és a teljes korong-keresztmetszet között változna. Ettől a fejlesztési megoldástól tehát jelentősen változó kitöltési tényező, s így még intenzívebb turbulencia várható. A légsugaras rács másik, általam is vizsgált alkalmazási területe különböző minőségű gázok intenzív keverése lehet. Aktív keverők számos ipari alkalmazás esetén előnyösen alkalmazhatók, ahol a

passzív keverőkhöz viszonyított rövidebb keveredési úthossz az elvárás. Az egyik módszer szerint akár az alapáramlásba (primer) a rácson való áthaladás előtt bevezetett szekunder gáz keverése lehet a cél magával a primer gázzal, esetleg egy tercier prés-gázzal; másik módszerként csupán az aktív elemekbe, mint prés-gáz is bevezethető az elkeverendő gáz, amely az alapáramlással intenzíven, rövid úthosszon keveredik el. Ezért a későbbiekben érdemes lenne más mérési módszerekkel is megvizsgálni, hogy milyen mértékű keveredés-intenzifikálás érhető el a légsugaras rács segítségével, s a keveredési fokot a szakirodalomban használt paraméterekkel (pl. keveredettségi-index (Danckwerts, 1952), vagy a relatív szórás (Pahl & Muschelknautz, 1982)) is célszerű lenne meghatározni ahhoz, hogy a rács ilyen irányú alkalmazhatóságát számszerűsíteni lehessen.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Magyar nyelven

Szaszák, N., Mátrai, Zs., Szabó, Sz.: “*Mini szélcsatorna sebességeloszlásának beállítása áramlásrendezők beépítésével.*” GÉP LXIII:(9), pp. 53-56. 2012b.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Légcsatorna fejlesztése turbulenciagenerátorok vizsgálatához.*” Proc. OGÉT 2013, XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Arad, Románia, pp. 372-375. 2013a.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Rugalmas szalagok, mint aktív turbulenciagenerátorok laboratóriumi vizsgálata.*” Multidiszciplináris tudományok vol. 3(2). pp. 327-336. 2013b.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Rugalmas szalagok alkalmazhatóságának vizsgálata turbulencia generálásához.*” Proc. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka (FMTÜ), Kolozsvár. pp. 365-368. 2014b.

Szaszák, N., Dorogi, D., Roloff, C., Thévenin, D., Szabó, Sz.: “*Turbulenciagenerátorban használt aktív elemek mozgásának vizsgálata nagysebességű kamera alkalmazásával.*” Multidiszciplináris tudományok vol. 4(1), pp. 103-114. 2014.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Új típusú, turbulencia-generáló aktív rács laboratóriumi vizsgálata állandó hőmérsékletű légsebességmérő technika alkalmazásával.*” A XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészak előadásai: Proceedings of the XXth International Scientific Conference of Young Engineers, Kolozsvár. pp. 279-282. 2015a.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Szélcsatornába beépített fémszalagrács után kialakuló áramlás vizsgálata hődrótos méréstechnika alkalmazásával.*” Proc. OGÉT 2015: XXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Csíksomlyó, Románia, pp.342-345, 2015b.

Szaszák, N., Szabó, Sz., Bencs, P.: “*Aktív rács keltette turbulencia jellemzőinek meghatározása hődrótos adatok alapján.*” Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok vol. 12(4), pp. 103-111. 2017d.

Idegen nyelven

Szaszák, N.: “*Experimental characterization of a cost-effective active grid for turbulence generation.*” diplomamunka, Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszék („Otto von Guericke” University of Magdeburg), 2012.

Szaszák, N., Bordás, R., Mátrai, Z., Thévenin, D., and Szabó, S., “*Experimental characterization of a cost-effective semi-active grid for turbulence stimulation.*” Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF’12), Budapest, Hungary, pp. 362-368. 2012a.

Szaszák, N.: “*Development of small size wind tunnel for investigation of turbulence generators.*” Tavaszi Szél Konferencia, Sopron, pp. 218-225. 2013.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Experimental study of elastic tapes in wind tunnel as turbulence generator.*”, 28th microCAD Nemzetközi Multidiszciplináris Tudományos Konferencia, Miskolc, Magyarország, pp. 9-17. 2014a.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Effects of tension of fluttering tapes on turbulent flow properties downstream of an active grid*”, 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESAT 2016), Matlárháza, Szlovákia, pp. 1-9. 2016.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Experimental investigation of the effects of tensile force on the characteristics of turbulence downstream of a novel active grid.*” Advances and Trends in

Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, CRC Press/Balkema, pp. 261-266. 2017a.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Determining turbulent properties in grid generated turbulence based on hot-wire data.*” International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH, Ljubljana, Szlovénia, pp. 149-152. 2017b.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Influence of flat tape grid on the turbulence properties of airflow in a wind tunnel.*” International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH, Ljubljana, Szlovénia, pp. 149-152. 2017c.

Szaszák, N., Szabó, Sz., Bencs, P.: “*Enhancement of mixing in gas medium by means of active turbulence generator.*” 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESAT 2018. Matlárháza, Szlovákia, pp. 1-4. 2018a.

Szaszák, N., Roloff, C., Bordás, R., Bencs, P., Szabó, S, Thévenin, D.: “*A novel type of semi-active jet turbulence grid.*” *Heliyon*, vol.?(?), pp.?-?. 2018b. [Folyóíráshoz benyújtott cikk, várható megjelenés: 2018.](#)

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Intensification of turbulent mixing in gases by means of active turbulence grid.*” *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies*, CRC Press/Balkema, pp. 2019. [Közlésre elfogadott cikk, várható megjelenés: 2019.](#)

A SZERZŐ EGYÉB TÉMÁKBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓI

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Szárnykerekes mérőt tartalmazó áramlásmérő szakasz kalibrációja erre a célra létrehozott mérőberendezéssel." Proc. OTDK 2011 Baja, XXX. Jubileumi Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Baja, pp. 161.(kivonatolt). 2011.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Elemző számítások Stockholm és Csíkszereda városban rendelkezésre álló napenergia hasznosítására." Proc. OGÉT 2011, XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Csíkszereda, Románia, pp. 339-342. 2011.

Lakatos, K., Szaszák, N., Mátrai, Zs., Soltész, L., Szabó, Sz.: "Experimental development of guide vanes and return guide vanes of a mini blower." Proc. MicroCAD 2011, International Computer Science Conference, Miskolc, pp. 65-72. 2011.

Lakatos, K., Szaszák, N., Mátrai, Zs., Szabó, Sz.: "Monoblokk rendszerű mini fűvó vezető és visszavezető kerekei kialakításának analízise méréssel." Szivattyúk, kompresszorok, Vákuumszivattyúk vol. 18, pp. 65-71. 2011.

Mátrai, Zs., Szaszák, N.: "LDV measurement uncertainties in an artificial aneurysm model." Gépészet 2012. Proc. of the Eighth International Conference on Mechanical Engineering. Budapest, pp. 330-336. 2012.

Mátrai, Zs., Roloff, C., Bordás, R., Szaszák, N., Szabó, Sz., Thévenin, D.: "Investigation of the velocity field in a full-scale artificial medical model." Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12). The 15th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, pp. 136-143. 2012.

Mátrai, Zs., Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Measuring of Velocity field in an Artificial Model." Proc. MicroCAD '13 International Computer Science Conference, Miskolc, paper Nr. 4. pp. 1-6. 2013.

Roloff, C., Bordás, R., Nickl, R., Mátrai, Zs., Szaszák, N., Szabó, Sz., Thévenin, D.: "Investigation of the velocity field in a full-scale model of a cerebral aneurysm." International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 43: pp. 212-219. 2013. **SCOPUS-indexált; 3 független hivatkozás**

Bodnár, I., Szaszák, N.: „Gőztől a benzinig, benzintől a fagázig, avagy a fagázüzemű gépek fejlődéstörténete.” Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT): VIII. Tudomány- és Technikatörténeti Konferencia, Belényes, Románia, pp. 25-31. 2015.

Koós, D., Szaszák, N., Bodnár, I., Boldizsár, Cs.: "Temperature dependence of solar cell's efficiency." Acta Technica Corviniensis- Bulletin of Engineering vol. 9(2), pp. 107-110. 2016.

Boldizsár, Cs., Bodnár, I., Szaszák, N., Koós, D.: „Designing procedure of innovative photovoltaic solar water heater system.” Acta Technica Corviniensis- Bulletin of Engineering vol. 9(2), pp. 71-74. 2016.

IRODALOMJEGYZÉK

- Ahmadi-Baloutaki, M., Carriveau, R., Ting, D. S.-K.: “*Performance of a vertical axis wind turbine in grid generated turbulence.*” Sustainable Energy Technologies and Assessments vol. 11 pp.178-185. 2015.
- Antonia, R. A., Lavoie, P., Djenidi, L., Benaissa, A.: “*Effect of a small axisymmetric contraction on grid turbulence.*” Experiments in Fluids vol. 49:1, pp. 3-10. 2010.
- Aufderheide, T., Bode, C., Friedrichs, J., Kozulovic, D.: “*The generation of higher levels of turbulence in a low-speed cascade wind tunnel by pressurized tubes.*” 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014.
- Bayly, B. J., Orszag, S. A., Herbert, T.: “*Instability mechanisms in shear-flow transition.*” Annual review of fluid mechanics, vol. 20(1), pp. 359-391. 1988.
- Bedat, B., Cheng, R. K.: “*Experimental study of premixed flames in intense isotropic turbulence.*” Combustion and Flame vol. 100(3), pp. 485-494. 1995.
- Blanchet, G., Charbit, M.: “*Digital Signal and Image Processing using MATLAB*” könyv, ISTE Ltd. 2006.
- Boquillon, O., Glegg, S., Larssen, J. V., Devenport, W. J.: “*The Interaction of Large Scale Turbulence with a Cascade of Flat Plates.*” 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit. 2003.
- Bordás, R., Hagemeyer, T., Wunderlich, B., Thévenin, D.: “*Droplet collisions and interaction with the turbulent flow within a two-phase wind tunnel.*” Physics of Fluids vol. 23(085105), pp. 1-11. 2011.
- Bordás, R., Roloff, C., Thévenin, D., Shaw, R.: “*Experimental determination of droplet collision rates in turbulence.*” New Journal of Physics vol. 15(045010), pp. 1-31. 2013.
- Bradshaw, P.: “*An introduction to turbulence and its measurement: thermodynamics and fluid mechanics series.*” Elsevier. 2013.
- Brand, L.: “*The Pi theorem of dimensional analysis.*” Archive for Rational Mechanics and Analysis, vol. 1(1), pp. 35-45. 1957.
- Burattini, P., Lavoie, P., Antonia, R. A.: “*Velocity derivative skewness in isotropic turbulence and its measurement with hot wires.*” Experiments in fluids, vol. 45(3), pp. 523-535. 2008.
- Cekli, H. E., Water, W. v. d.: “*Tailoring turbulence with an active grid.*” Exp. Fluids vol. 49, pp. 409-416. 2010a.
- Cekli, H. E., Tipton, C., Water, W. v.d.: “*Resonant enhancement of turbulent energy dissipation.*” Phys Rev Lett vol. 105(4), pp. 503. 2010b.
- Chiekh, M. B., Bera, J.-C., Sunyach, M.: “*Synthetic jet control for flows in a diffuser: vectoring, spreading and mixing enhancement.*” Journal of Turbulence vol. 4(32) pp.1-12. 2003.
- Coffey, C. J., Hunt, G. R., Seoud, R. E., Vassilicos, J. C.: “*Mixing effectiveness of fractal grids for inline static mixers.*” Imperial College London. 2007.
- Charnay, G.: “*Etude d'une couche limite perturbée par une turbulence extérieure.*” Ecole Centrale de Lyon, Lab. de Mécanique des Fluides. Ph.D. Thesis. 1969.

- Comte-Bellot, G., Corrsin, S.: “*The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence.*” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 25(4), pp. 657-668. 1966.
- Comte-Bellot, G.: “*Simple eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated, isotropic turbulence.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 48(2), pp. 273-337. 1971.
- Comte-Bellot, G.: “*Hot-Wire anemometry.*” *Annu. Rev. Fluid Mech.* vol. 8, pp. 209-231. 1976.
- Danckwerts, P. V.: “*The definition and measurement of some characteristics of mixtures.*” *Applied Scientific Research, Section A* vol. 3(4), pp. 279-296. 1952.
- Danesh-Yazdi, A. H., Goushcha, O., Elvin, N., Andreopoulos, Y.: “*Fluidic energy harvesting beams in grid turbulence.*” *Experiments in Fluids* vol. 56(161). 2015.
- Davidson, L.: “*Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling.*” Division of Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. 2014.
- Discetti, S., Ziskin, I. B., Astarita, T., Adrian, R. J., Prestridge, K. P.: “*PIV measurements of anisotropy and inhomogeneity in decaying fractal generated turbulence.*” *Fluid Dyn. Res.* vol. 45, 22pp. 2013.
- Djenidi, L., Tardu, S. F.: “*On the anisotropy of a low-Reynolds-number grid turbulence*” *J. Fluid Mech.*, vol. 702, pp. 332-353. 2012.
- Djenidi, L., Tardu, S., Antonia, R. A.: “*On the ergodicity of grid turbulence.*” 8th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-8) Poitiers, France. 2013.
- Evans, J. D.: “*Straightforward statistics for the behavioral sciences.*” Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing. 1996.
- Fischer, A., Lutz, T., Krämer, E., Cordes, U., Hufnagel, K., Tropea, C., Kampers, G., Hölling, M., Peinke, J.: “*Numerical and experimental investigation of an airfoil with load control in the wake of an active grid.*” *Journal of Physics: Conference Series* vol. 753, pp 1-10. 2016.
- Fransson, J. H. M., Alfredsson, P. H.: “*On the disturbance growth in an asymptotic suction boundary layer.*” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 482, pp. 51-90. 2003.
- Fransson, J. H. M., Matsubara, M., Alfredsson, P. H.: “*Transition induced by free-stream turbulence.*” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 527 pp. 1-25. 2005.
- Gad-el-Hak, M., Corrsin, S.: “*Measurements of the nearly isotropic turbulence behind a uniform jet grid.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 62(1), pp. 115-143. 1974.
- Ghanem, A., Lemenand, T., Valle, D. D., Peerhossaini, H.: “*Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review.*” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92(2), pp. 205-228. 2014.
- Goepfert, C., Marié, J.L., Chareyron, D., and Lance, M.: “*Characterization of a system generating a homogeneous isotropic turbulence field by free synthetic jets.*” *Experiments in Fluids* vol. 48(5), pp. 809-822. 2010.
- Guillon, O.: “*Essais de mise au point d’une grille active à grandes mailles.*” Ecole Centrale de Lyon, Lab. de Mécanique des Fluides, Ph.D. Thesis. 1968.
- Hobbs, D. M., Muzzio, F. J.: “*The Kenics static mixer: a three-dimensional chaotic flow.*” *Chemical Engineering Journal*, vol. 67(3), pp.153-166. 1997.

- Hurst, D., Vassilicos, J. C.: “*Scalings and decay of fractal-generated turbulence.*” *Phys. Fluids* vol. 19(035103). 2007.
- Hwang, W., Eaton, J.K.: “*Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow.*” *Experiments in Fluids* vol. 36(3), pp. 444-454. 2004.
- Jørgensen, F. E.: “*How to measure turbulence with hot-wire anemometers- a practical guide.*” Dantec Dynamics, Dánia, 2002.
- Kang, H.S., Chester, S., Meneveau, C.: “*Decaying turbulence in an active-grid-generated flow and comparisons with large-eddy simulation.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 480, pp. 129-160. 2003.
- Kistler, A. L., Vrebalovich, T.: “*Grid turbulence at large Reynolds numbers.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 26(1), pp. 37-47. 1966.
- Knebel, P., Peinke, J.: “*Active grid generated turbulence.*” *Advances in Turbulence XII*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 903. 2009.
- Kolmogorov, A. N.: “*The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers.*” *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 434. 1890.
- Krogstad, P.A.: “*Turbulent decay in the near field of multi-scale and conventional grids.*” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 35, pp. 102-108. 2012.
- Kundu, P. K.: Cohen, I. M.: “*Fluid Mechanics.*”, 2nd Ed. Academic Press. 2002.
- Kurian, T., Fransson, J. H. M.: “*Grid-generated Turbulence revisited.*” *Fluid Dyn. Research*, vol. 41, pp 1-32. 2009.
- Laizet, S., Vassilicos, J. C.: “*Stirring and mixing by grid-generated turbulence in the presence of a mean scalar gradient.*” *International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-8) Poitiers, France*. 2013.
- Larsen, J. V., Devenport, W. J.: “*The Generation of High Reynolds Number Homogeneous Turbulence.*” 32nd American Institute of Aeronautics and Astronautics: Fluid Dynamics Conference and Exhibit, pp. 1-7. 2002.
- Larsen, J.V., Devenport, W.J.: “*On the generation of large-scale homogeneous turbulence.*” *Experiments in Fluids* vol. 50, pp. 1207-1223. 2011.
- Lavoie, P., Antonia, R. A., Djenidi, L.: “*Effect of Grid Geometry on the Scale-By-Scale Budget of Decaying Grid Turbulence.*” 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, University of Sydney, Sydney, Australia, pp. 13-17. 2004.
- Lavoie, P., Avallone, G., De Gregorio, F., Romano, G. P., Antonia, R. A.: “*Spatial resolution of PIV for the measurement of turbulence.*” *Exp. Fluids*, vol. 43, pp. 39-51. 2007.
- Laws, E. M., Livesey, J. L.: “*Flow through Screens.*” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 10, pp. 247-266. 1978.
- Lesieur, M.: “*Turbulence in Fluids.*” Fourth Revised Edition, Fluid Mechanics and Its Applications, vol. 84. 2008.
- Ling, S. C. & Wan, C. A.: “*Decay of isotropic turbulence generated by a mechanically agitated grid.*” *Phys. Fluids* vol. 15(8), pp. 1363-1369. 1972.

- Liu, J. C. H., Greber, I., Wiskind, H. K.: “*Experimental measurements of grid injection turbulent flows.*” Case Western Reserve University Tech. Rep. FTAS/TR-70-53. 1971.
- 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, pp. 1164-1171. 2007.
- Lohász, M. M., Régert, T.: “*Turbulencia és modellezése jegyzet*” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék, Budapest. 2010.
- Luxenberg, D. S., Wiskind, K.: “*Some effects of air injection on the turbulence generated by a bi-planar grid.*” Case Western Reserve University Tech. Rep. FTAS/TR-69-42. 1969.
- Makita, H., Miyamoto, S.: “*Generation of high intensity turbulence and control of its structure in a low speed wind tunnel.*” Proc. 2nd. Asian Congress on Fluid Mechanics Beijing, China, pp. 101-106. 1983.
- Makita, H.: “*Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel.*” *Fluid Dynamics Research* vol. 8, pp. 53-64. 1991.
- Makita, H., Sassa, K.: “*Active turbulence generation in a laboratory wind tunnel.*” *Advances in Turbulence* vol. 3, pp. 497-505. 1991.
- Makita, H., Sekishita, N.: “*Wind tunnel experiments of large-scale turbulence generated by a turbulent shear flow generator.*” The 4th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006), Yokohama, pp. 857-860. 2006.
- Marshall, A.: Venkateswaran, P., Noble, D., Seitzman, J., Lieuwen, T.: “*Development and characterization of a variable turbulence generation system.*” *Experiments in Fluids*, vol. 51(611). 2011.
- Mathieu, J., Alcaraz, E.: “*Réalisation d’une soufflerie à haut niveau de turbulence.*” *CR. Acad. Sci.* vol. 261(2435). 1965.
- Mohamed, M. S.: LaRue, J. C., “*The decay power law in grid-generated turbulence.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 219, pp. 195-214. 1990.
- 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, pp. 225-240. 2006.
- Ozono, S., Miyagi, H., Wada, K.: “*Turbulence generated in active grid mode using a multi-fan wind tunnel.*” *Journal of Fluid Science and Technology* vol 2(3), pp 643-654. 2007.
- Pahl, M.H., Muschelknautz, E.: “*Static mixers and their applications.*” *Int. Chem. Eng.* vol. 22 p. 197. 1982.
- Pennycuik, C., J., Alerstam, T., Hedenström, A.: “*A new low-turbulence wind tunnel for bird flight experiments at Lund University, Sweden.*” *Journal of Experimental Biology* vol. 200, pp.1441-1449.1997.
- Pinker, R. A., Herbert, M. V.: “*Pressure loss associated with compressible flow through square-mesh wire gauzes.*” *J. Mech. Eng. Sci.*, vol 9(1), pp.11-23. 1967.
- Podráczi, R.: “*Turbulencia-generáló rácsok szakirodalmi áttekintése, a rácsok után kialakuló áramlási paraméterek vizsgálatához alkalmazható PIV és LDV mérés technika bemutatása.*” komplex feladat, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke. 2015.

- Pope, S. B.: *"Turbulent Flows."* Cambridge Univ. Press. 2000.
- Reynolds, O. F. R. S.: *"XXIX. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels."* Phil. Trans. R. Soc. Lond. vol. 174, pp. 935-982. 1883.
- Richardson, L. F.: *"Weather Prediction by Numerical Process."* Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1922.
- Roach, P. E.: *"The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids."* Int. J. Heat Fluid Flow vol. 8, pp. 82-92. 1987.
- Saarenrinne, P., Piirto, M.: *"Turbulent kinetic energy dissipation rate estimation from PIV velocity vector fields."* Experiments in Fluids, Springer-Verlag, vol. 29(S1), pp 300-307. 2000.
- Saffman P. G.: *"Vortex interactions and coherent structures in turbulence."* Transition and turbulence, pp. 149-166. 1981.
- Sakai, Y., Watanabe, T., Kamohara, S., Kushida, T., Nakamura, I.: *"Simultaneous measurements of concentration and velocity in a CO₂ jet issuing into a grid turbulence by two-sensor hot-wire probe."* International Journal of Heat and Fluid Flow vol 22(3), pp. 227-236 2001.
- Sato, H., Saito, H.: Proc. 6th Turbulence Symposium, vol. 103. 1974.
- Schlichting, H., Kestin, J.: *"Boundary layer theory."* 4th ed. New York, MacGrawHill. 1960.
- Shavit, U., Chigier, N.: *"Development and evaluation of a new turbulence generator for atomization research."* Exp. in Fluids vol. 20, pp. 291-301. 1995.
- Simmons, L. F. G., Salter, C.: *"Experimental investigation and analysis of the velocity variations in turbulent flow."* Proceedings of the Royal Society of London. Series A vol. 145(854), pp. 212-234. 1934.
- Tassa, Y., Kamotani, Y.: *"Experiments on turbulence behind a grid with jet injection in downstream and upstream direction."* Phys. of Fluids vol. 18(4), pp. 411-414. 1975.
- Teunissen, H. W.: *"An ejector-driven wind tunnel for the generation of turbulent flows with arbitrary mean velocity profile."* UTIAS Tech. Note 133, University of Toronto. 1969.
- Thole, K. A., Bogard, D. G., Whan-Tong, J. L.: *"Generating high freestream turbulence levels."* Exp. in Fluids vol.17, pp. 375-380. 1994.
- Thormann, A., Meneveau, C.: *"Decay of homogeneous, nearly isotropic turbulence behind active fractal grids."* Physics of Fluids vol. 26(025112), pp. 1-28. 2014.
- Tuoc T. K.: *"A theory of turbulence, Part 1: Towards solutions of the Navier-stokes equations."* arXiv preprint: 0910.2072. 2009.
- Taylor, G. I.: *"The Spectrum of Turbulence."* Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 164, no. 919, pp. 476-490. 1938a.
- Taylor, G. I.: *"Production and dissipation of vorticity in a turbulent fluid."* Proceedings of the Royal Society of London. A 164, pp. 15-23. 1938b.
- Thompson, S. M., Turner, J. S.: *"Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid."* Journal of Fluid Mechanics, vol. 67(2), pp. 349-368. 1975.

- Townsend, A. A.: “*The uniform distortion of homogeneous turbulence.*” *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 7(1), pp. 104-127. 1954.
- Tsinober A.: “*An informal introduction to turbulence.*” Springer Science & Business Media, vol. 63. 2001.
- Uberoi, M.S.: “*Energy transfer in isotropic turbulence.*”, *Physics of Fluids* vol. 6(8), pp. 1048-1056. 1963.
- Valente, P. C., Vassilicos, J. C.: “*The decay of turbulence generated by a class of multiscale grids.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 687, pp. 300-340. 2011.
- VDE/VDI-Richtlinien VDE/VDI 3513: “*Schwebekörper-Durchflussmesser: Berechnungsverfahren.*” VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf. 1971.
- Verbeek, A. A., Pos, R. C., Stoffels, G. G., Geurts, B. J., van der Meer, T. H.: “*A compact active grid for stirring pipe flow.*” *Experiments in fluids*, vol. 54(10), 1594. 2013.
- Villermaux, E., Gagne, Y., Hopfinger, E. J., Sommeria, J.: “*Oscillatory instability and genesis of turbulence behind a high solidity grid.*” *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, vol. 10(4), pp. 427-439. 1991.
- Vonlanthen, R., Monkewitz, P.A.: “*A novel tethered-sphere add-on to enhance grid turbulence.*” *Experiments in Fluids* vol. 51, pp. 579-585. 2011.
- Weitemeyer, S., Reinke, N., Peinke, J., Hölling, M.: “*Multi-scale generation of turbulence with fractal grids and an active grid.*” *Fluid Dynamics Research*, vol. 45(6), 061407. 2013.
- Yakhot, V., Orszag, S. A.: “*Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory.*” *Journal of Scientific Computing*, vol. 1(1), pp 3-51. 1986.
- Yoshioka, S., Fransson, J. H. M., Alfredsson, P. H.: “*Free stream turbulence induced disturbances in boundarylayers with wall suction.*” *Phys. Fluids* vol. 16, 3530. 2004.
- Zhou, Y., Nagata, K., Sakai, Y., Suzuki, H., Ito, Y., Terashima, O., Hayase, T.: “*Relevance of turbulence behind the single square grid to turbulence generated by regular- and multiscale-grids.*” *Phys. Fluids* vol. 26, 075105. 2014.

Ábrajegyzék

1. ábra A levegőmeztáplálással ellátott prototípus-rács a rajta elhelyezett rugalmas csövecskékkel (a szabad végükön extra súlyokkal).	12
2. ábra A kezdeti vizsgálatokhoz használt rendszer felépítése.	13
3. ábra A turbulenciafok alakulása a rács után passzív és aktív esetben. A piros görbék a rácsból adott távolságban, függőleges irányban kiértékelte adatokat kötik össze. (Szaszák 2012).	14
4. ábra A turbulens kinetikus energia-értékek aránya (k_a/k_p) a vizsgálat síkrészben (Szaszák, 2012).	15
5. ábra Hagyományos és önazonos mintázatú passzív rácsok. a.) kétsíkú, négyzetes rudakból álló rács (Podráczki, 2015); b.) kör alakú perforációval ellátott lemezlap (Ahmadi-B et al., 2015; Liu et al., 2007); c.) I-mintázatú önazonos rács (Discetti et al., 2013); d.) négyzetes fraktálrács (Laizet & Vassilicos, 2013).	19
6. ábra Makita-típusú aktív turbulenciagenerátor (Makita & Sekishita, 2006).	20
7. ábra Elméleti spektrális energiaeloszlás kifejlett turbulencia esetén.	26
8. ábra A CTA mérés technika mérési lánc.	28
9. ábra Az első szélcsatorna-összeállítás rajza, továbbá a fényképe.	31
10. ábra A rezgőszalagos rács vizsgálatához összeállított szélcsatorna.	32
11. ábra A végleges áramlásrendező-variációt tartalmazó szélcsatorna-szakasz.	33
12. ábra A két csőköteget tartalmazó variáció eredményei adott ventilátor-fordulatszám esetén.	33
13. ábra A szélcsatornába épített műanyag szalagos rács a csavaros feszítőszerkezettel.	36
14. ábra A passzív és az aktív rács keltette turbulencia-fok alakulása, továbbá a rezgő szalagokról készült hosszú expozíciós idejű felvétel.	37
15. ábra A vízszintes középértékben mért turbulencia-fok értékek, s a rájuk fektetett regressziós görbék.	37
16. ábra A csatornába épített acélszalag-rács a csavaros feszítőszerkezettel s a szalagon kialakított, forrasztással megerősített furat.	39
17. ábra Az erőmérőkkel ellátott rács 2- és 3 dimenziós rajzai.	40
18. ábra A rács síkjával párhuzamos vonalakban mért jellemzők $F=20N$ feszítettségű szalagok esetén: a.) átlagsebesség; b.) turbulencia-intenzitás; c.) izotrópia-arány. Jelölés: függőleges vonalban számított értékek: \times ; vízszintes vonalban kapott eredmények: -.....	41
19. ábra Izotrópia-arány a vizsgált mérési esetekben.	42
20. ábra A turbulencia-fok alakulása az egyes mérési esetekben.	43
21. ábra A turbulens kinetikus energia alakulása az egyes mérési esetekben (lin-log skála). Számértékek: az aktív esetekhez tartozó görbékre illesztett hatványfüggvények kitevői.	44
22. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának (ϵ) értékei az egyes mérési esetekben.	44
23. ábra A Kolmogorov-hosszskála alakulása a vizsgált passzív és aktív esetekben.	45
24. ábra A Taylor-Reynolds szám alakulása az egyes mérési esetekben.	45
25. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok, és a $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbék. a.) $U_{ref}=5$ m/s és $F=10$ N feszítőerő esetén; b.) $U_{ref}=6$ m/s és $F=20$ N feszítőerő esetén. Mindkét esetben $x/M=10-15-20-25-30$ helyen, a középvonalban mért eredmények. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.	46
26. ábra Az egyik rezgő szalag kamerával rögzített, időben egymást követő pillanatképei (olvasási rendben).	47

27. ábra A szalagok rezgési frekvenciái (f_{sz}): a.) a rezgési frekvencia a feszítőerő függvényében, állandó U_{ref} esetén; b.) a rezgési frekvencia a referenciasebesség függvényében, állandó F esetén. Jelmagyarázat a diagramokon található.	48
28. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok $U_{ref}=5$ m/s esetén $x/M=10$ és $x/M=30$ pozíciókban, továbbá a $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbe. Ez esetben a feszítőerő volt variálva. Jelmagyarázat: '—' $F=5$ N; '- -' $F=10$ N; '- - -' $F=15$ N; '- - - -' $F=20$ N. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve. .	49
29. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok $F=10$ N feszítőerő esetén, $x/M=10$ pozícióban, továbbá a $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbe. Jelmagyarázat: '—' $U_{ref}=4$ m/s; '- -' $U_{ref}=5$ m/s; '- - -' $U_{ref}=6$ m/s. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.	49
30. ábra Az első gyorskamera-vizsgálatokhoz összeállított rács.	51
31. ábra A bordó csővég t időpillanatbeli pozíciójának keresése a t_0 idején készített képen lévő pozícióhoz képest. Sárga keret: a keresési intervallum, piros keret: bordó pixeleket számláló, soronként és oszloponként pixelről pixelre végigszaladó keresőablak (Szaszák et al., 2014).	52
32. ábra A vizsgált csővégek pixel-elmozdulásai egy-egy képkocka között. A rács osztása 5 pixelnek felel meg. (Szaszák et al., 2014).....	53
33. ábra Hat különböző színű csővég által bejárt pályák arányos nyomvonalai a $0\div 500$ ms időintervallumban. Az egyes pályák a jobb áttekinthetőség miatt alkalmasan el lettek tolva.	54
34. ábra A narancssárga csővég pályáformái különböző időintervallumokban (a vízszintes és függőleges koordináták mm-ben).....	54
35. ábra A piros csővég átlagos pozíciójához viszonyított y és z irányú kitérései az idő függvényében, $0\div 500$ ms időintervallumban. Jelmagyarázat: vízszintes irányú kitérés: \circ ; függőleges irányú kitérés: \times	55
36. ábra A fehér színű csővég $1\div 500$ ms intervallumban befutott pályája (bal oldal) és a pálya középpontjától mért y és z irányú kitérések az idő függvényében, az egyes ütközéseket szemléltető képkivágásokkal (jobb oldal). Jelmagyarázat: vízszintes irányú kitérés: \circ ; függőleges irányú kitérés: \times	56
37. ábra Különböző aktív elemek végeinek sebesség-idő függvénye az $1\div 250$ ms-os intervallumban. Jelmagyarázat: lila színű csővég: $*$; világoszöld csővég: \square ; piros csővég: \times ; sötétzöld csővég: \diamond ; narancssárga csővég: $+$	56
38. ábra A gyorskamerás és a turbulencia-vizsgálatokhoz használt rács részlete.....	58
39. ábra A letakarás nélküli, sötét részeket is tartalmazó képkocka (bal oldal) és a szürke színű letakarással készített kép (jobb oldal).	59
40. ábra A két vizsgált csővég mozgásának nyomvonalai 3,2 másodperces időintervallumban.	60
41. ábra A vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer.	64
42. ábra Az izotrópia-arány (i) passzív és aktív esetben. a.) a mérőtér középvonalában mért eredmények a rácstól mért távolság függvényében; b.) $x/M=20$ távolságban, $U_{ref}=4$ m/s sebességnél, aktív rács esetén kapott értékek vízszintes (\times) és a függőleges (\circ) irányokban. Jelmagyarázat: üres jelölök: passzív eset, teli jelölök: aktív eset. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.	68
43. ábra Az áramlás homogenitása: a pontbeli átlagsebességek referenciasebességhez viszonyított aránya. Jelmagyarázat: üres jelölök: passzív eset, teli jelölök: aktív eset. Négyzet: $x/M=20$; kör: $x/M=50$	69
44. ábra a.) A turbulenciafok (T_u) alakulása a rácstól mért távolság függvényében. Passzív eset: üres jelölök; aktív eset: teli jelölök. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram:	

$U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s; folytonos vonal: $Tu = 1,13 \cdot (x/D) - 5/7$. b.) Az aktív és a passzív esethez tartozó értékpárok aránya.....	70
45. ábra a.) A turbulens kinetikus energia alakulása a rácstól mért távolság függvényében (log-log skála). Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. b.) Az aktív és a passzív értékpárok aránya. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.....	71
46. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának (ϵ) alakulása a rácstól mért távolság függvényében. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.....	72
47. ábra A disszipációs konstans (C_ϵ) alakulása a mérőtér középvonalában, log-log skálán ábrázolva. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.....	73
48. ábra A Kolmogorov-hosszskála (η) alakulása a mérőtér középvonalában. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.	74
49. ábra a.) A Taylor-Reynolds-számok alakulása a szélcsatorna középvonalában. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. b.) az aktív és a passzív értékpárok aránya. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s.....	75
50. ábra a.) Alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum $x/M=30$ pozícióban. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög: $U_{ref}=3$ m/s; négyszög: $U_{ref}=4$ m/s; pentagram: $U_{ref}=5$ m/s; hexagram: $U_{ref}=6$ m/s. b.) Normalizált, alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum $U_{ref}=6$ m/s esetén. Jelölés: $x/M=30$ (+), 40 (o), 50 (x). Passzív mód: folytonos vonalak; aktív mód: szaggatott vonalak. Mindkét diagramon a fekete egyenes a $-5/3$ -os kitevőjű hatványfüggvény meredekségét szemlélteti (log-log skála).....	76
51. ábra A hőkamerás mérésekhez összeállított mérőrendszer vázlata.....	79
52. ábra Termogramok a rácstól mért $x=10M$ távolságban, $U_{ref}=1,5$ m/s esetén a három vizsgált rác-állapotban, azonos hőmérsékleti skálázással ($^{\circ}C$). a.) $p_g=0$ hPa (passzív eset); b.) $p_g=250$ hPa (fél-aktív eset); c.) $p_g=500$ hPa (aktív eset).....	82
53. ábra A módusszal normalizált termogramok a rácshoz legközelebbi ($x=10M$) és legtávolabbi ($x=40M$) mérési síkokban $U_{ref}=1,5$ m/s és $U_{ref}=3$ m/s sebességek esetén, a rác passzív (a) és aktív (c) állapotaiban.	83
54. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők hisztogramjai passzív (P) és aktív (A) esetekben $U_{ref}=1,5$ m/s átlagsebesség esetén, a rácstól mért $x=10M-20M-30M-40M$ távolságokban lin-log skálázással. Jelmagyarázat: a diagramon feltüntetve.	84
55. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők hisztogramjai passzív, fél-aktív és aktív esetekben $U_{ref}=1,5$ m/s és $U_{ref}=3$ m/s átlagsebességek esetén, a rácstól mért $x=10M$ távolságokban lin-log skálázással. Jelmagyarázat: a diagramon feltüntetve.	85
56. ábra Torzultság-értékek az összes vizsgált mérési esetben és síkban. Jelmagyarázat: kék körök: passzív rác, sárga körök: fél-aktív rác, piros körök: aktív rác, továbbá az azonos színű csoportok elemei a rácstól mért távolság függvényében ábrázolva.	86