



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET
ATOMENERGETIKA TANSZÉK

Nukleáris üzemanyag kazetta távtartó rácson alkalmazható rendhagyó keverőelem geometriák hatásának vizsgálata PIV módszerrel

Hallgató:

Szegedi-Csinády Csongor

Energetikai Mérnök BSc 3. évf.

Atomenergetika Specializáció

Konzulens:

Dr. Orosz Gergely Imre

Egyetemi adjunktus

Nukleáris Technikai Intézet

2025. április



Kivonat

Az energetikai reaktorok megjelenésétől és kereskedelmi alkalmazásától kezdve az üzembiztonság garantálása vált a berendezések fő szempontjává. Ez az irányelv kiterjed a tervezésre, kivitelezésre és az üzemeltetésre is. A megbízható termelést lehetővé tevő paraméterek közül az egyik legfontosabb és legjelentősebb a zónából történő megfelelő hőelvonás, és ennek hiányára vezethető vissza a nukleáris balesetek túlnyomó többsége. Ez biztosítja a reaktort felépítő komponensek szerkezeti integritását, nemkívánatos reakciók és elválások megelőzését valamint a forráskrizis elkerülését, mindezek pedig kiemelt jelentőséggel bírnak a biztonságos, szakadatlan üzemelés megvalósításában. Napjaink kereskedelmi reaktoraiban, szinte kivétel nélkül, a hőfelszabadulás üzemanyag pálcákban valósul meg. A pálcákból az atomreaktor típusának megfelelő rácsosztású üzemanyag kazettákat hoznak létre. A pálcaköteg összefogását távtartó rácsok végzik, amik a legegyszerűbb kialakításban is megzavarják az áramlást, növelik a turbulenciát ezzel a hőátadást, de az a hatás rövid távon disszipálódik. Egy helyesen megtervezett keverőelemmel kibővített távtartó rács hosszú távon növelheti ezt a hatást.

Kutatásom során különleges, összetett keverőelem geometriákat vizsgáltam kétdimenziós PIV (angolul: Particle Image Velocimetry) méréstechnika alkalmazásával. Ezzel a korszerű, beavatkozásmentes módszerrel optikai úton határozható meg folyadékokban az áramkép és áramlási jellemzők. Az általam vizsgált keverőelemeken még nem valósult meg mérés ezzel a technikával. Továbbá MIR (angolul: Matched Index of Refraction) technikával növeltem a mérés pontosságát, ami a mérőcsatornában elhelyezett különböző anyagok fénytöréséből származó torzító hatást küszöböli ki.

A rögzített adatsorok segítségével ábrázolhatók a különböző kialakítások áramlási paramétereinek kétdimenziós skalár- és vektormezői, valamint a távtartó rács után a sebességprofilok. A mérések kiértékelését követően az eredményeket összevetettem két referencia mérésével, a hagyományos, keverőelem nélküli kialakítás, valamint a jelenleg térnyerő “split” füles kialakítás eredményeivel. Kutatásom eredményei továbbá felhasználhatók lesznek a jövőben ezeken a bonyolult geometriákon végrehajtott CFD szimulációk validálására is, ami már túl nyúl ezen kutatás keretein.



Tartalomjegyzék

Nevezéktan	3
1. Bevezetés	5
2. A mérés módszertana	7
2.1. A PIV méréstechnika [3]	7
2.2. Irodalomkutatás	10
2.3. A PIROUETTE rendszer [15][18][16]	14
3. A mérés lefolytatása	16
3.1. A vizsgált geometriák és a mérés pontjai	16
3.2. Peremfeltételek és a MIR módszer	20
4. Hibaszámítás [9][5]	22
4.1. Az α nagyítás hibája	24
4.2. A ΔX képi elmozdulás hibája	25
4.3. A Δt késleltetés hibája	26
4.4. A δu sebességeltérés hibája	26
5. A mérés eredményeinek kiértékelése	29
5.1. Kétdimenziós áramképek vizsgálata	32
5.2. Vizsgált geometriák eredményeinek összevetése	45
6. Összefoglalás	49
Köszönetnyilvánítás	52
Felhasznált szakirodalom	52



Nevezéktan

Jelölések jegyzéke

D	Átmérő	mm
l	Hossz	mm
a, b	Oldalhosszúság	mm
p	Rácsosztás	mm
Δx	Elmozdulás	mm
L	Képi távolság	px
ΔX	Képi elmozdulás	px
A	Terület	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{h}} \right]$
V	Térfogatáram	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$
$vv\%$	Térfogatszázalék	%
n	Törésmutató	—
N	Mintavételezési szám	—
Re	Reynolds-szám	—
Stk	Stokes-szám	—
T	Hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
Δt	Késleltetési idő	μs
u, v, c, w	Pillanatnyi sebesség	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
U, V, W	Időben átlagolt sebességkomponens	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
u', v', c'	Fluktuációs sebességkomponens	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
$\bar{w}$	Átlagsebesség a csatornában	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
$\overline{STD}$	Átlagszórás	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
g	Gravitációs gyorsulás	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$
$\overline{TKE}$	Átlagos turbulens kinetikus energia	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$
$\overline{\overline{R}}$	Reynolds feszültségtenzor	Pa
$\overline{u'u'}, \overline{v'v'}, \overline{c'c'}$	Reynolds normális feszültség	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$
$\overline{u'v'}, \overline{v'u'}, \overline{u'c'}, \overline{c'u'}, \overline{c'v'}, \overline{v'c'}$	Reynolds csúsztató feszültség	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$
ξ	Jellemző méret	m
ρ	Sűrűség	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
μ	Dinamikai viszkozitás	mPas
θ, ϕ	Szög	rad
α	Konverziós tényező	$\left[\frac{\text{mm}}{\text{px}} \right]$





Fizikai mennyiségek

S	Statisztikai hiba
B	Rendszeres hiba
β	Egyedi rendszeres hiba
b	Kombinált rendszeres hiba
ε	Egyedi statisztikai hiba
δ	Hiba
Θ	Érzékenységi együttható
r	Tetszőleges mennyiség
x, y	Tetszőleges komponens
σ	Abszolút szórás
e	Relatív szórás

Indexek jegyzéke

b	Belső
h	Hidraulikai
i	Minta sorszám
k	Külső
p	Pálca
RSS	Négyzetes középérték (Root Sum Square)
sel	Választott
sp	Nyomjelző Részecske (Seeding Particle)

Rövidítések jegyzéke

ANSI	American National Standards Institute
BWR	Boiling Water Reactor
CCD	Charge-couple Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHF	Critical Heat Flux
DPTV	Dynamic Particle Tracking Velocimetry
FEP	Fluorinated Ethylene Propylene
HDPE	High Density Polyethylene
LCD	Light-curing Resin
LDV	Laser Doppler Velocimetry
MIT	Matched Index of Refraction
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet
PIROUETTE	PIV Rod Bundle Test Facility at BME
PIV	Particle Image Velocimetry
PTV	Particle Tracking Velocimetry
PMMA	Poly(Methyl Methacrylate)
PWR	Pressurized Water Reactor
TR-PIV	Time Resolved Particle Image Velocimetry
2D-PIV	Two-Dimensional Particle Image Velocimetry
2C-PIV	Two-Component Particle Image Velocimetry
3C-PIV	Three-Component Particle Image Velocimetry





1. Bevezetés

Napjaink atomreaktorainak többségében az üzemanyagot kerámiapasztillaként helyezik el cirkónium ötvözetű pálcákban, ezekben történik meg láncreakció során a hőfelszabadulás. Energetikai nyomottvízes reaktorokról (PWR) ez kivétel nélkül elmondható. A pálcákat sűrű osztású pálcakötegbe rendezik, amit a szakzsargon kazettának, vagy fűtőelemnek nevez, és ezek kerülnek elhelyezésre a reaktor zónakosarában. A pálcák összefogására és a köteg szerkezeti merevítésére távtartó rácsokat alkalmaznak. Ezek szabályos távolságra helyezkednek el egymástól, és feladatuk, hogy a pálcákat rögzítsék a rácspontjukban és azok elmozdulását, valamint a köteg deformációját megakadályozzák, továbbá pontosan tartsák a moderátor-üzemanyag magarányát. Az így kapott elrendezésben a pálcák által közrefogott térfogatot szubcsatornának nevezik, ezek biztosítják a zóna átjárhatóságát a moderátorközeg számára. A szubcsatornákon áthaladó folyadék hőátadás útján vonja el a zónában fejlődő hőt, ami aztán az atomerőművi hőkörfolyamat fenntartását szolgálja. Ennél fogva az atomreaktorból történő megfelelő hőelvonás kulcsfontosságú paraméter a termelékenység szempontjából. Van azonban az adekvát hőelvonásnak egy üzembiztonsági, és megbízhatósági aspektusa is. A hőelvonás elégtelensége az üzemanyag pasztilla és a pálcaburkolat jelentős felmelegedését okozhatja. A megnövekedett hőmérséklet a pálcák és a köteg szerkezeti gyengülését és deformációját. Ezen felül bizonyos hőmérséklet-szintektől olyan kémiai elváltozás mehet végbe a pálcaburkolatban, ami jelentős kockázattal jár nem csak az adott pálca vagy a pálcaköteg, de az egész reaktor épségére és hermetikusságára nézve. Utóbbira például szolgálhat a víz-cirkónium reakció, ami hidrogéngáz fejlődéssel jár, és triviális okokból veszélyezteti a reaktor épségét.

Atomreaktorokban tehát nukleáris biztonsági szempontból is releváns kérdés, hogy milyen a hűtőközeg hőelvonó képessége, és milyen termohidraulikai tulajdonságokkal jellemezhető a pálcaköteg. Az előbbi jellemző jelentősen függ az áramló közeg keveredésétől és turbulenciájától [14]. Az áramlás természete ugyan a pálcaköteg teljes hosszában erőteljesen turbulens, az egyes szubcsatornák térfogatárama között nem mutatkozik keveredés. Ez annak tulajdonítható, hogy a pálcák szoros rácsosztásban vannak elhelyezve, és azok fala a pálcák közötti átáramlásokat csillapítja. Ugyan az üzemanyagkazettákban jelenleg alkalmazott sima távtartórácsok perturbálják a moderátor áramlását közvetlenül a rács mögött, ez a keveredő hatás nem marad fenn sokáig. Ennek okán egyre nagyobb figyelem kíséri az olyan megoldások fejlesztését





és vizsgálatát, amelyek elősegítik az áramló közeg keveredését, és hosszú távon fennmaradó turbulenciákat keltenek. Erre egy ígéretes megoldás a közvetlenül a távtartó rács felső végén elhelyezett, statikus keverőelemek alkalmazása. Ezek geometriailag úgy vannak kialakítva, hogy minél jobban megzavarják az áramlás egyenletességét, ezen felül viszonylag könnyen kialakíthatóak legyenek a jelenleg alkalmazott gyártási eljárásokkal. Egyike a rendszeresen vizsgált keverőfüleknek a „split” típusú keverőfül, amely elősegíti a szubcsatornák közötti átáramlást és másodlagos áramlásokat hoz létre a szubcsatornán belül [11]. A szubcsatornák közötti keveredés tömeg-, impulzus- és energiacserét eredményez, ezúton pedig csökkenti az egyenlőtlen entalpiaemelkedést, míg a szubcsatornákon belüli másodlagos áramlások serkentik a hőátadást az üzemanyagpálca és a moderátor között [11]. Az erre a területre fókuszáló kutatások többsége ennek a keverőfül típusnak és módosulatainak tanulmányozására összpontosul, így viszonylag kevés figyelem fordul a kevésbé megszokott, bonyolultabb geometriájú keverőelemek hatásának feltárására, habár erre is van precedens [13]. Jelen kutatásban a fent említett két eset, vagyis a keverőelem nélküli, valamint „split” keverőfülrel ellátott távtartórácsok viszonyítási alapként szolgáltak, ugyanis ezek hatása már jól ismert, sokat tanulmányozott terület. Rendhagyó keverőelemek hatását összevetve a két referencia mérés eredményeivel összehasonlíthatók az egyes esetek hatásai, és belátható, hogy további vizsgálatukban, valamint későbbi alkalmazásukban rejlik-e potenciál.

A moderátor távtartórácsot követő turbulenciájának megállapítása számtalan CFD szimuláció témáját képezi [10]. Ezzel a módszerrel sokkal részletbemenőbben és pontosabban lehet vizsgálni a folyadék viselkedését, és tágabb betekintést nyújt a távtartó rács, valamint a keverőelemek által keltett folyamatokba. Azonban ezek a szimulációk gyakran adnak a gyakorlati tapasztalatoktól jelentősen eltérő eredményeket, ami a komplex turbulens áramlásnak és a rendkívül bonyolult és összetett geometriai környezetnek tulajdonítható [10]. Összevetve a valós méréseken alapuló tapasztalatokat egy CFD szimuláció eredményeivel megállapítható, hogy hol hibázik a kód, és hol van szükség módosításra, hogy az valósan jellemzett folyamatokat eredményezzen. Ennél fogva az empirikus eredmények elengedhetetlen szükségletek a CFD kódok hitelesítése szempontjából, valamint a távtartórácsok és keverőelemek fejlesztéséhez [10]. Ennek a kutatásnak a mérési eredményei is később felhasználásra kerülnek majd a vizsgált keverőelemeken folytatott CFD szimulációk validálására.

2. A mérés módszertana

2.1. A PIV mérés technika [3]

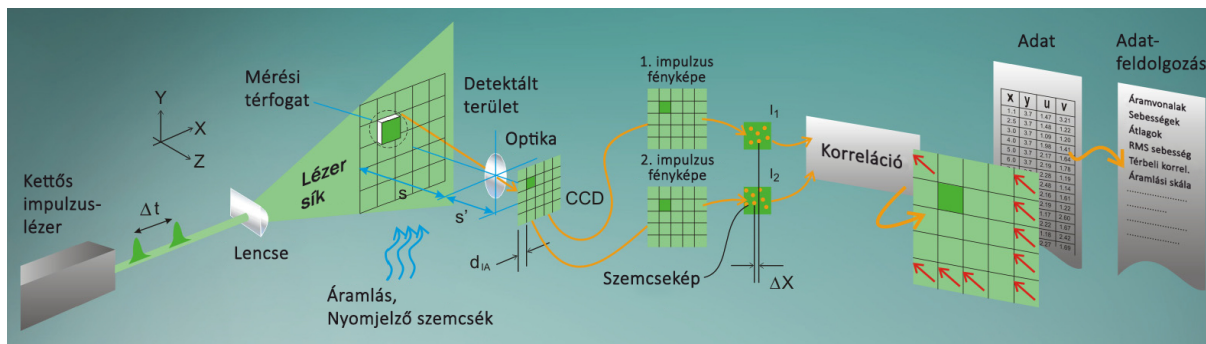
A PIV (angolul: Particle Image Velocimetry) egy olyan beavatkozásmentes mérési eljárás, amely az 1980-as években kezdett elterjedni, időközben pedig jelentős teret nyert az áramlástan és hidrodinamikai vonatkozású kutatás-fejlesztési alkalmazásban. Egyik nagyon fontos jellemzője, ami számottevő előny a korábban alkalmazott mérés technikákhoz képest, hogy az adatgyűjtéshez nem szükséges mérőeszközzel behatolni a vizsgált térrészbe. Beavatkozással mérésnél ugyanis a műszer az áramkép torzulását okozhatja, ami a mérési adatok és az eredmény pontatlanságához vezetne. A PIV módszernek ez a kedvező jellemzője annak tulajdonítható, hogy az adat rögzítés tisztán optikai úton történik. Ennél fogva jelentős hiba vagy adathiány optikai torzításból, valamint takarásból származhat, amelyek minimalizálására különböző megoldások állnak rendelkezésre. Ezek részletezésére a dolgozat későbbi fejezeteiben kerül majd sor. A PIV technika teljes folyamatábráját a 2.1 ábra szemlélteti.

A PIV mérés alapeleve, hogy a közeg által hordozott, szuszpenzióban tartott nyomjelző részecskék sebességét mérjük, ami ekvivalens a vizsgált közeg sebességével. Amennyiben a vizsgált közeg víz ezeknek a szemcséknek az anyaga általában poliamid, ugyanis relatív sűrűségük közelítőleg 1. A nyomjelző részecskéket egy síkban rövid időintervallumon belül kétszer meg kell világítanunk, így lehet később azok sebességéről következtetést levonni. Ennek a megvilágításnak pillanatszerűnek kell lennie, hogy elkerüljük a kép elmosódását. A nyomjelző részecskék szórják a rájuk vetült fényt, amit a két fényvillanás pillanatában egy képpár formájában rögzít egy nagysebességű digitális kamera. Egy ilyen képpár egyik pillanatképét mutatja be a 2.2 ábra, amelyen jól láthatók az áramlatban elkevert poliamid szemcsék. A rögzített képeket összevetve megállapítható a két felvillanás közötti idő során egy nyomjelző részecske elmozdulása, ami megadja annak pillanatnyi sebességvektorát. Ehhez élnünk kell azzal a feltételezéssel, hogy a nyomjelző részecskék együtt haladnak az áramlattal, sebességvektoruk megegyezik a közeg adott pontbeli sebességvektorával. Mivel a vizsgált térfogatot egy teljes síkban átvilágítjuk, így megfelelő felbontású kamera segítségével, és a nyomjelző részecskék számának függvényében számtalan pontban történik meg az említett képpárok rögzítése. Az így kapott adatsorok kiértékelésével előállítható a vizsgált síkban a sebesség kétdimenziós vektormezeje. A sebesség

általános számítására a PIV módszer során a 2.1 egyenlet alkalmazható.

$$u = \alpha \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Ahol u a mért sebesség, α a konverziós tényező, a későbbiekben csak nagyítás, ΔX a két kép közötti szemcsekép-elmozdulás és Δt a két kép rögzítése között eltelt idő.

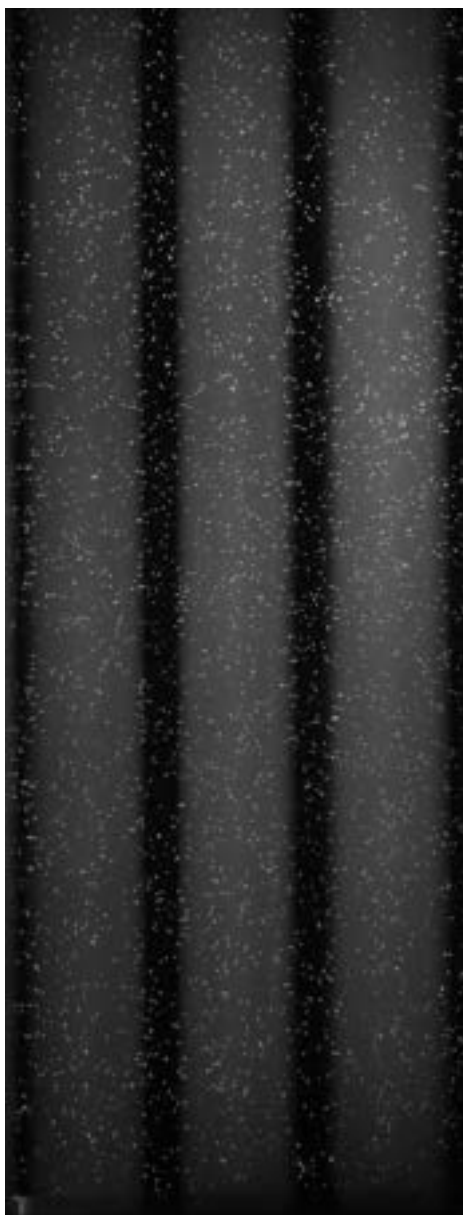


2.1. ábra. A PIV metódus folyamatábrája [2]

Belátható, hogy egy nagy felbontású felvétel készítésekor hatalmas mennyiségű nyers adat áll rendelkezésünkre, ami számítógépes utófeldolgozásra szorul. Ehhez a digitális PIV felvételeket úgynevezett interrogációs területekre osztjuk. A két megvilágításkor készült képpár esetén az egyes nyomjelző részecskék elmozdulását ezeken az interrogációs területeken belül állapítja meg a kiértékelő program autokorreláció és keresztkorreláció segítségével. Minden interrogációs területre elvégezve ezt a kiértékelést egy kétkomponensű sebességvektor állítható elő a megvilágított síkban, innen kapja a mérési eljárás a 2C-PIV (angolul: Two-Component) megnevezést. Kiterjesztett mérési elrendezés segítségével háromkomponensű térvektorok is megállapíthatók. Az egyik ilyen a sztereoszkópiás 3C-PIV, amely esetében két, egymással szög bezáró kamerával készítjük el a felvételeket. Mindkét metódus a kétdimenziós tartományban mérő 2D-PIV módszerek csoportjába tartozik.

A megvilágításról általában egy kettős impulzuslézer gondoskodik, amelynek fényét egy lencse segítségével síkká formálnak. A mérési térfogat megvilágítani nem kívánt részeit árnyékolással védik a lézer fénytől, így az csak egyetlen síkot világít át, amelynek vastagsága $1 \div 2$ mm. A két lézerimpulzus közötti Δt késleltetési időt úgy kell megválasztani, hogy a nyomjelző részecskék elmozdulása elégségesen nagy legyen a kiértékelés sikerességéhez. Ugyanakkor elég rövidnek is kell lennie ahhoz, hogy azon nyomjelző részecskék, amelyek rendelkeznek a megvilágított síkra

merőleges sebességkomponenssel ne hagyassák el a mérősíkot, az ugyanis kiértékeléskor az eredmények torzulásához vezethet. A megfelelő lézer kiválasztása szempontjából fontos továbbá a nyomjelző szemcsék mérete. Minél nagyobb a szemcseméret, annál könnyebben detektálható a szórt fény a kamera által, így elég kisebb fényintenzitású, kisebb teljesítményű lézert alkalmazni a megvilágításra. Ugyanakkor az áramlat pontos követése szempontjából az a kedvezőbb, ha minél kisebb a nyomjelzők szemcsemérete, így ezen a téren kompromisszumra van szükség. Ezen felül fontos a nyomjelző szemcsék megfelelő arányban legyenek jelen a közegben. Túl kicsi



2.2. ábra. PIV felvétel pillanatképe egy 3×3 PWR pálcakötegről

koncentrációban a felvétel nem szolgál elégséges adatsűrűséggel, míg túl nagy koncentrációnál az egyes részecskék elkülöníthetetlenek lesznek a kiértékelő program számára. Fontos azonban megemlíteni, hogy bár a PIV módszer esetében közepes szemcsekonzentrációt alkalmaznak, az előbbi két esetet is alkalmazzák más méréstechnikákban.

Az elmúlt évtizedek technológiai fejlődésének köszönhetően a PIV alkalmassá vált viszonylag gyors kiértékelési sebességgel egy teljes áramlási mező megállapítására. A PIV módszer lehetőséget biztosít jó pontossággal és hitelességgel az áramlás mind kvalitatív, mind pedig kvantitatív jellemzésére, ellenben a hagyományos vizualizáló metódusok többségével, ahol valamilyen vizsgáló közeget, például olajködöt juttatnak az áramlatba, ami arról csak kvalitatív információval szolgál. Nagyszámú mintavételezéssel készült felvételek esetén ezért lehetőség van idő átlagolt eredmények kimutatására is. Ezzel jellemezhetőek és vizualizálhatók a hosszú távon fennálló áramlási struktúrák, amik a pillanatnyi sebességmezők mellett további értékes információval szolgálnak. Ilyen megközelítés mellett a mérési módszert TR-PIV-nek (angolul: Time Resolved) nevezzük.

2.2. Irodalomkutatás

A sebességvektor-terek mérésére alkalmazott módszerek a tudománytörténelem során több különféle precedensen keresztül fejlődtek. Sokukat relatív elavultságuk ellenére még ma is alkalmaznak olyan környezetben, ahol nincs szükség a sebességtér számszerűsítésére, vagy a sebességvektorok iránya viszonylag egyszerűen megbecsülhető. Eleinte ezt egy mérőműszer, például forró-szálas (hődrót) anemométer, vagy Prandtl-cső behelyezésével végezték a vizsgált térfogatba. Utóbbi számszerű eredményt adott vissza a sebességről, amit az adott pontbeli abszolút nyomás és statikus nyomás különbségéből lehet kiszámolni. Ennek a módszernek azonban több hátránya is van, amelyek alkalmatlanná teszik nagy pontosságú eredmények elérésre. Kialakításánál fogva a Prandtl-cső csak egy adott pontban méri a sebességet, és annak is csak az abszolút értékét, míg irányáról csak korlátozott mértékben szolgáltat információt. Mivel a behelyezett tárgy megzavarja az áramképet, így nincs lehetőség több műszer egymás után való behelyezésére. Ehhez külön méréseket kell elvégezni minden egymást követő vizsgált pontban, ami időigényes folyamat. Ezen kívül a Prandtl-cső nem veszi figyelembe a potenciális nyomás változását, ami kis sűrűségű folyadékok vizsgálatakor még elhanyagolható tévedés, de például víz vizsgálata során ez már jelentős hibát jelenthet. Ennél fogva ez a módszer inkább vízszintes áramlások vizsgálatára alkalmas.

A felsoroltaktól eltérő megközelítés, amikor valamilyen nyomjelző anyagot juttatnak az áramló közegbe. Áramló gázoknál ez általában egy sűrű olajköd, míg folyékony halmazállapotú közegeknél ez valamilyen színezett folyadék. Az áramlat magával ragadja ezt a közeget, ami az áramvonalak mentén haladva jó vizualizációt ad vissza az áramlás természetéről. Mivel ez a módszer, még ha nem is digitális úton, de optikai feldolgozáson és kiértékelésen alapul, így sokkal könnyebben feldolgozható és felfogható eredménnyel szolgál az ember számára mint a számszerűsítő eljárások. Azonban ennek is vannak komoly hátrányosságai. A vizsgáló közeget valamilyen szonda segítségével kell bejuttatni az áramlat megfigyelt részébe, ami perturbálja az áramvonalakat. Ellenben a műszeres mérésekkel, amelyek saját mérési eredményét ez a zavar nem befolyásolja, ez a módszer pont abban a tartományban torzítja az áramvonalakat, amit a vizsgáló közeg kimutatni hivatott. Azonban ennek a megközelítésnek a legnagyobb hátránya, hogy semmilyen kvantitatív eredménnyel nem szolgál, pusztán az áramlást jellemző kvalitatív adatokat lehet belőle kinyerni. Ennél fogva nem alkalmazható precíz mérésekre, csupán átfogó

jellemzők megállapítására.

Az optikai alapon működő és lézertechnológia alkalmazásával megvalósuló beavatkozás mentes eljárások egyik korai példája, a máig korszerűnek minősülő LDV (angolul: Laser Doppler Velocimetry). Ebben az alkalmazásban több összetartó lézernyalábot használnak, amelyek egy pontban futnak össze a vizsgált térfogaton belül. Ebből következik, hogy LDV segítségével csak pontonként lehet kiértékelni a lokális sebességet, ugyanakkor azt figyelemre méltó pontossággal, nagy tér- és időbeli felbontásban. További különlegessége ennek a módszernek, hogy mindhárom sebességkomponens meghatározható a segítségével, így a sztereó-PIV-nál egyszerűbb elrendezésben alkalmazható térbeli felvételek készítéséhez. Az LDV technika már lényeges alkalmazásra lelt pálcakötegek és távtartó rácsok termohidraulikai vizsgálatában. BWR távtartóján végzett mérések során kimutathatóvá váltak a csőszűrlődésből és alakvesztésekből adódó nyomáscsökkenések a pálcakötegen belül, valamint az axiális sebesség a kazetta középvonalában és az axiális- és transzverzális sebességprofilok a távtartórácstól mért 4 mm távolságban egy vonal mentén [6]. Az eredményekben megmutatkozik ennek a megközelítésnek a legnagyobb hátránya is. Mivel csak pontszerű mérés végezhető az elrendezéssel, már az is bonyolult segédberendezéseket igényel, ha a mérést egy dimenzió szerint kiterjesztve egy vonal mentén szeretnénk adatokat rögzíteni. Egy LDV mérést jelentősen meghosszabbít a módszer időigényessége, ugyanis egy adott pontot akár 20-30 percen át kell vizsgálni a megfelelő pontosságú értékek érdekében [6]. Egy teljes síkra vagy akár a kazetta térfogatára kiterjesztve a mérést nem csak a lézert mozgató szerkezet válna összetettebbé, de irreálisan sok időt venne igénybe a teljes mért zóna bepásztázása.

Dominguez-Ontiveros és Hassan egy 3×3 pálcából álló kötegmodellt vizsgáltak DPTV (angolul: Dynamic Particle Tracking Velocimetry) segítségével, ami a PIV egyik rokonmódszere kisebb szemcsesűrűséggel [7]. Kutatásuk során a pálcaköteg egyszerűsített távtartó rácsát követő mezőben célozták az áramlási tér karakterizálását. Ehhez az axiális és transzverzális sebességmezőket, turbulenciafok és Reynolds-feszültségek eloszlását határozták meg idő átlagolva öt különböző, egymással párhuzamos mérési síkban, amelyekkel a pálcasorok közé vagy azokon át világítottak. Ezen öt síkra a méréseket négy egymás felett elhelyezkedő pozícióban végezték el, ami így lefedte a belépő cső és a második távtartó rács közötti távolságot. Az eredmények kiértékelésekor kisebb aszimmetria mutatkozott az áramképben, amit a mérőcsatorna egyik ala-

ki jellemzője okozott. A közeg ugyanis a mérőcsatornába alul, annak tengelyére merőleges irányból lépett be, és egy 90° -os irányváltoztatást követően áramlott át a pálcakötegen. Bár a hatás ez esetben csekély volt, az ilyen jelenségek torzulást okoznak a végső áramképben, valótlan jellemzőket eredményeznek. Ahhoz, hogy az áramlás jobban jellemezze egy valós zónabeli kazettában kialakuló körülményeket, ilyen elrendezéseknél valamilyen áramlás kondicionáló idom beépítése szükséges a mérőcsatorna elé.

Qu és társai egy 5×5 pálcából álló "split" keverőfüllel felszerelt négyszögrácsos elrendezésben vizsgálták a keverőelemek hatását az áramlás transzverzális komponensre és örvénylésére több Reynolds-szám mellett TR-PIV módszerrel [11][12]. Mérőberendezésük rendhagyó a legtöbb kutatáshoz képest abban, hogy nem csak az áramlásra merőleges irányból készítettek felvételt, hanem a pálcaköteg fölötti mérőablakon figyelték hosszanti irányból a pálcák tengelyére merőleges síkot. Az axiális sebességkomponensek meghatározásához elegendő volt egy felvételt készíteni egy függőleges mérősíkban. A két transzverzális komponens meghatározásához öt egymást követő vízszintes mérősíkról készítettek felvételt, amelyeket rendre $3D_h$, $5D_h$, $10D_h$, $15D_h$ és $20D_h$ távolságban vettek fel a távtartó rácsot követően, amivel mind a 16 belső szubcsatorna keresztmetszete megfigyelhetővé vált. Az ilyen elrendezésű mérések során a kamerához kiegészítő elem, aszférikus lencse alkalmazása szükséges, hogy kiküszöböljék a perspektívaerőből eredő takarásokat és ezzel az adatvesztést. Megfigyelésük alapján a keverőfülek a pálcák közötti hézagokba terelik az áramlást, így segítik az átkeveredést az egyes szubcsatornák között, ahol az ellenáramok örvényeket keltenek. A mérések arra is rámutattak, hogy a távtartó rácsokat közvetlen követő advekciónak szakasz után az áramlat újrendeződik, majd a transzverzális sebességkomponensek csillapodnak, aminek közelítőleg exponenciális lefutása van.

Qi és társai 5×5 pálcából álló pálcaköteget vizsgáltak több $Re = 1508$ és $Re = 12590$ tartományban több különböző értéken TR-PIV módszerrel. A pálcaköteg négyszögrácsú távtartói itt is "split" keverőfülekkel voltak ellátva. Az áramlásról ezúttal több, egymással párhuzamos hosszanti síkban készítettek felvételt, többek között a fal menti régióban is. A pálcák optikai torzításából eredő hibák kiküszöbölésére MIR módszert alkalmaztak, ami nátrium-klorid 1%-ban történő oldásával valósult meg. Ez elhanyagolható mértékben változtatta csak a méréshez használt víz fizikai tulajdonságait. Mérésük kiértékelés során az volt megfigyelhető, hogy kisebb Reynolds-számoknál gyorsabban fejlődik ki a transzverzális áramlás a nagyobb



Reynolds-számoknál megfigyeltekhez képest. Az is megmutatkozott, hogy a távtartó rácstól távolodva viszonylag nagy még a turbulenciafok, amelynek transzverzális komponense lassabban disszipálódik, mint az axiális komponens. A párosával kialakított, ellentétes irányba hajlított "split" keverőfülekkel felszerelt távtartó rácson periodikus örvények alakulnak ki, amelyek leszakadása a Reynolds-szám növekedésével egyre sűrűbb lesz. Ez a jelenség nem megfigyelhető olyan kialakításnál, ahol csak egy keverőfűl tartozik egy szubcsatornához.

Matozinhos és társai a PIV méréstechnika segítségével egy teljesen új megközelítést vizsgáltak egy 5×5 pálcás kötegen belüli áramlás serkentésére [13]. Kutatásuk során olyan távtartó rácsot alkalmaztak, amelyen a pálcák rögzítésére szolgáló támaszidomok kialakításuk szerint döntött csatornákat alkottak, amik a közeget áterteltek a szomszédos szubcsatorna irányába. A modelleket a méréshez 3D nyomtatással készítették elő fotopolimerizációs anyagból. A mérés-sorozat során 4-4 egymásra merőleges síkpárban vizsgálták az áramlást közvetlenül a távtartó rács mögött, amik egyenletesen voltak elosztva az átáramlott keresztmetszetben. A mérésből az elvártaknak megfelelő születtek, az áramkép fűvóka áramlásra hasonlított, aminek hatása fennmaradt a teljes vizsgált $4,3D_h$ távolságon. A sebességmezők fluktuációs komponense pedig összefüggésbe hozható volt a terelőcsatornákból kilépő vízszög és az eltérítetlen áramlás közötti Reynolds feszültségekkel.

Egyéb rendhagyó keverőelem geometriák vizsgálatára inkább más módszerek segítségével került sor, eredményeik ugyanakkor figyelemre méltóak. Nematollahi és társai kutatásuk során CFD szimulációs úton vizsgáltak számos, különböző kialakítású keverőelem koncepciót, és az eredményeike egy hagyományos "split" keverőfüles modell szimulációjának eredményével vetették össze, amit korábban egy fizikai mérés eredményeivel validáltak [4]. Az eredmények között a sebességprofilokon felül a statikus nyomásesés az idomokon történő alaki veszteségek következtében valamint a hőátadási tényező növekedése is megjelenik a különböző esetekre. Az egyik esetben, a hornyolt tölcéses kialakítású keverőelemnél például több mint 14%-os növekmény volt megfigyelhető. A szimulációhoz azonban csak 4 pálca által közrefogott egyetlen szubcsatorna került modellezésre, így a szomszédos szubcsatornák hatása nem lett figyelembe véve. Ezen felül a keverőelemeknek nem definiáltak lemeztavagságot, így egy fizikai modellen történő mérés eredményeiben ez is okozhat változásokat. Egy másik kutatásban, amit Seo és társai vittek véghez, PIV módszerrel és CFD szimulációval vizsgáltak párhuzamosan három

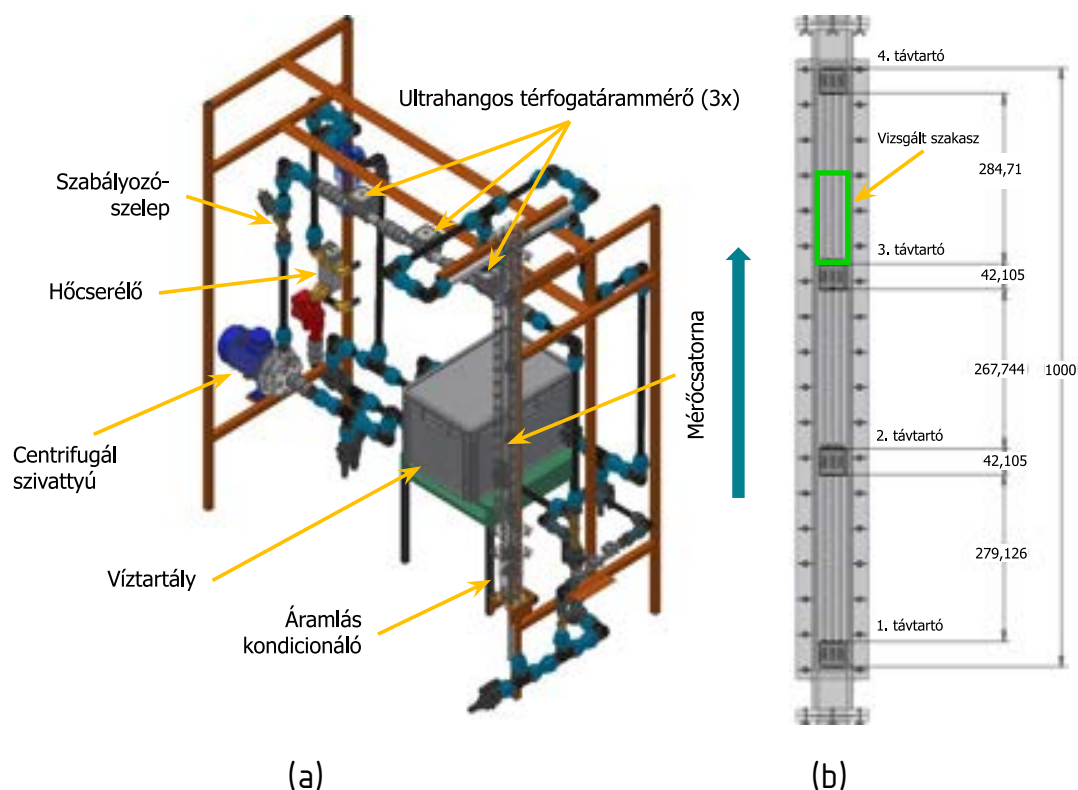
esetet, egy keverőfűl nélkülit, egy "split" keverőfüles esetet, valamint egy innovatív járókeres (MRV) kialakítást [8]. A vizsgálatokat követően az eredményeket összevetve vonták le a tapasztalatokat mind függőleges, mind vízszintes áramlásra. Bár ebben az esetben szintén PIV módszert alkalmaztak a fizikai méréshez, a nyomjelző részecskék szerepét nem poliamid szemcsék töltötték be, hanem apró, $\varnothing D_{sp} = 20 \mu\text{m}$ átmérőjű ezüstfonccsorról bevont üveggyöngyök, amelyek jól szórják a fényt. A mérést és a szimulációt itt is csak egyetlen, 4 pálcával határolt szubcsatornában végezték el, így több, egymás melletti szubcsatorna egymásra gyakorolt hatása felderítetlen maradt. A mért és szimulált eredmények összhangban voltak, a legnagyobb keveredést a járókerékkel felszerelt távtartó rácson tudták kimutatni. A propeller forgása helikális örvényeket fejlesztett, amelyek egy valós esetben leszakíthatják a pálcák falán esetlegesen kialakuló gőzbuborékokat, és a szubcsatorna középvonalába terelhetik őket. Ez a jelenség elősegítheti a kritikus hőfluxus (CHF) növelését a teljesítmény reaktorokban.

A jelen kutatásban vizsgált keverőelemek az utóbbi két cikkben felsoroltak közül lettek kiválasztva. Kialakításukat tekintve azonosak, de a méretek és geometriai jellemzők az alkalmazott mérőrendszer kényszereinek felelnek meg, és eltérnek a cikkekben közöltektől.

2.3. A PIROUETTE rendszer [15][18][16]

Méréshez használt berendezés a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem R épületének 3. emeletén található a Nukleáris Technikai Intézet PIV laboratóriumában, amely PIROUETTE (**PIV Rod Bundle Test Facility at BME**) néven ismert. A vizsgált távtartó rácsokkal felszerelt pálcakötegek az 1156 mm magasságú mérőcsatornában kerülnek elhelyezésre. Ebben a mérőszakasz egy 1000 mm magas, 40 mm $\times$ 46 mm oldalhosszúságú hasáb alakú térrész. A közeg alul lép be egy diffúzoron keresztül a csatornába, ahol egy áramlás egyenletesítő idomon, majd egy azt követő konfúzoron áthaladva lép be a mérőszakaszba, amit végül felül hagy el, és tér vissza a fő hurokba. A behelyezett pálcaköteg hossza mentén 4 távtartó rács helyezhető el, amelyek végei között eltérő távolság van. Az elrendezéssel mérhetők 3×3 rácsoztású négyzetgrács, valamint 7 pálcából álló háromszöggrács kiosztású pálcakötegek. A teljes mérőcsatorna víztiszta PMMA üveg lapokból van ragasztással összeállítva, ami lehetővé teszi a vizsgált szakasz megvilágítását és felvételek készítését. A berendezésben 350÷29000 Reynolds-szám tartományban produkálhatók áramlási scenáriók. A PIROUETTE rendszer elrendezését

a mérőcsatornát vázlatosan a 2.3 ábra mutatja be. A mérőcsatorna kialakítását részletesebben az A1 melléklet mutatja be.



2.3. ábra. A PIROUETTE rendszer elrendezése és a mérőcsatorna

A folyadék keringtetéséről egy Ebara CDXM/G 200/20 egyfokozatú centrifugál szivattyú gondoskodik, amely $15 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ maximális térfogatáram szállítására alkalmas [19]. A szivattyú munkájának egy része a közeg felmelegítésére fordítódik, ezért a közeg hőmérsékletének állandó értéken tartása végett egy by-pass hőcserélő van párhuzamosan beépítve a hurokba. Ezzel a megoldással elérhető, hogy a folyadék hőmérséklete a teljes mérés alatt $\pm 1^\circ\text{C}$ tűréshatáron belül maradjon. A folyadékáram elzárására egy golyóscsap áll rendelkezésre, ami után közvetlenül egy szabályozó szelep van elhelyezve a tömegáram precíz állításához. Ezt három egymással sorba kötött HYDRUS ultrahangos térfogatáram-mérő műszer követi, amelyek redundáns beépítését a mérés pontosítása indokolja. Több műszerből kapott adatok összevetésével ugyanis könnyebben kiszűrhetők a spontán előforduló valótlan értékek, és így csökkenthető az ebből származó hiba. A közeg ezt követően lép be a korábban részletezett mérőcsatornába, és azt felül elhagyva egye-



nesen a víztartályba tér vissza. Itt tárolódik a méréshez használt folyadék, amelyet a szivattyú a hurokban keringtet. Azért szükséges a vizet nagyobb mennyiségben tárolni a rendszerben, mert ez növeli a közeg hőtehetetlenségét, lassabban melegszik át, így egyszerűbben kivitelezhetők az izotermikus körülmények a mérés során. Az alacsony térfogatáramon végzett mérések megvalósításához egy by-pass ág van beiktatva a mérőcsatorna elé, amely közvetlenül a tartályba juttatja vissza a térfogatáram igény szerinti részét. A felsorolt rendszerelemeket HDPE csövek kötik össze egymással, amelyek belső átmérője $\varnothing D = 26 \text{ mm}$.

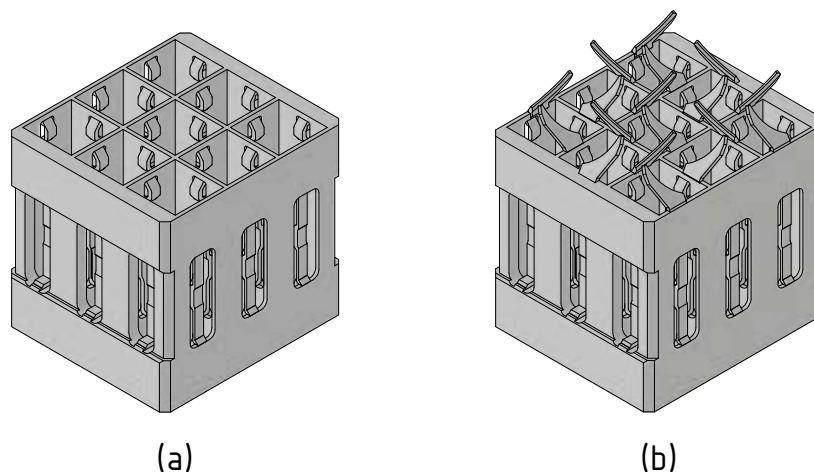
A mérőszik megvilágításáról egy Litron Nano L 135-15 szériájú Nd:YAG kettős impulzuslézer gondoskodik. Maximális pulzusenergiája 135 mJ, amivel az áttetsző anyagú pálcákat is át tudja világítani a pálcakötegben. A lézer zöld fényt bocsát ki 532 nm hullámhosszal, és legfeljebb 15 Hz frekvencián tud pulzálni. Ez utóbbi szabja meg az alkalmazhatóság korlátait. A felvételek készítéséhez egy SpeedSense Lab 110 nagysebességű CCD kamera áll rendelkezésre 1 Mpx felbontóképességgel, 1690 fps képalkotási sebességgel és 12 GB kapacitású átmeneti adattárolóval. Ez utóbbi korlátozza a mintavételezés mennyiségét és a rögzíthető mérés idejét. A kamera képalkotását és az impulzuslézer villogását egy Dantec PIV Timer Box 80N77 típusú szinkronizáló egység hangolja össze, ezzel garantálva, hogy a kamera értékes adatokat rögzít a mérés során.

3. A mérés lefolytatása

3.1. A vizsgált geometriák és a mérés pontjai

A mérés során alkalmazott kazettamodell egy 9 pálcát tartalmazó négyszögrácsú pálcaköteg. Ennek hossza mentén négy távtartó rács van elhelyezve, amelyek között eltérő távolság van. Az alsó és felső távtartók egyben zárósapkaként is viselkednek. Megtartják a pálcákat a végükönél fogva, ezzel meggátolva, hogy azok lefelé kicsússzanak, vagy az áramlás hatására felül kilöködjének. Ezen felül a sapkák áramvonalas kialakítása lehetővé teszi az áramláskiegyenlítő idomot követően a járulékos perturbációk elkerülését, így biztosítva, hogy a megfigyelt áramlástanai jelenségek kizárólag a távtartórácsok hatására alakulnak ki. A vizsgált keverőelemmel ellátott távtartórácsok a két közbenső helyre kerülnek. A távtartó elemeknek az is feladata, hogy magában a mérőcsatornában rögzítsék a teljes pálcaköteget, amit a mérőcsatorna falában

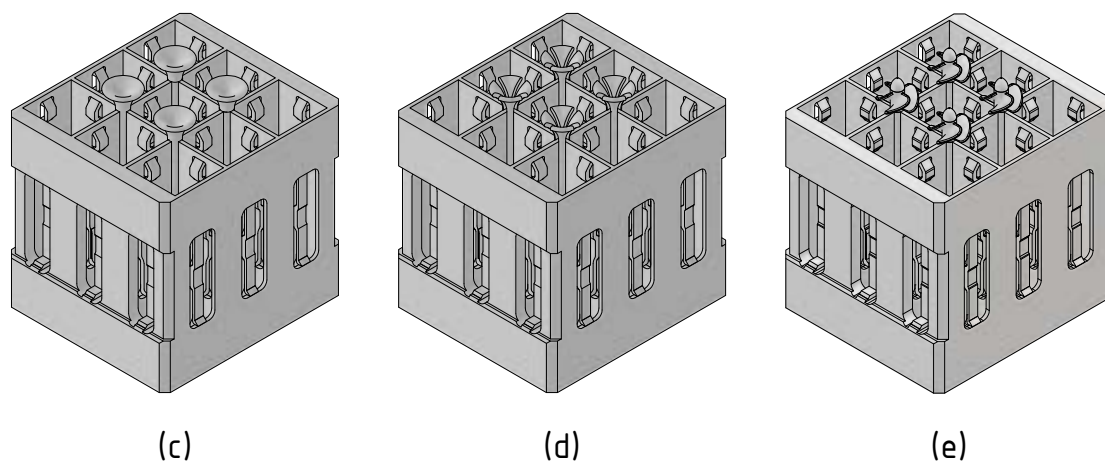
kialakított reteszek, és a távtartó rácsok oldalán kialakított hornyok összeillesztése tesz lehetővé. A kötegben elhelyezett pálcák átmérője $\varnothing D_p = 10$ mm, anyaga fluorozott etilén-propilén (FEP) kopolimer. A választás azért erre az anyagra esett, mert átlátszó, és törésmutatója viszonylag közel áll a víz törésmutatójához. A pálcaköteg teljes hossza $l = 1000$ mm, a rácsosztás $p = 13,26$ mm. A szubcsatornák egyenértékű hidraulikai átmérője $\varnothing D_h = 8,95$ mm. Mivel a mintaként szolgáló PWR kazettában a pálcák átmérője $\varnothing D_p = 9,5$ mm, ezért a méréshez használt távtartó rács geometriája $\frac{10}{9,5}$ értékkel aránylik a valós geometriához. Ennek megfelelően a mérés során gyűjtött eredmények a hasonlóság-elmélet alapján érvényesülnek a valós geometriára is.



3.1. ábra. Referencia távtartó rácsok a) keverőelem nélküli és b) "split" keverőfüles (*vektorgrafikus*)

A távtartó rács geometriailag egy tipikus PWR távtartójának részletére lett mintázva, alapjának oldalhosszúságai $a = 40,58$ mm és $b = 45,78$ mm, magassága 42,11 mm, amit részletesen az A2 melléklet ábrázol. A pálcák rögzítése az egymással szemben kialakított laprugók és bakok segítségével történik. A távtartó rácsok LCD polimertechnológiával készültek, ami egy precíz és kifinomult additív gyártási eljárás. Az elemek legnagyobb része mélyfekete ecoResin gyantából készült, amire azért volt szükség, hogy elkerüljük a fényvisszaverésből származó hibás mérési eredményeket a távtartórácsot követő térrészben. Ebből természetesen az következik, hogy a távtartórács magasságában nem lehet mérési adatokat rögzíteni a rácson belüli áramlásról, hiszen az átlátszatlan, leárnyékolja a lézersík fényét. A takaró hatás kiküszöbölése érdekében a keverőelemmel ellátott távtartó rácsok felső néhány rétege valamint maguk a keverőelemek egy másik, átlátszó Aqua Resin polimergyantából kerültek kialakításra, így a kamerával betekintést

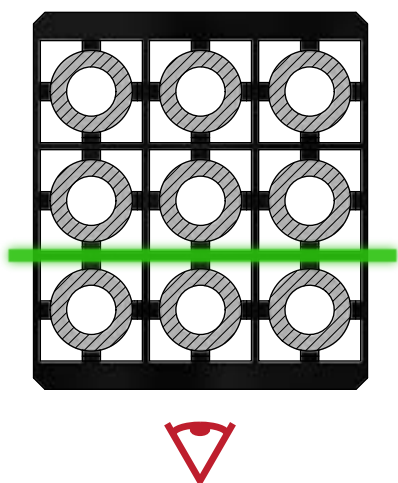
nyerünk a keverőelemben végbemenő folyamatokba. A teljes távtartó rácsot azonban azért nem lehetett átlátszó anyagból elkészíteni, mert az víznek való hosszútávú kitettség következtében degradálódni kezd, és ez deformálja a geometriát, amire példa az A3 mellékleten látható. Ezen felül azt is elkerüljük ezzel a megoldással, hogy a keverőelem árnyékot vessen a mérősíkszakaszára. A mérési eredmények kiértékeléséhez két referencia geometria is lemérésre került, ezek a 3.1 ábrán láthatók. Az (a) jelölésű a tipikus keverőelem nélküli eset, ami napjaink reaktoraiban kerül alkalmazásra. A (b) jelölésű vizsgált geometria a sokat vizsgált "split" típusú keverőfüllel ellátott rács. Ennek a két módosulatnak a vizsgálatára azért volt szükség, hogy összehasonlítás alapján megfigyelhető legyen a vizsgált keverőelemek hatása a sima keverőelem nélküli esethez képest, valamint a keverőfülles esethez képest is, amelyet hosszú ideje alkalmaznak a nukleáris iparban.



3.2. ábra. A vizsgált távtartó rácsok c) tölcséres kialakítás d) hornyolt tölcséres kialakítás e) járókerekes kialakítás (vektorgrafikus)

A vizsgált keverőelem geometriákkal felszerelt távtartó rácsok a 3.2 ábrán láthatók. A 3.1 ábra a) és b) pontjában feltüntetett távtartó rácsok szerkezeti kialakításában annyi módosítás ment végbe, hogy az egymást keresztező lemezek metszéspontjában egy hosszanti henger került kialakításra. A 3.2 ábra c) és d) esetében ebben egy $\varnothing D_b = 2 \text{ mm}$ átmérőjű központi furat került elhelyezésre, ami átjárhatóságot biztosít a közegnek, míg az e) esetben ez teljesen kitöltött maradt. Az egyes esetek közötti fő különbség a keverőelemek kialakításában van. A c) jelöléssel ellátott geometria a tölcséres kialakítású eset [4]. Ez egy tórusz belső palástfelületének részlete, amely az alulról érkező áramló közeget radiális irányba kifelé tereli, ezzel elősegítve az

anyagáramot egyik szubcsatornából a másikba. A d) jelölésű hornyolt tölcsér elnevezést viselő kialakítás a c) jelölésű geometriának egy továbbfejlesztett módosulata [4]. A tölcsérben négy horony került kialakításra, ami egy szirmos szerkezetet eredményez. Ezeknek a nyílásoknak a feladata, hogy átjárható utat biztosítsanak a térfogatáram egy töredék részének, ezzel pótolva az idom által okozott leválások mögötti térben a folyadékot. Mindkét tölcsérnek a legszélesebb pontján az átmérője $\varnothing D_k = 7,67$ mm. Az e) jelöléssel ellátott keverőelem azonban lényegesen különbözik az előbbi közöltektől. A keverőelemek kialakítás szerint egy apró axiális átömlésű járókerékre hasonlítanak, amelyek egyenként négy lapáttal vannak ellátva, és a lapátok külső átmérője $\varnothing D_k = 7,75$ mm [8]. Ellenben a korábban említett, és nagy általánosságban vizsgált keverőelemekkel, ez a járókerék nem statikus idom, hanem a rajta átáramló közeg hatására egy vékony tengely körül forog el, amely tövéből fogva van beragasztva egy zsákfuratba a távtartó rácson. Ez a kialakítás inkább a szubcsatornákon belüli kavargást és örvénylő áramlást képes elősegíteni.



3.3. ábra. A lézer által megvilágított mérőszék sémája

A lézer segítségével a pálcasorok közötti egyik hézag került átvilágításra, amelyik merőleges a kamera látótengelyére, és közelebb van a kamerához. Ezt az elrendezést a 3.3 ábra szemlélteti felülnézetből, ahol a zöld vonal a lézer síkja, a vörös ikon pedig a kamera nézőpontját jelöli. A mérőcsatorna megvilágítani nem kívánt részei egy átlátszatlan műanyag borítóval lettek leárnyékolva, így a lézer fénye egyetlen 1,5 mm vastagságú síkban hatolt át a mérőcsatornán, amit az ábra arányosan szemléltet. A kamera a távtartórács mögötti részből 105 mm × 65 mm területet befoglaló felvételt készít. Ebből az értékes információval rendelkező sáv

egy 100 mm × 40 mm terület, az ezen kívül eső tartományok ugyanis a mérőcsatorna melletti területek, amelyek még a kamera látóterébe esnek. A mérés során az alulról számított harmadik távtartó rácsot követő pálcaszakasz került megvizsgálásra.

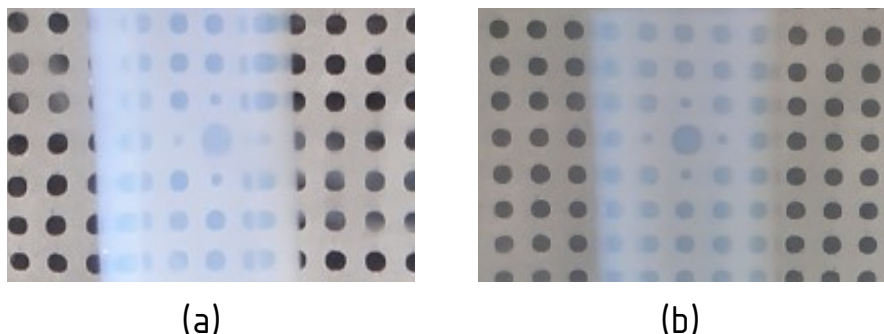
3.2. Peremfeltételek és a MIR módszer

A mérést megelőzően a vizsgált pálcaköteg behelyezésre került a mérőcsatornába, és az eltávolítható fedél megfelelő rögzítését követően a csatorna fel lett töltve vízzel. Ezt követően a szivattyú előzetes járatásával biztosítható volt a nyomjelző szemcsék megfelelő diszpergálása a közegben, valamint a folyadék felmelegítése a méréshez kívánt $T = 30^\circ\text{C}$ hőmérsékletre. A mérés során gondos figyelmet kellett fordítani arra, hogy ez a paraméter $\pm 1^\circ\text{C}$ tartományon belül mozogjon. A nyomjelző részecskéként szolgáló poliamid szemcsék átmérője $\varnothing D_{sp} = 50\ \mu\text{m}$. Erre fontos figyelmet fordítani, hiszen a nyomjelző részecske anyaga és szemcsemérete határozza meg a Stokes-számot, ami a folyadékokban szuszpendált részecskék áramláskövető képességét jellemző dimenziótlan mennyiség. Ha $Stk \ll 1$, akkor a részecske jól követi az áramvonalakat, az ebből származó hibát elhanyagolható. A Stokes-szám a 3.1 összefüggéssel határozható meg. Az ultrahangos mérőműszerek segítségével meghatározható a mérés során fennálló térfogatáram, amely a $V = 5,875\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ érték elégségesen kicsi környezetében mozgott. Eközben a megvilágított mérőszik lehetővé tette a kamera pozicionálását, ezzel beállítva a vizsgált terület és a fókusztávolságot. A kettős lézert egyenként állítva a megvilágítás intenzitása is finomhangolásra került. Ha ugyanis a megvilágítás túl erős, akkor a pálcákról való fényvisszaverődés torzíthatja a mérési értékeket, túl gyenge megvilágítás esetén pedig a kamera nem regisztrál elegendő nyomjelző részecskét, nagy lesz az adathiányosság a végeredményben, vagy bizonytalanabb lesz a kiértékelés. Miután minden paraméter beállításra került, megkezdődhetett a mérés, amely során a kamera 2100 képpárt alkotott közel 3 perc leforgása alatt, és az adatokat egyből átvezette a rendelkezésre álló számítógépre. Mivel az impulzuslézernak be kell melegedni ahhoz, hogy állandó intenzitású kisüléseket produkáljon, a mérés elején készült első 100 képpár selejtnek minősül, és nem kerül felhasználásra. A lézer külön bejáratására azért nincs lehetőség, mert a Dantec Timer Box összehangolva indítja a felvételt a lézer bekapcsolásakor.

$$Stk = \frac{\rho_{sp} \cdot D_{sp}^2 \cdot \bar{w}}{18 \cdot \mu \cdot \xi} = 5,7912 \cdot 10^{-6} \ll 1 \quad (3.1)$$

Az összefüggésben ρ_{sp} a nyomjelző részecske sűrűsége, D_{sp} a nyomjelző részecske átmérője, $\bar{w}$ a közeg átlagsebessége a mérőcsatornában, μ a közeg dinamikai viszkozitása és ξ az akadály jellemző mérete. Az utóbbi mennyiség a távtartó rács geometriájából lett levezetve.

Egy adott geometrián végzett mérést követően a rendszer le lett állítva, és a víz le lett eresztve a mérőcsatornából. Ekkor a csatorna fedele már eltávolítható volt, és megkezdődhetett a pálcaköteg átszerelése és visszahelyezése az új geometria mérésre való előkészítésképpen. Ez a procedúra ismétlődött meg a 3.1 és 3.2 ábrákon feltüntetett öt geometria esetében.



3.4. ábra. FEP pálcá a) tiszta vízben és b) glicerinnel oldatban egyeztetett törésmutatóval

A mérések során egy elterjedt és nagyon fontos eljárás került alkalmazásra az optikai torzításból származó hibák kiküszöbölésére. A mérőtérben ugyanis több különböző anyagú tárgy vagy közeg van, amelyek mindegyikének eltérő a törésmutatója. Ez azt eredményezi, hogy normál esetben csak a azokban a sávokban kapnánk valós eredményeket, ahol a mérőszík és a kamera között csak víz van a mérőcsatornában, ahol pedig FEP pálcák helyezkednek el, azok vakfoltként jelennének meg. Ennek elkerülését teszi lehetővé a MIR (angolul: Matched Index of Refraction) módszer, amely azt célozza meg, hogy a vizsgált térfogatban elhelyezett minden tárgynak és közegnek közelítőleg megegyezzen a törésmutatója. Esetünkben a víz $n_{H_2O} \approx 1,332$ ($T = 30^\circ C$) és az FEP $n_{FEP} \approx 1,344$ törésmutatóit kell összeegyeztetni. Ehhez kihasználjuk azt, hogy a víz bizonyos anyagokkal alkotott oldatának törésmutatója azok koncentrációja függvényében változik. A gyakorlatban ehhez nátrium-klorid vagy glicerinnel ($C_3H_8O_3$) oldatát alkalmazzák. A törésmutató beállításához és ellenőrzéséhez optikai refraktométer használata szükséges, ezzel lehet finom lépések útján beállítani a kívánt értéket. Esetünkben glicerinnel $vv\% = 8,2504\%$ térfogatarányú oldata megfelelőnek bizonyult a célra, ami már korábbi mérések során beállításra került [18]. Ezzel a hurokban keringő oldat sűrűsége $\rho = 1019,631 \frac{kg}{m^3}$ dinamikai viszkozitása pedig $\mu = 0,7972$ mPas értékűre adódott. Az előbbi érték abból a szempontból is fontos, hogy közel megegyezik a poliamid sűrűségével $\rho_{PA} = 1020 \frac{kg}{m^3}$, így minimalizálható az ülepedésből származó hibatag. Ez utóbbi később kerül részletezésre. Az így kapott oldat törésmutatója szinte megegyezik az FEP pálcák törésmutatójával, így a kamera a pálcák mögötti régiókról is

helytálló információt kap a felvétel készítése során. Ezt a hatást jól szemlélteti a 3.4 ábra (a) és (b) része. Maguk a pálcák belülről sóoldatos vízzel vannak töltve, amelynek koncentrációja ugyanúgy a fent részletezett elv szerint van beállítva. Erre azért van szükség, hogy a pálcán belüli közeg törésmutatója is megegyezzen az FEP törésmutatójával, és itt se keletkezzen optikai torzítás.

4. Hibaszámítás [9][5]

A 2.1 egyenlet mindkét oldalán felsorolt valamennyi tagot kétféle hiba terheli, ezek a statisztikai hiba és a rendszeres hiba. Ezek a mérés során rögzített adatok torzulását okozzák és bizonytalanságot eredményeznek a végeredményben. Ebből a rendszeres hibák becslése a hibaszámításra vonatkozó ANSI szabvány alapján 95%-os konfidenciaszinttel történik [1]. Az egyes hibák jelentése az alábbiakban van kifejtve.

- **Statisztikai hiba (S):** A mérés precizitása az egymást követő, azonos körülmények között végzett mérések eredményeinek egymáshoz mért közelségét, szórásuk mértékét adja meg. Mivel véletlenszerűen fordul elő a felvett adatokban ezért csak statisztikai alapon kimutatható, innen származik a jelölése: S (angolból: statistical error).
- **Rendszeres hiba (B):** A mérés pontossága a mért érték a mérendő mennyiség valós értékéhez való közelségét, attól való eltérését fejezi ki. Mivel azonos mérési körülmények között ez a hiba rendszeresen fennáll, ezért nagyságát csak becsülni tudjuk, ugyanis ismeretlen a valós érték is, amihez viszonyíthatnánk. Jelölése: B (angolból: bias error).

A rendszeres hiba esetén két mennyiséget különböztetünk meg, β_{xi} és b_x formájában. Ezek részletezése alább történik.

- **Egyedi rendszeres hiba (β_{xi}):** Ez az x mennyiség egy adott mérés során felvett i -edik felvett értékének rendszeres hibája, ami a mérési körülményekben bekövetkező esetleges változások okán módosulhat.
- **Kombinált rendszeres hiba (b_x):** Ez a teljes rendszeres hiba egy x mennyiség méréséből származóan. A kombinált rendszerességi hiba az egyedi rendszerességi hibák négyzetösszegéből képezhető.



Tetszőleges mérendő x és y komponensekre vonatkoznak ε statisztikus és β rendszeres hibák. Ezek segítségével a 4.1 egyenlettel írhatók fel egy mérési sorozatból vett $r = f_{x,y}$ minta két mért paramétere.

$$x_i = x_{valós} + \beta_{xi} + \varepsilon_{xi} \quad (4.1)$$

$$y_i = y_{valós} + \beta_{yi} + \varepsilon_{yi}$$

Az r mennyiség hibájára a 4.2 összefüggés írható fel.

$$\delta_{ri} = r_{x_i, y_i} - r_{x_{valós}, y_{valós}} \quad (4.2)$$

Az r valós értéke körül elvégzett Taylor sorfejtés eredményeként a 4.3 összefüggés származtatható.

$$\delta_{ri} = \Theta_x \beta_{xi} + \Theta_y \beta_{yi} + \Theta_x \varepsilon_{xi} + \Theta_y \varepsilon_{yi} \quad (4.3)$$

Ebben az egyenletben a Θ súlytényezőként szolgál, amely az egyes hibák hatásának súlyosságát fejezi ki. Ezt érzékenységi együtthatónak nevezzük, és általánosan a 4.4 számítással adható meg.

$$\Theta_j = \frac{\partial r}{\partial x_j} \quad (4.4)$$

A 4.3 egyenletet négyzetre emelve és összegezve az N számban vett mintára származtatható a 4.5 egyenlet.

$$u_r^2 = \Theta_x^2 b_x^2 + \Theta_y^2 b_y^2 + 2\Theta_x \Theta_y b_{xy} + \Theta_x^2 S_x^2 + \Theta_y^2 S_y^2 \quad (4.5)$$

Itt u_r a kombinált sztenderd bizonytalanság b_x^2 , b_y^2 valamint S_x^2 , S_y^2 rendre a rendszeres valamint a statisztikus hibák szórásnégyzetei, b_{xy} pedig a rendszeres hibák kovarianciája, amelyet az ANSI szabvány zérusnak vesz, így az a tag kiesik az egyenletből. Ez alapján a 4.5 egyenlet az alábbi két tagra bontható szét.

$$B_r^2 = \Theta_x^2 B_x^2 + \Theta_y^2 B_y^2 \quad (4.6)$$

$$S_r^2 = \Theta_x^2 S_x^2 + \Theta_y^2 S_y^2 \quad (4.7)$$



Szabvány szerint ezek a mennyiségek az alább felírt 4.8 egyenlet alapján összegzendők az előírt 90%-os konfidenciaszint eléréshez.

$$U_{RSS} = \sqrt{B_r^2 \tau_{95} S_r^2} \quad (4.8)$$

Ahol $\tau_{95} = 2$, amennyiben a mintavételezés száma $N > 30$. Esetünkben $N=2000$, így a kritérium teljesül, a hibaszámításban a korábban közölt értékkel számoltam.

4.1. Az α nagyítás hibája

A nagyítás meghatározására egy, a mérő sík pozíciójába helyezett kalibrációs lap segítségével került sor. Meghatározza, hogy hogy aránylik egymáshoz a lapon kijelölt kalibrációs pontok távolsága és az alkotott képen ugyanezen pontok pixelben mért távolsága. Ezt a

$$\alpha = \frac{l_{sel}}{L_{sel}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{px}} \right] \quad (4.9)$$

Itt $l_{sel} = 31,5$ mm két kalibrációs pont közötti távolság, és $L_{sel} = 365$ px ugyanezen pontok felvételen mért távolsága. A összefüggés parciális differenciálásából számítható érzékenységi együtthatók a következők.

$$\Theta_{1.1} = \frac{\partial \alpha}{\partial L_{sel}} = -\frac{l_{sel}}{L_{sel}^2} = -0,00023644 \frac{\text{mm}}{\text{px}^2} \quad (4.10)$$

$$\Theta_{1.2} = \frac{\partial \alpha}{\partial l_{sel}} = \frac{1}{L_{sel}} = 0,002739 \frac{1}{\text{px}} \quad (4.11)$$

L_{sel} leolvasásának bizonytalansága $\pm 0,5$ px, ami mindkét pontra vonatkozik. Ebből $B_{1.1} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2} = 0,7071$ px. A kalibrációs kártya nyomtatásának pontossága 2%, ami $B_{1.2} = 31,5 \cdot 0,02 = 0,63$ mm pontatlanságot jelent.

A nagyítás számításába egyéb forrásokból is bejöhethetnek hibatagok. A kamera gyártási tűrései beleszólhatnak az alkotott kép pontosságába. Egy jó minőségű objektív lencsájének képmézőelhajlása 0,5%-os torzítást visz be a képbe. Ez $B_{1.3} = 0,005 \cdot L_{sel} = 1,825$ px hibát jelent. További hibát jelenthet a digitális kamera képérzékelő pontjainak a gyártási pontatlansága, ami a



nagyításban jelenik meg. A gyártó által megadott adatok szerint ez $B_{1.4} = 0,0056$ px. Az utóbbi két hibára a 4.10 összefüggésben közölt érzékenységi együttható vonatkozik. Figyelembe kell venni továbbá azt az esetet is, ha a kalibráció során a kalibrációs kártya és a valós mérés során a megvilágított sík nem párhuzamosak. Ez kismértékű szöghibaként becsülhető, ami a jelen kutatásban $B_{1.5} = \theta = 0,035$ rad értékűnek lett véve. A szöghiba a nagyításban a 4.12 egyenlet szerint jelenik meg. A szöghibára vonatkozó érzékenységi tényező a 4.13 összefüggés szerint számítható.

$$\alpha = \frac{l_{sel} - l_{sel}\theta^2}{L_{sel}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{px}} \right] \quad (4.12)$$

$$\Theta_{1.5} = \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} = -\frac{2l_{sel}\theta}{L_{sel}} = -0,006041 \frac{\text{mm}}{\text{px}} \quad (4.13)$$

4.2. A ΔX képi elmozdulás hibája

A képi elmozdulásra a 4.14 összefüggés írható fel. A képi hiba egyik legfőbb okozója a megvilágításból származik. Ha a két megvilágítás során a nyomjelző szemcse két átelles oldalra kap erősebb fényt, akkor azt a képfeldolgozó szoftver a keresztkorrelációnál elmozdulásnak veszi, aminek maximális mértéke a szemcse átmérője. Például ha először a szemcse bal oldala, majd a jobb oldala kap erősebb megvilágítást, akkor ez egy jobbra tartó mozgásnak tűnhet. Jól kontrollált körülmények között ennek a jelenségnek a nagysága a szemcseátmérő tizedére korlátozható, vagyis $0,1 \cdot D_{sp} = 0,005$ mm értékre. Ebből a rendszeres hibatag, figyelembe véve, hogy két egymás után készített képen határozzuk meg az elmozdulást, $B_{2.1} = \sqrt{0,005^2 + 0,005^2} = 0,0071$ mm A megvilágításból eredő hibához tarozó érzékenységi együtthatót a 4.15 egyenlet írja le.

$$\Delta X = \frac{\Delta x}{\alpha} \text{ px} \quad (4.14)$$

$$\Theta_{1.5} = \frac{\partial \Delta X}{\partial \Delta x} = \frac{1}{\alpha} = 11,5863 \frac{\text{px}}{\text{mm}} \quad (4.15)$$

A CCD gyártási pontatlanságából származó hiba, ami a képmezőelhajlásban jelentkezik, a képi elmozdulás számításánál is megjelenik, amelynek értéke $B_{2.2} = 0,0056$ px. A képfeldolgozó

szoftvert bizonyos technológiai korlátok akadályozzák abban, hogy pontosan tudja értékelni a képi elmozdulást. Ez két tényezőben jelenik meg, az elmozdulás meghatározás hibájában, amelynek pontossága $B_{2.3} = 0,033$ px és precizitása $S_{2.3} = 0,017$ px, valamint az interrogáció miatti kisimításban, amelynek pontossága $B_{2.4} = 0,008$ px. Az utóbb felsorolt tényezők mindegyike képpont dimenziójú, a képi elmozdulás számításában érzékenységi tényezőjük egyaránt $\Theta_{2.2} = \Theta_{2.3} = \Theta_{2.4} = 1$.

4.3. A Δt késleltetés hibája

A késleltetés értékének hibájában két tényező játszik szerepet. Egyfelől a szinkronizálóegység (Dantec Tiemr Box 80N77) katalógusadataiból leolvasható rendszeres hiba értéke $B_{3.1} = 12,5$ ns. A másik az úgynevezett jitter, ami a lézerek egyik jellemzője. Ez a lézerimpulzus időzítésének pontatlanságát jellemző adat, amelyet mind a pontosságnál, mind pedig a precizitásnál figyelembe kell venni. A Litron Nano L 135-15 katalógusadataiból leolvasható érték $B_{3.2} = S_{3.2} = 0,5$ ns. Mindegyik tényezőhöz tartozó érzékenységi együttható értéke $\Theta_{3.1} = \Theta_{3.2} = 1$.

4.4. A δu sebességeltérés hibája

A nyomjelző részecskék áramláskövető képessége két úton befolyásolja a sebességmérés pontosságát, ez a gyorsuláskövetés és a gravitációs süllyedés. A gyorsuláskövetési képesség a szemcsék méretétől és sűrűségétől, valamint a közeg sűrűségétől függ. Mivel a szemcsék sűrűsége kellően közel áll a használt glicerín-víz oldat sűrűségéhez, és a szemcsék mérete elégségesen kicsi, a gyorsuláskövető képességük kielégítő lesz, nem számít jelentékeny hibaforrásnak. A gravitációs süllyedés viszonylag könnyen számszerűsíthető. A Stokes törvény értelmében a 4.16 összefüggés írható fel. A kapott értékhez tartozó érzékenységi együttható $\Theta_{4.1} = 1$.

$$B_{4.1} = U_g = D_{sp}^2 \frac{\rho_{sp} - \rho}{18\mu} g = 0,0009998 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (4.16)$$

Az összefüggésben D_{sp} a nyomjelző szemcsék átmérője, ρ_{sp} a nyomjelző szemcsék sűrűsége, ρ a közeg sűrűsége, μ a közeg dinamikai viszkozitása és $g = 9807,813 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$. További torzítást jelent a háromdimenziós áramlás perspektíva hatása. Ez abból ered, hogy a sebességvektoroknak lehet



a fénysíkra merőleges komponense is, amit a kiértékelő program nem tud figyelembe venni. Ennek értékét a 4.17 egyenletből kaphatjuk meg, az ehhez tartozó érzékenységi tényező szintén $\Theta_{4.2} = 1$.

$$B_{4.2} = \bar{w} \cdot \tan\phi = 0,3010 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (4.17)$$

Az összefüggésben $\bar{w}$ a mérőcsatornában az átlagsebesség, értéke a 4.18 egyenletben van megadva, $\tan\phi = 0,2019$, a képmagasság fele, és a kép-objektív távolság hányadosa. ϕ tehát a kamera függőleges látószögének fele, a perspektívaszög.

$$\bar{w} = \frac{V}{A} = 1,4909 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.18)$$

A 4.18 egyenlet bevezet további kettő hibaforrást, nevezetesen a térfogatáram-mérés és az áramlási keresztmetszete hibája formájában. A keresztmetszeti hiba pontossága gyártói katalógusadatok alapján 6,33%, ami $B_{4.3} = 0,0633 \cdot A = 69,2883 \text{ mm}^2$ értékű. Az érzékenységi tényező a 4.19 egyenlettel számítható.

$$\Theta_{4.3} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial A} = -\frac{V}{A^2} = -1,3620 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}^4 \cdot \text{s}} \quad (4.19)$$

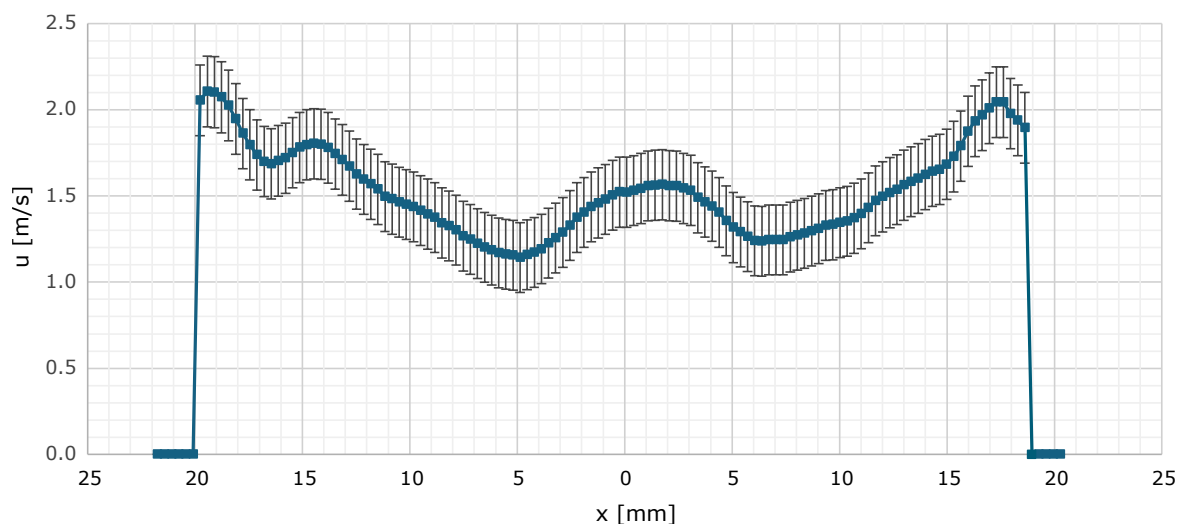
A térfogatáram-mérés hibája tapasztalat alapján, figyelembe véve, hogy három térfogatáram-mérő van elhelyezve a hurokban, 1,07%-nak adódott. Hibaszámításhoz ezt felülbecsüléssel 2%-nak határoztuk meg, így a rendszeres hibatag értéke $B_{4.4} = 0,02 \cdot V = 3264,8889 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$. Az érzékenységi tényező meghatározásához a 4.20 összefüggés alkalmazható.

$$\Theta_{4.4} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial V} = \frac{1}{A} = 0,0009136 \frac{1}{\text{mm}^2} \quad (4.20)$$

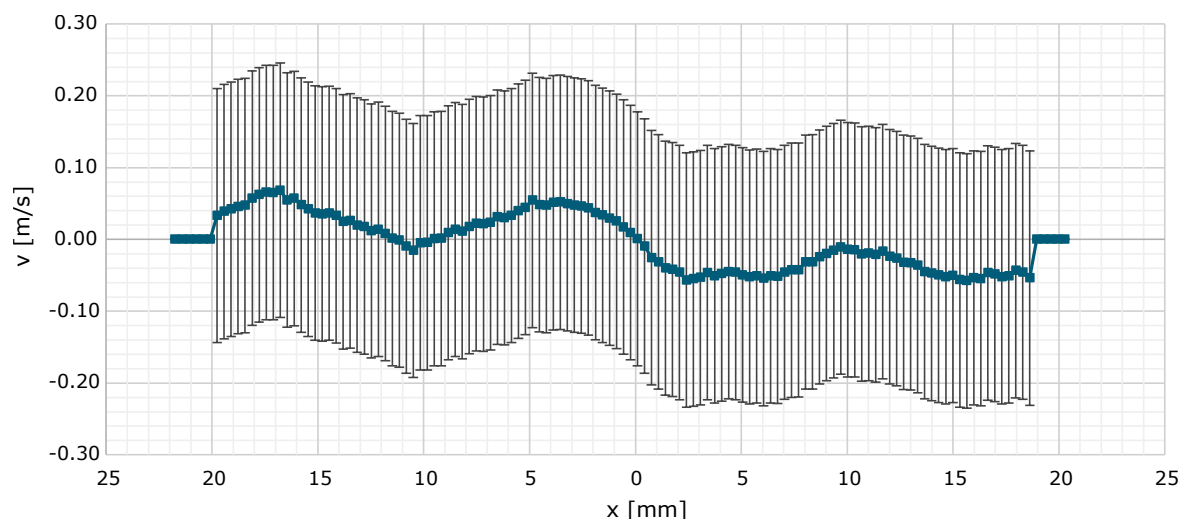
A hibaszámítás eredményeit a hornyolt tölcseres típusú keverőelem példáján vannak bemutatva, amelyben a távtartó rácstól felmért $3D_p$ távolságban kiértékelte eredmények lettek közölve. Az axiális sebességkomponens átlagszórása $\sigma_{\Delta u} = 0,2034 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, ami $e_{\Delta u} = 13,64\%$ átlagos relatív szórást jelent. Ez viszonylag kis hibának minősül a PIV módszertanban. A transzverzális irány sebességkomponens átlagszórása $\sigma_{\Delta v} = 0,1771 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, ami $e_{\Delta u} = 498,67\%$ átlagos relatív szórást



jelent. Ez a magas érték viszont nem a mérés pontatlanságából fakad, hanem abból, hogy kicsi a transzverzális irányú sebességkomponensek átlagértéke. Ha összevetjük az eredményt az axiális iránnyal, látható, hogy az átlagszórás kisebb a transzverzális irányban. A hibasávokkal ellátott axiális- és transzverzális irányú sebességprofilok rendre a 4.1 és 4.2 ábrán láthatók.

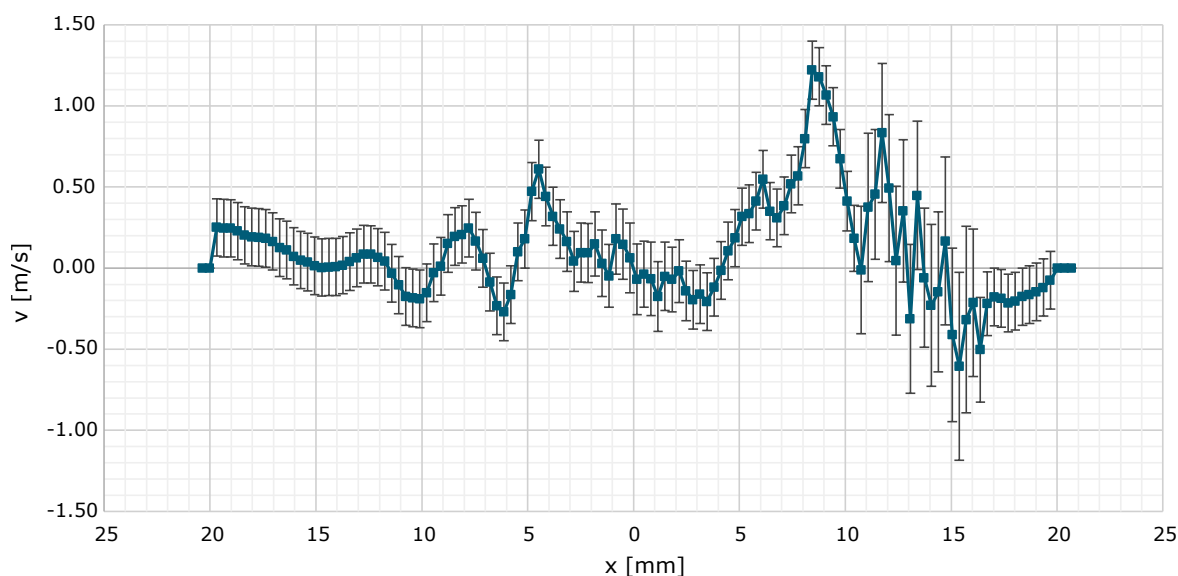


4.1. ábra. Hornyolt tölcséres keverőelem axiális sebességprofilja a távtartótól mért $3D_p$ távolságban (vektorgrafikus)



4.2. ábra. Hornyolt tölcséres keverőelem transzverzális sebességprofilja a távtartótól mért $3D_p$ távolságban (vektorgrafikus)

Kiugróan magas szórás a járókerekes keverőelemnél volt megfigyelhető legfőképpen a transzverzális sebességkomponens esetében, a távtartóhoz közvetlen közeli régióban. A mérés során a lézervény a grafikon bal oldala felől érkezik, és áthalad a forgó járókerekeken. Emiatt a forgó járókerék becsillant a megvilágítás hatására, és zajos adatokkal szolgált a képkalkoló rendszer számára. A 4.3 ábra jobb oldalán jól megfigyelhető, hogy torzult a sebességprofil, valamint a hibasávok is jelentősen megnövekedtek.



4.3. ábra. Járókerekes keverőelem transzverzális sebességprofilja a távtartótól mért $0,5D_p$ távolságban (vektorgrafikus)

5. A mérés eredményeinek kiértékelése

A képkalkoló rendszer által készített felvételek azonnal átvitelre kerültek egy számítógépre, ahol a további feldolgozás a Dantec DynamicStudio szoftver segítségével történt. Először a program különböző maszkolási és szűrési folyamatokon keresztül letisztázza a képeket, hogy csak egy homogén fekete háttér előtt a fehér nyomjelző részecskék képei legyenek láthatóak. Ez a folyamat a pálcák mögötti sávokban akaratlanul is némi adatvesztéssel jár, ugyanis a gyengén megvilágított részecskék kimaszkolásra kerülhetnek. Megfelelően beállított megvilágítás esetében azonban ez a veszteség elhanyagolható, és a nagy mintavételezési szám miatt nem befolyásolja a végeredményeket. Ezt követően a szoftver elvégzi az egyes képpárok esetén a pillanatnyi sebességkomponensek számítását. Az így kapott adatsorok exportálásra kerülnek

további feldolgozás céljából, amit MATLAB programrendszeren végeztem. Erre rendelkezésre állt egy kifejezetten PIV mérési eredmények feldolgozására kifejlesztett bővítmény, a PIVMat Toolbox. A MATLAB kód segítségével a pillanatnyi sebességértékek (u_i) először meg lettek szűrve, megszabadulva a kiugróan magas vagy alacsony értékektől, amiket valamilyen mérési hiba, vagy rendellenesség eredményezett. Ezekből aztán meghatározásra került az egyes pontok idő szerint átlagolt sebességértéke (U), annak felhasználásával pedig a fluktuációs komponensek (u'_i). A további eredmények számítása a sebességkomponensek ezen két tagjából történt. A fent bevezetett három tag összefüggését axiális esetben a 5.1 és 5.2 egyenletek írják le, amiből az előbbi Reynolds felbontásnak nevezünk. A transzverzális sebességkomponensre a 5.3 és 5.4 egyenletek vonatkoznak.

$$u_i = U + u'_i \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.1)$$

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.2)$$

, ahol $N = 2000$ a mintavételezési szám.

$$v_i = V + v'_i \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.3)$$

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.4)$$

, ahol $N = 2000$ a mintavételezési szám.

A fent közölt egyenletek eredményeiből a 5.5, 5.6 és 5.7 összefüggések felhasználásával következtethető az adott pontbeli abszolút sebesség idő szerint átlagolt szórás (STD) értéke.

$$W_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.5)$$

$$W = \sqrt{U^2 + V^2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.6)$$

$$\overline{STD}_W = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_i - W)^2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.7)$$



Az STD az áramló folyadék abszolút sebességének idő szerint átlagolt ingadozását jellemző mérőszám, ami egyben a turbulencia mértékére is utalást ad. A vizsgált öt geometria sebességterének szórását összehasonlítva az A8 melléklet tartalmazza.

Az áramlás egyik fontos jellemző mennyisége a turbulens kinetikus energia (TKE). Ez megadja a sebességtér fluktuációs komponenseiben tárolt mozgási energiát, ami végül veszteségként hővé disszipálódik, és szoros összefüggésben van az áramlat turbulenciafokával. Minél nagyobb a turbulens kinetikus energia, annál zavarosabb az áramlás, és annál jobb a keveredés mértéke. Ennek számítására az 5.8 egyenlet áll rendelkezésre.

$$\overline{TKE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{u_i'^2 + v_i'^2}{2} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (5.8)$$

Egy másik, a folyadék turbulenciájával szoros összefüggésben álló mennyiség a Reynolds feszültség. A Reynolds feszültség megadja a fluktuációk hatására az egymáson elcsúszó folyadékrétegek között keletkező feszültségeket amit az 5.9 összefüggésben szereplő szimmetrikus feszültségtenzor jellemez. Összenyomhatatlan folyadékokat feltételezve az egyenletet szokás a sűrűséggel egyszerűsíteni. Esetünkben a feszültségtenzor bal felső almatrixát tudjuk meghatározni, a c sebességkomponens ugyanis merőleges a vizsgált síkra. Ezen tagok meghatározására az 5.10, 5.11 és 5.12 összefüggések alkalmazhatók.

$$\overline{\overline{R}} = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'c'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'c'} \\ \overline{c'u'} & \overline{c'v'} & \overline{c'c'} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

, ahol u' , v' és c' a három térkoordináta irányába mutató sebességkomponensek idő szerint átlagolt fluktuációs tagjai, és ρ a folyadék sűrűsége.

$$\overline{u'u'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{u_i' \cdot u_i'}{N} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (5.10)$$

$$\overline{u'v'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{u_i' \cdot v_i'}{N} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (5.11)$$

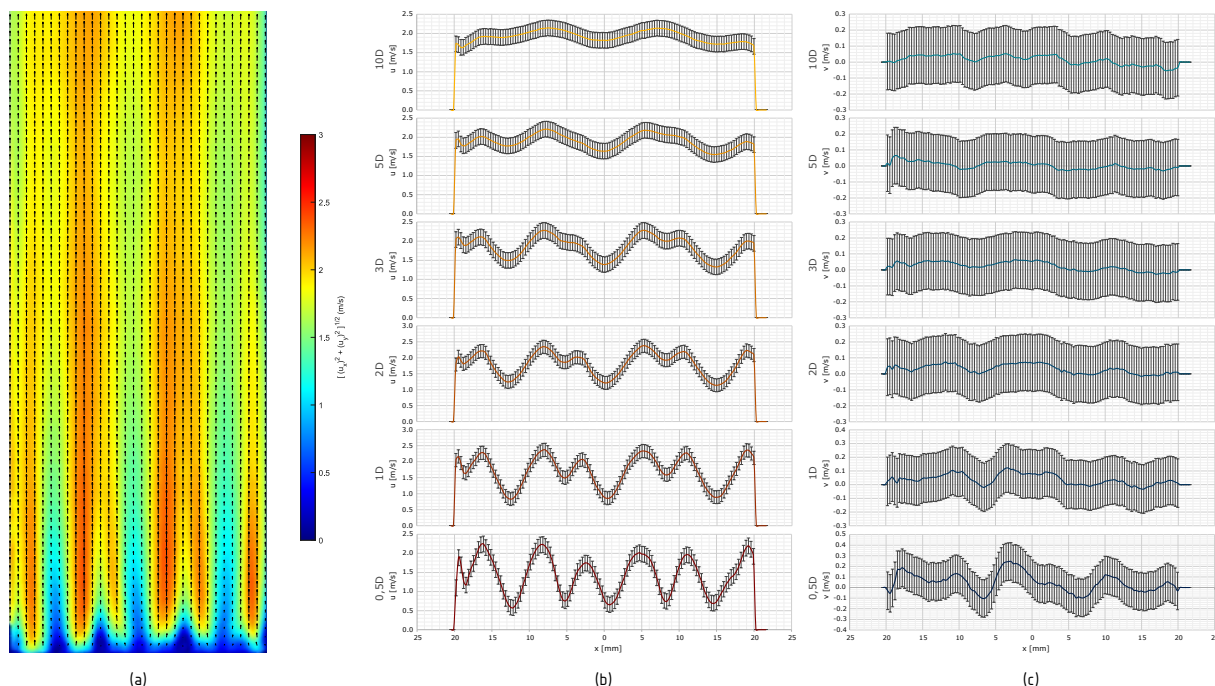
$$\overline{v'v'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{v' \cdot v'}{N} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (5.12)$$

A Reynolds feszültségek tehát jó képet adnak arról, hogy a vizsgált térrészen belül hol, milyen irányú és mértékű keveredés megy végbe, ami elősegíti a hőátadást. Arról is információval szolgálnak, hogy a pálcák közötti hézagokon történik-e átáramlás az egyes szubcsatornák között. A vizsgált geometriák Reynolds feszültségeinek 5.10, 5.11 és 5.12 egyenletek alapján számított tagjait az A5, A6, A7, A8 és A9 számú mellékletek összesítik.

5.1. Kétdimenziós áramképek vizsgálata

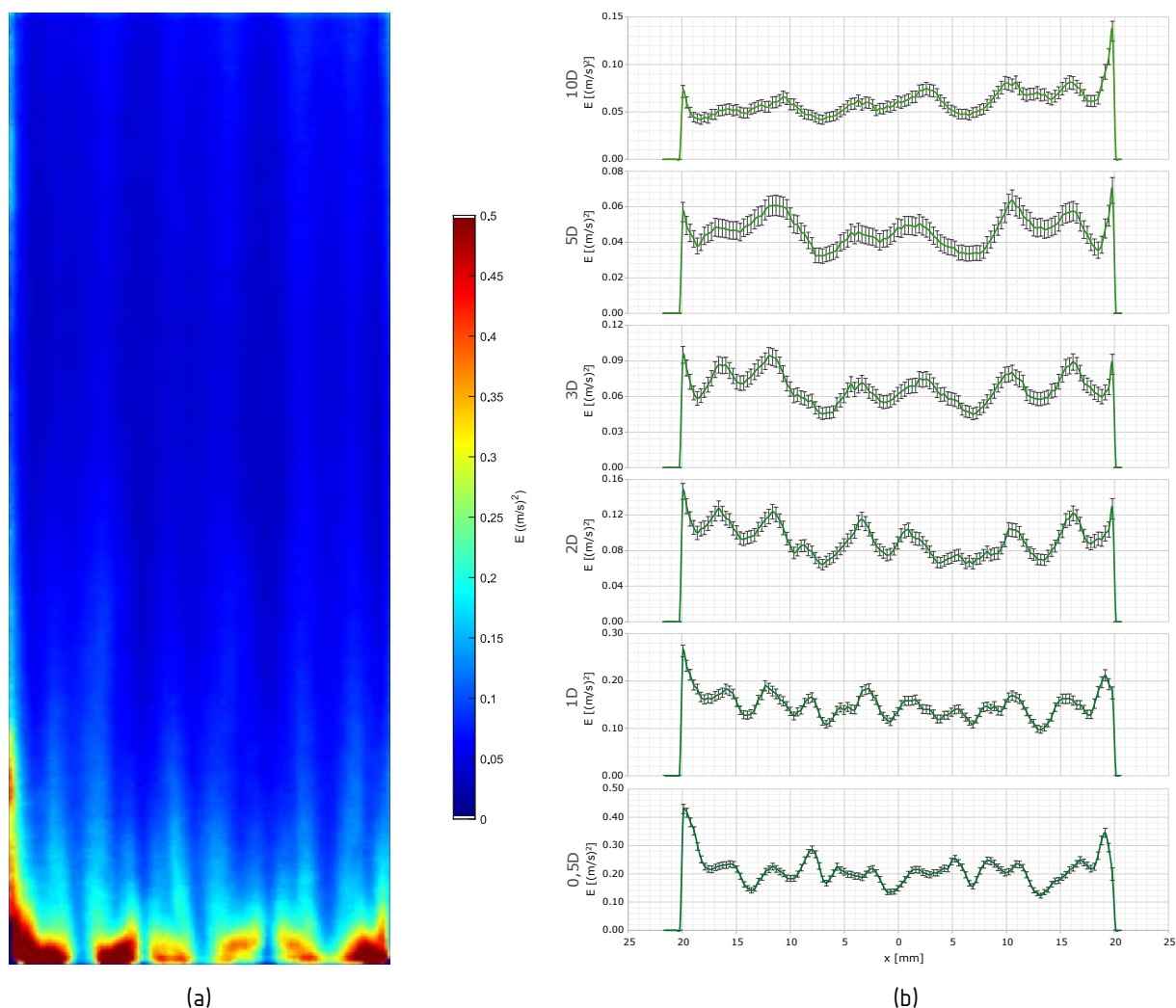
Az első vonatkoztatási célból leírt geometria a hagyományos **keverőelem nélküli** távtartó rács volt. A távtartó geometriája még speciális keverőelemek nélkül is meglehetősen bonyolult, a pálcák rögzítésére szolgáló idomok is okoznak zavarokat az áramlásban. Ehhez hozzáadódik, hogy az áramlás jelege alapvetően is erősen turbulens, a mérés során 10^4 nagyságrendű, míg energetikai reaktorok esetében akár 10^5 nagyságrendű Reynolds-számok uralkodnak. Azonban a 5.1 ábra (a) részét megfigyelve, ami a sebességek idő szerint átlagolt vektormezejét ábrázolja, látszódik, hogy hosszú távon nincs uralkodó keresztáramlás a szubcsatornák között. Vagyis a zóna, és azon belül egy kazetta felosztható virtuális "zárt" csatornák összességére, amiken úgy áramlik át a közeg, hogy az egyes szubcsatornák között nincs jelentős közegcsere. Ez azt eredményezi, hogy ha a pálcák közt egyenetlen a hőfelszabadulás, kialakulhatnak meleg vagy hideg csóvák a zónában, amik nem oszlanak el. Az (a) és a (b) ábrarész azt is alátámasztja, hogy erősen inhomogén az áramlási sebesség. A szubcsatornák belsejében egy-egy gyorsan haladó zóna alakul ki, míg a pálcák közötti hézagokban, valószínűleg a falhatás miatt, az áramlás lényegesen lassabb. Közvetlenül a rácsot követő régióban látható, hogy a rácsok hatására az axiális sebesség sok helyen lecsökken. A középső kettő kisebb távon jelenlévő alacsonyabb sebességű zóna a távtartó rács cellainak falaival esnek egy pozícióba, a három hosszabb távon jelenlévő alacsony sebességű zóna pedig a pálcákat befogó bütykök mögött kialakuló áramlási holtter miatt jön létre. Ez azt is eredményezi, hogy a távtartórács hatására itt megnövekedik a sebesség transzverzális komponense, ami a (c) ábrarészen figyelhető meg. Azonban ennek a keresztirányú áramlásnak a csúcspontjai nem a pálcák közötti hézagokban vannak, hanem szintén a szubcsatornák belsejében, és maga a hatás hamar relaxálódik a távtartótól távolodva. Mindez azt eredményezheti, hogy a lassabban áramló hűtőközeg lokálisan túlmelegedhet,

aminek következtében csökken a hőátadás, és ez a pálcaburkolat melegedéséhez vezethet. A biztonsági elemzésekben ezen melegpontok (hot-spotok) adják a kazetta üzemére vonatkozó elfogadási kritériumokat. Ezek mértékének csökkentése nemcsak a biztonságot növeli, hanem gazdasági szempontból is előnyös.



5.1. ábra. Keverőelem nélküli távtartó rácsot követő mező a) sebességvektor-tere b) axiális sebességprofilok a rácsból felmért különböző távolságokban c) transzverzális sebességprofilok a rácsból felmért különböző távolságokban (vektorgrafikus)

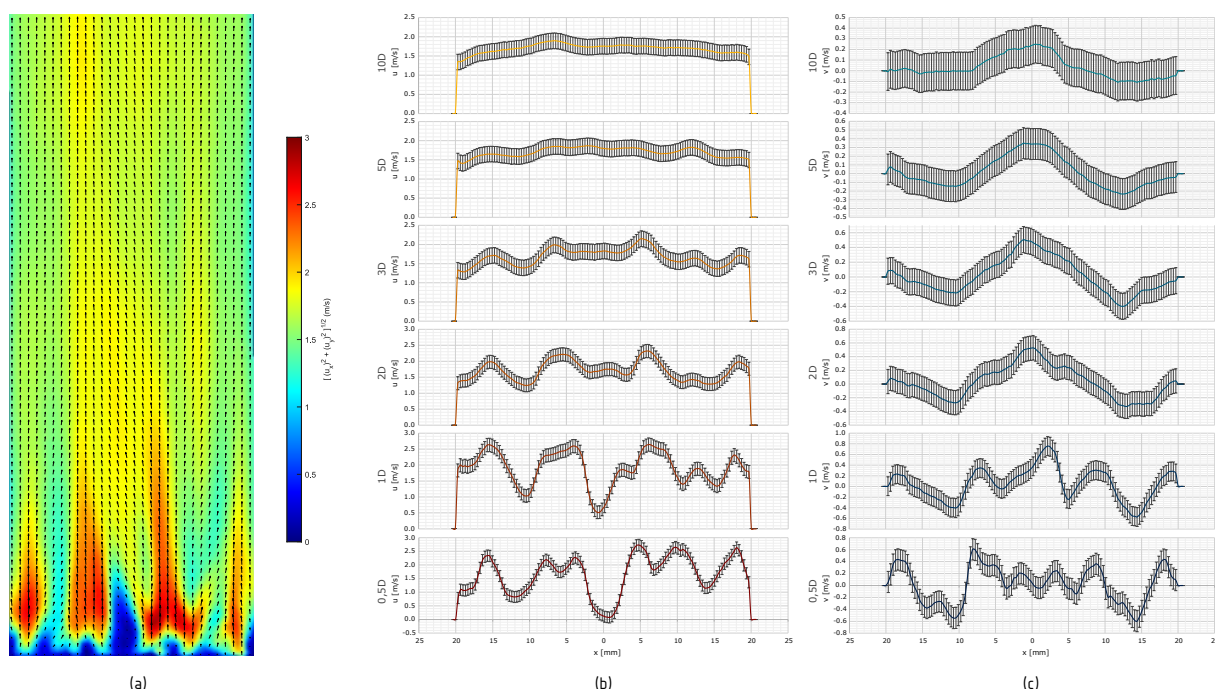
A turbulens kinetikus energia értékének eloszlását a megvilágított síkban az 5.2 ábra (a) része mutatja be, míg a (b) részről a turbulens kinetikus energia értéke olvasható le a távtartó rácsból mért különböző távolságokban. Ehhez általában a hidraulikai vagy a pálcáátmérőt veszik alapul, jelen kutatásban az utóbbit, vagyis a kiértékelt vonalak a távtartó rácsot követően $0,5D_p$, $1D_p$, $2D_p$, $3D_p$, $5D_p$ és $10D_p$ helyezkednek el. Az ábra alapján jól látszik, hogy a TKE érték csak közvetlenül a távtartó rácsot követően számottevő, ami az ott bekövetkező perturbációknak tulajdonítható. A hatás azonban rohamosan disszipálódik, és a görbékről leolvasható, hogy végig csökkenő tendenciát mutat a vizsgált szakasz mentén. Az alsó görbék bal szélé kiugróan magas értékeket mutat, ami a két dimenziós skalármező bal alsó sarkában is látszódik. Ez nagy valószínűséggel valótlan adat, ami a lézer megvilágítás egyenetlen eloszlásából fakad.



5.2. ábra. Keverőelem nélküli távtartó rácsot követő mező a) turbulens kinetikus energiája b) TKE értékek a rácsból felmért különböző távolságokban (vektorgrafikus)

A második referencia mérés egy "split" típusú keverőfülekkel ellátott távtartó rácson ment végbe. Az 5.3 ábra (a) részén jól kivehetők az egyes keverőfülek hatásai. A keverőfül nélküli esethez képest teljesen más áramképet hoz létre a keverőfül. A baloldali szubcsatorna aljánál egymás mellett egy nagy sebességű vörös csóva, tőle jobbra egy alacsony sebességű sötétkék csóva látható. Ez annak köszönhető, hogy ahol a kisebb érték látszódik, ott a keverőfül a megvilágított síkból kifelé áll, a síkba eső axiális sebességkomponens sokkal kisebb lesz az oldalra terelő hatás miatt. Tőle balra a nagy sebességű csóva mögött a keverőfül az ellentétes irányba terel, a síkon áthaladó csóva az iránya nem módosul, így az nagy sebességgel lépi át a távtartó rácsot. A jobb oldali szubcsatornánál megfigyelhető egy háromágú nagy sebességű folyadékcsóva. Ebből a két széttartó a két ellentétes irányba terelő keverőfül hatására irányt váltó vízszög, míg a

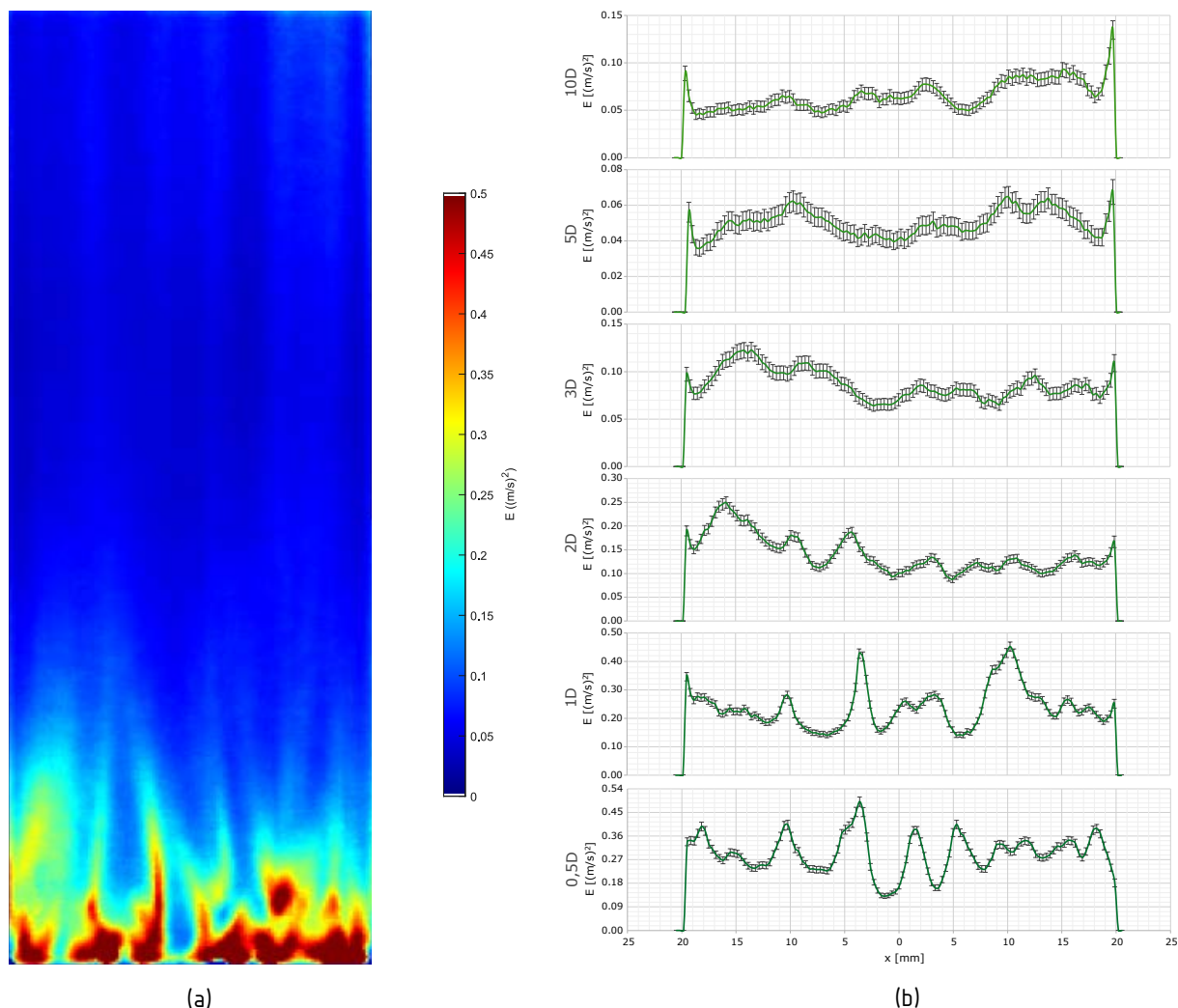
középső az előzőekben leírt, ellenállásba nem ütköző folyadékáram lehet. A távtartótól távolodva a vektormezőben látható sebességnövekedés a középső pálcák közötti hézagban, amit a (b) és (c) ábrarészlet is alátámaszt. Utóbbiról leolvasható, hogy egy balos orientáltságú átáramlásról van szó, amelyen keresztül jelentős térfogatáram megy végbe a jobb oldali szubcsatornából a bal oldali felé. Áthaladva a hézagon az oldalirányú sebességkomponens egyre csökkenni kezd, az áramlás kiegyenesedik, de mindezek mellett is hosszú távon fennmarad az átkeveredés. A vizsgált szakasz végéhez közeledve a sebességmező viszonylag egyenletes eloszlású, nincsenek kiugróan magas értékek, és a sebességprofilok alapján az áramlás jellege kezdi megközelíteni a turbulens áramlásra jellemző hetedfokú parabola szerinti sebességeloszlást.



5.3. ábra. "Split" keverőfüles távtartó rácsot követő mező a) sebességvektor-tere b) axiális sebességprofilok a rácsból felmért különböző távolságokban c) transzverzális sebességprofilok a rácsból felmért különböző távolságokban (*vektorgrafikus*)

A keverőfüles esetben megfigyelhető TKE eloszlást az 5.4 ábra szemlélteti. Látható, hogy ugyan a keverőfülek hatására a TKE értékek nagyobb tartományokban mutatnak kiugró értékeket, valamint lassabban disszipálódik ez az energia, a vizsgált tartomány többségében nagysága nem haladta meg jelentősen a keverőelem nélküli eset TKE értékeit. Ez azonban nem jelenti a keverőelem hatástalanságát, ugyanis annak célja a keresztirányú áramlás serkentése. A megfigyelt jelenségek arra utalnak, hogy a "split" típusú keverőfülek nem zavarják meg lényegesen az áramlást, csupán orientálják azt. Ahol a (b) ábrarészen kiugró értékek figyelhetők meg a kö-

teg belseje felé, azok a vízszög felgyorsulása következtében megnövekedett turbulenciafoknak tulajdoníthatók. Érdekes megfigyelés azonban, hogy a turbulenciafok csökkenését követően a vizsgált tartomány jobb felső sarkához közeledve újból növekedés észlelhető.

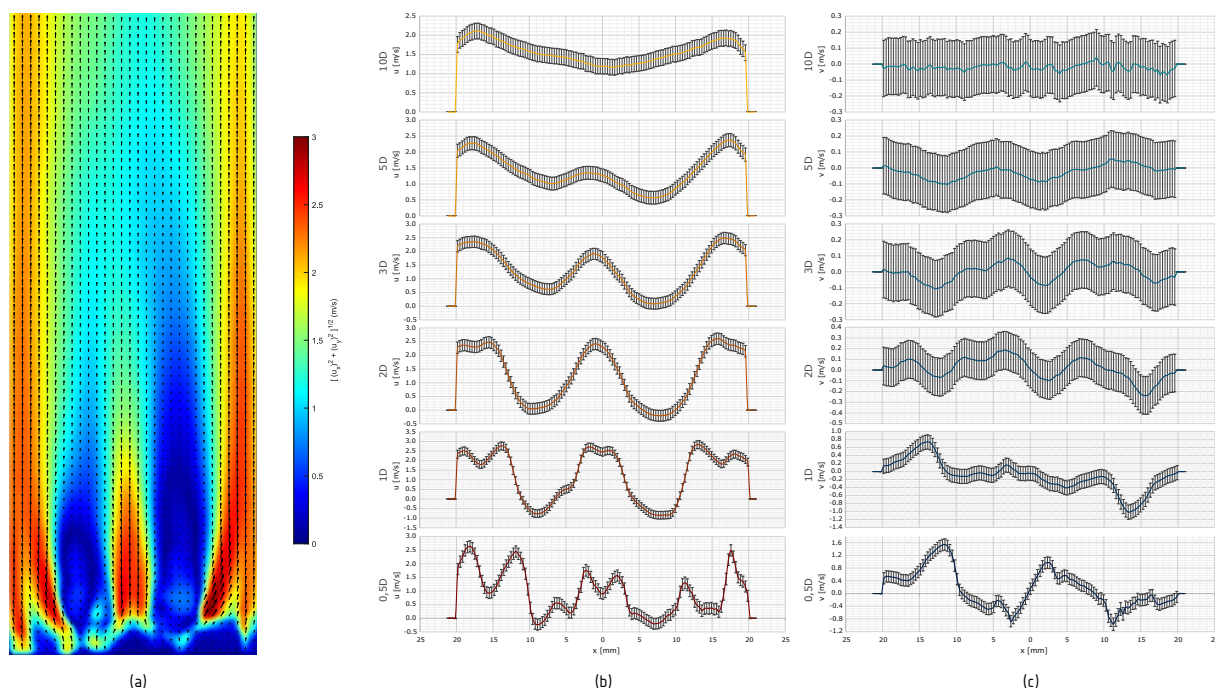


5.4. ábra. "Split" keverőfüles távtartó rácsot követő mező a) turbulens kinetikus energiája b) TKE értékek a rácsból felmért különböző távolságokban (vektorgrafikus)

Az elsőként vizsgált rendhagyó geometria a **tölcséres kialakítású keverőelem** volt. Az ehhez felvett sebességvektor-mezőt és az axiális- és transzverzális sebességkomponensek változását szemléltető görbék az 5.5 ábrán láthatók. A kirajzolt vektormező megfelelt a kezdeti várakozásoknak, egy ilyen tárcsás elrendezésű konkáv alakzaton várható a komoly leválási örvények keletkezése, amit az ábra (a) része alátámaszt. A tölcsérek belsejében található központi furat azért volt elhelyezve, hogy az azon áramló folyadék pótolja ezt az űrt, és némileg csillapítsa a leválások hatását. A mérés során azonban az volt megfigyelhető, hogy a közeg túl nagy hidrau-

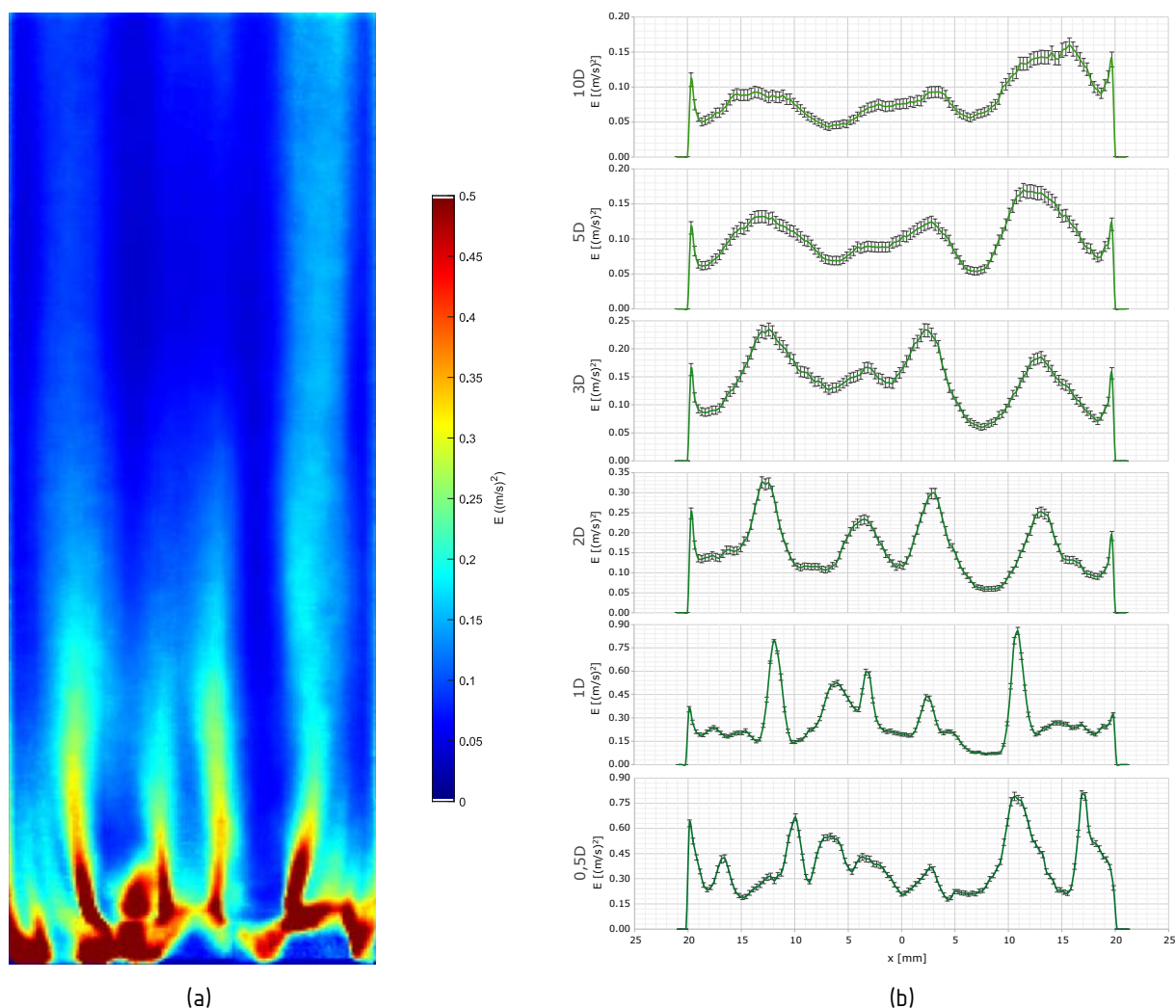


likai ellenállásba ütközik ebben a keskeny furatban, így ezen keresztül nem történt jelentékeny közegáramlás. Ennek következtében a leválási örvény belsejében a közeg visszafele áramlik, ami egy pangó zónát eredményez. Ezt a jelenséget jól szemlélteti a (b) ábrarészlet, ahol látszik, hogy $1D_p$ távolságban a visszaáramló sebesség nagysága a keverőelemek felett $u = -0,75 \frac{m}{s}$ értéket is eléri. A visszaáramlás rövid távon csillapodik, de a szubcsatornákon belül az áramlás sebessége hosszú távon kis mértékű marad a csóvák mentén, és lassan homogenizálódik. Ennek a lassú áramlásnak az a negatív vonzata lehet, hogy a közeg jobban felmelegedik, ami a pálcaburkolat túlhevülését okozhatja. A két szubcsatorna közötti átáramlás nem volt jelentős, ezt bizonyítja a (c) ábrarészlet, ugyanis a keverőelemek által eltérített közegek a pálcák közötti résben ütköztek, és kioltathatták egymás keresztirányú komponenseit. Ugyanakkor a köteg külső széle felé jelentős keresztáramlás figyelhető meg, és a fal menti hézagban megnövekedett sebességgel áramlik a közeg, ami az oda áterelt többlet térfogatáramnak köszönhető. Ez a régió viszont nagyobb, például 5×5 pálcából álló kazettamodell esetén nem így nézne ki. Egy ilyen kötegben valószínűleg jobban megmutatkoznának ennek a keverőelem geometriának a hatásai. Ezen felül lényegesen javítható volna a keverőelemek hatása, ha csak minden második szubcsatornában kerülnének kialakításra, és az egymást követő távtartókon mindig felváltott pozíciókban. Így nem oltanák ki egymás transzverzális sebességkomponenseit a szomszédos szubcsatornából érkező tömegáramok.



5.5. ábra. Tölcsér keverőelemes távtartó rácsot követő mező a) sebességvektor-tere b) axiális sebességprofilok a rácsból felmért különböző távolságokban c) transzverzális sebességprofilok a rácsból felmért különböző távolságokban (*vektorgrafikus*)

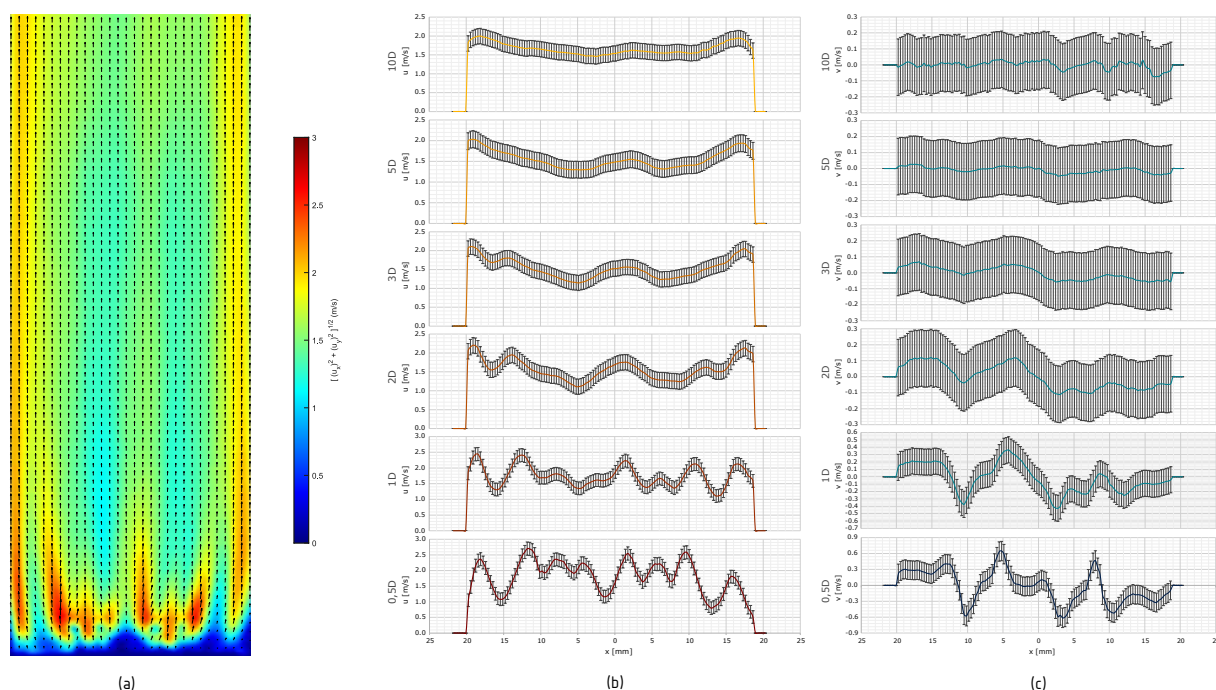
Jelentősen nagyobb turbulens kinetikus energia értékek figyelhetők meg ebben az esetben, mint a korábbiaknál. Az 5.6 ábra (a) és (b) részletén egyaránt megfigyelhető, hogy kiugróan magas értékek azokban a tartományokban jelentkeztek, ahová a tölcséres keverőelemek eltérítették a folyadékáramot. Ez annak köszönhető, hogy a beszűkülő áramlási keresztmetszet, mint egy konfúzor, gyorsító hatással van az áramlásra, aminek így nő a turbulenciafoka. Ez a hatás azonban hosszú távon, a vizsgált szakasz közel egészén fennáll erősen turbulens csóvák formájában, ami viszont jelentősen növelheti a hőátadást a pálcaburkolat és a hűtőközeg között. Összességében ennél a geometriánál a teljes vizsgált mezőben számottevően nagyobbak a TKE értékek mint a korábban tárgyalt esetekben. Ebből adódóan az áramlás nagyon veszteséges ennél az estnél, és emellé még hozzájárul, hogy a keverőelem geometriája jelentős hidraulikai ellenállásként szolgál az áramlás számára, ami szivattyúzási költségekben jelenik meg. Kialakítás szempontjából ezt az elemet mélyhúzással vagy additív gyártási eljárással lehetne kialakítani a gyakorlatban. Az előbbi eset a keverőelem külön felhegesztését igényelné, ami gyenge pontot vinne be a szerkezetbe, míg a második technológia jelentős költségekkel járna. Utóbbira azonban precedensként szolgál a nukleáris iparban a Westinghouse cég által kifejlesztett hordalékszűrő [17], amelynek szerepe később kerül részletezésre.



5.6. ábra. Tölcsér keverőelemes távtartó rácsot követő mező a) turbulens kinetikus energiája b) TKE értékek a rácsból felmért különböző távolságokban (vektorgrafikus)

A tölcséres kialakításnak a továbbfejlesztett változata a **hornyolt tölcséres** geometria. A ki-metszések kialakításának célja pontosan a tölcséres geometriánál tapasztalt leválási örvények megszüntetése. A kiértékeléskor kapott 5.7 ábra (a) részletén tisztán látszik, hogy ez a szignifi-káns jelenség szinte megszűnt, csupán a kis mértékben lassult csóva a szubcsatorna belsejében maradt fenn. A keverőelem körül jellegzetes sebességtér alakult ki, amit három, nagy sebességű folyadéksugár jellemez. Ezt a hornyokon átlépő térfogatáram okozza, ami a (b) ábraszakaszon is jól látható három kicsúcsosodó sebességérték formájában. A közeg sebessége viszonylag homogén, de alacsonyabb a pálcaköteg belső részében. Ez esetben is kiszorul a folyadék a csatornafal menti régiókba, és megnövekszik az áramlási sebesség, habár lényegesen kisebb mértékben mint a sima tölcséres esetben. A (c) ábrarészleten látható, hogy bár a középső pálcák

közötti hézagban a keresztáramlás jelentéktelen az ütköző folyadékcsóvák miatt, viszont a távtartót követően a szubcsatornában számottevő a transzverzális sebességkomponens. A rácstól távolodva ez egyre csillapodik, és $5D_p$ távolságban már szinte jelentéktelen nagyságú, még a keverőelem nélküli esetnél is kisebb. Nagyobb pálcaszámú kazettamodellben vizsgálva ennek a kialakításnak is tisztábban felmérhetők lennének a hatásai.

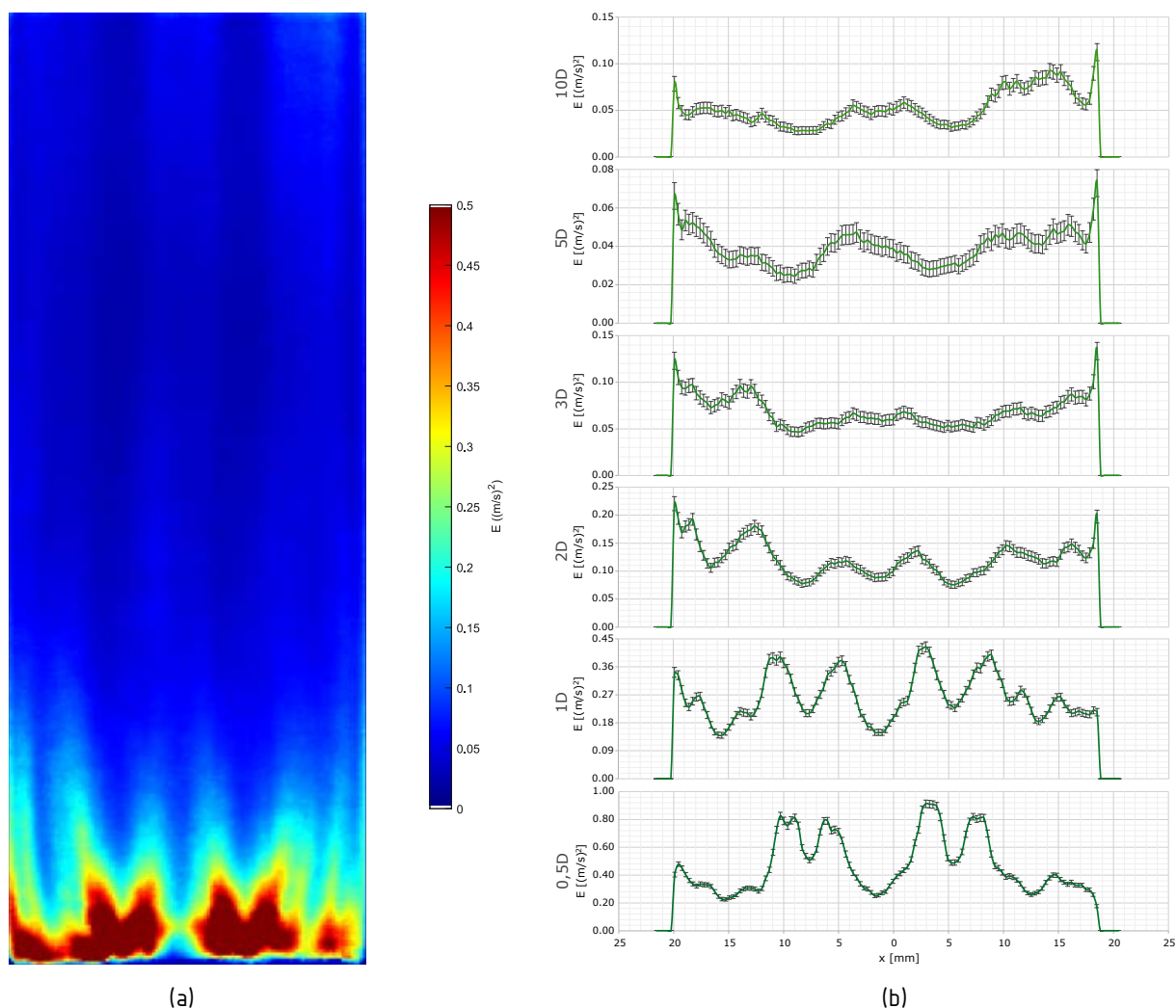


5.7. ábra. Hornyolt tölcser keverőelemes távtartó rácst követő mező a) sebességvektor-tere b) axiális sebességprofilok a rácstól felmért különböző távolságokban c) transzverzális sebességprofilok a rácstól felmért különböző távolságokban (*vektorgrafikus*)

A hornyolt keverőfüles geometriára vonatkozó turbulens kinetikus energia skalármezőjét az 5.8 ábra mutatja be. A kiértékelés során kapott eredmények meglepően alacsony értékekkel szolgáltak, figyelembe véve, hogy a tölcseres keverőelemhez képest végbement geometriai változtatás a előreláthatólag nem csökkenti olyan sokkal a keverőelem alaki ellenállását. Ebből kiindulva feltételezhető volt, hogy az áramlásban bekövetkező zavarok és turbulens jelenségek kisebb mértékűek ugyan, de a hasonló jellegűek lesznek mint a tölcseres kialakításnál tapasztaltak. Az (a) ábrarészt figyelve látható, hogy bár közvetlenül a keverőelemnél a TKE értékek egy kiterjedt tartományban jelentős nagyságúak, mégis nagyon hamar eloszlának a távtartó rácst elhagyva, és a távtartó rác tetejétől mért $\sim 2D_p$ távolságtól kezdve közelítőleg állandó, de alacsony értéken maradnak a vizsgált szakasz hossza mentén. Ez az érték a szubcsatornákon belül kicsivel átlag alatti, míg a pálcák közötti résben kicsivel átlag feletti. A (b) ábrarészleten



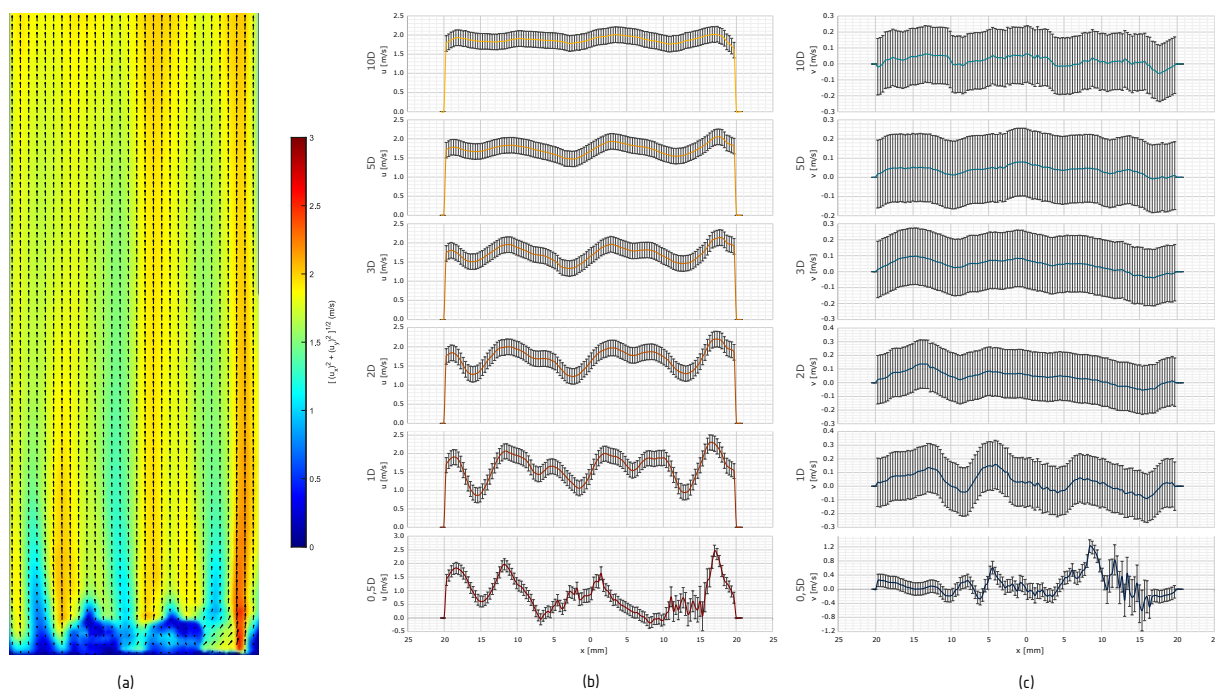
is jól megfigyelhető ez a lecsengés a távtartótól távolodva. Fontos azonban megjegyezni, hogy ennél a geometriánál a megvilágított sík pont áthalad a keverőelemen kialakított két szemközi hornyon. Ez azt eredményezi, hogy a kamera a hornyokon áthaladó és felgyorsuló vízsugarat látja, aminek turbulens kinetikus energiája hamar disszipálódik. A keverőelem hornyai által választott "szirmok" azonban hasonlóan perturbálhatják az áramlást, és hosszútávon növelhetik a TKE értékét, akár csak a tölcséres keverőelem. Ezek a szirmok a mérősíkból kifelé állnak, emiatt a jelenség nem kerül megvilágításra tehát rögzítésre sem. Valószínűsíthető tehát, hogy a valós folyamatnak csak egy részletét sikerült felvenni, és a TKE értékek valójában ígéretesebb növekedést mutatnak a vizsgált síkon kívül eső térfogatban. Egy érdekes jelenség ebben az esetben is megfigyelhető a pálcaköteg jobb oldalán. A kezdeti csökkenést követően a TKE értéke beáll egy viszonylag alacsony értékre, majd a vizsgált szakasz végéhez közeledve ismét növekszik, még hozzá viszonylag jelentős mértékben.



5.8. ábra. Hornyolt tölcser keverőelemes távtartó rácsot követő mező a) turbulens kinetikus energiája b) TKE értékek a rácsból felmért különböző távolságokban (vektorgrafikus)

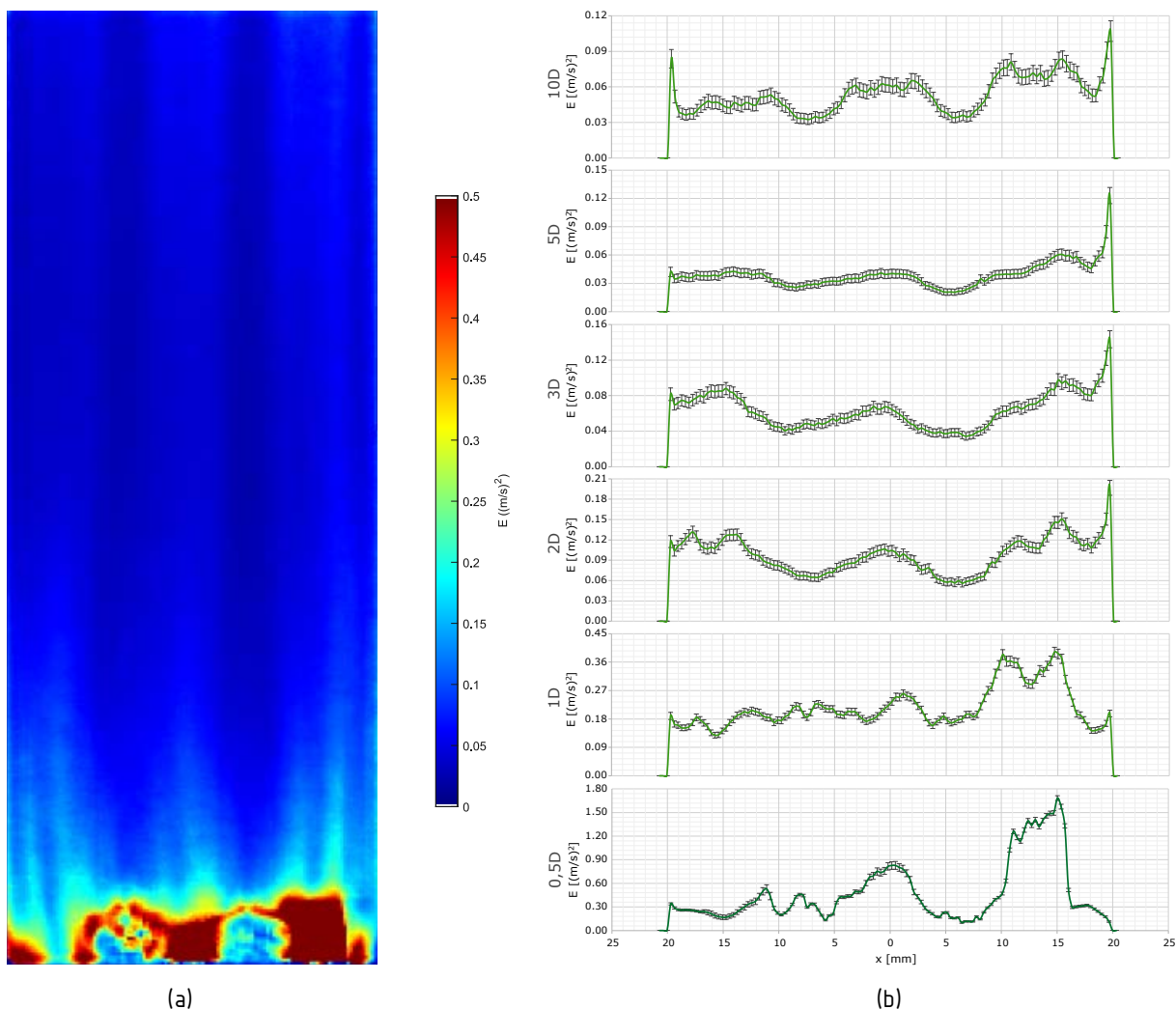
Az utolsóként mért keverőelem geometria egy viszonylag komplex összeállítású **járókerekes kialakítás**. Ez nem statikus elem, a rajta átáramló közeg hatására elforog, és ezzel elősegíti a helikális áramvonalak kialakítását, vagyis a közeg örvénylésének fokozódását. Az 5.9 (a) ábrán látható két kék folt, amely kis sebességekre utal, a járókerek pozíciója. Ez a megjelenés több folyamatnak tulajdonítható. Részben a folyadék feltorlódása, hiszen egy, az áramlás irányával nagy szöget bezáró felülettel találkozik, amire erőt fejt ki, ezzel forgatva a propellert. Azonban jelentősebb szerepet játszik ebben az, hogy a járókerék egy átlátszó polimerből készült, amelynek saját törésmutatója van. Ez nem egyezik a közeg törésmutatójával, amelynek értéke a MIR módszer alapján az FEP pálcák értékéhez lett illesztve. Ebből kifolyólag közvetlenül a távtartó rácsot követő szakaszon csak a bal oldali keverőelem melletti tartományról olvasható le helytálló

adat, a pálcaköteg ugyanis balról került megvilágításra. Ezt követően zajos értékek állnak rendelkezésre, amit az eltérő törésmutatók és a keverőelem forgása okozott. A sebességprofilok torzulása a (b) és (c) ábrarészleten figyelhető meg, ahol az is látszik, hogy bal oldalt még kis hibasávval rendelkező adatok állnak rendelkezésre. A keverőelemet követő szakaszokon viszont már tiszta adatok állnak rendelkezésre, és jól látható, hogy viszonylag homogén, közepes nagyságú sebességtér uralkodik a vizsgált szakasz többségén. $1D_p$ távolságban még ugyan jelentős az egyenetlenségek, de az axiális sebességprofil gyorsan kezd kisimulni a rácstól távolodva. A transzverzális sebességek csak rövid távon jelentősek, $2D_p$ távolságot követően sehol nem haladja meg abszolút értékben a $0,1 \frac{m}{s}$ nagyságot. Fontos azonban megemlíteni, hogy dinamikus elemek alkalmazása egy pálcakötegen belül a "debris fretting" nevű jelenség kialakulásának lehetőségét fokozottan növeli. Ez azt takarja, hogy egy apró fém hordalék vagy alkatrész bekerül a zónába, és a távtartó rácson fennakadva, kisfrekvenciás rezgések hatására több kampány lefolyása alatt kikezdi a pálcák burkolatát, ami így inhermetikussá válhat. Ennek kiküszöbölésére a kazetták aljában egy hordalékszűrő elem kerül kialakításra, ám ez csak a kívülről érkező törmelék ellen véd, és a kazettán belül elszabaduló keverőelem szempontjából hatástalan. Ez jelentősen korlátozza ennek a keverőelemnek az alkalmazhatóságát.



5.9. ábra. Járókerék keverőelemes távtartó rácst követő mező a) sebességvektor-tere b) axiális sebességprofilok a rácstól felmért különböző távolságokban c) transzverzális sebességprofilok a rácstól felmért különböző távolságokban (vektorgrafikus)

A turbulens kinetikus energia értékeit az 5.10 ábra (a) része mutatja a teljes vizsgált tartományra. Ezen a képen is kék foltokként látszódnak alul a járókerekek, amelyek mellett kiugróan magas TKE értékek figyelhetők meg. Ezek a zajos értékek a (b) ábrarészleten is megfigyelhetők $0,5D_p$ távolságban. Ezt követően hozzávetőleg nagy turbulens kinetikus energiák figyelhetők meg, amelyek viszonylag hosszan, $2D_p \div 3D_p$ távolságig fennmaradnak, majd a hossz mentén beállnak egy alacsonyabb értékre. Itt is megfigyelhető, hogy alapvetően a turbulens kinetikus energia nagyobb a pálcák közötti részben, míg a szubcsatornák belsejében kisebb értékek jellemzik.

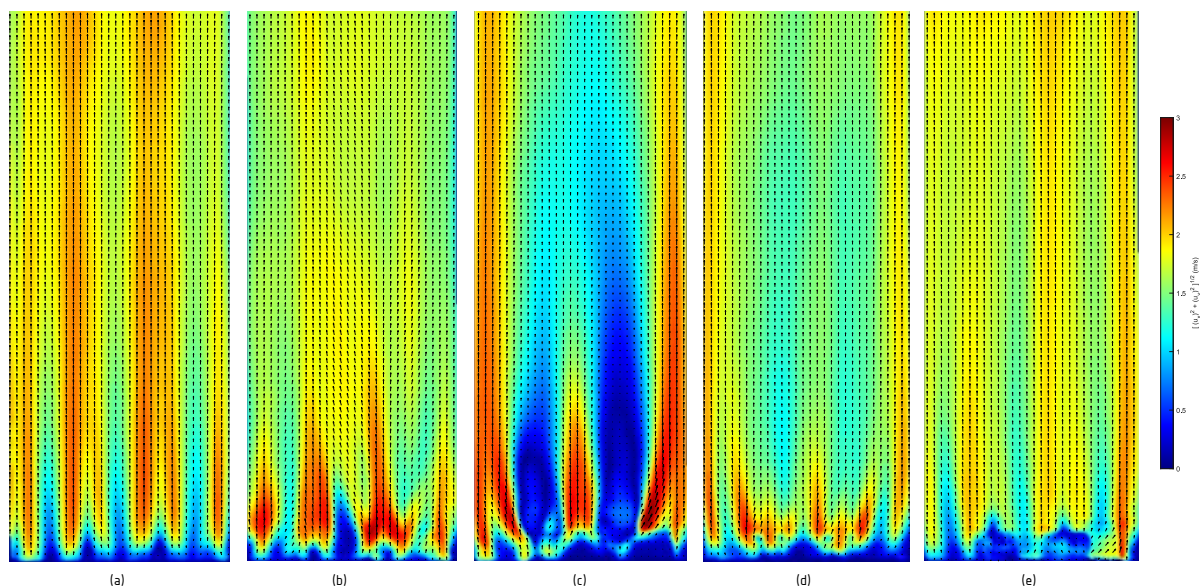


5.10. ábra. Járókerék keverőelemes távtartó rácsot követő mező a) turbulens kinetikus energiája b) TKE értékek a rácsból felmért különböző távolságokban (vektorfikus)

5.2. Vizsgált geometriák eredményeinek összevetése

A vizsgált geometriákra kapott sebességvektor-mezők összehasonlítás céljából az 5.11 ábrán vannak egymás mellé állítva. Összehasonlítva a keverőelem nélküli esetet (a) a "split" keverőfüles" (b) esettel válik igazán szembetűnővé, hogy mennyire hatékonyan éri el az utóbbi geometria a térfogatáram átertelését a szubcsatornák között. Az áramlás sebessége közel homogén a pálcaköteg teljes szélességében, felgyorsult vízszugarak csak lokálisan léteznek, ellenben a keverőelem nélküli esetben, ahol a szubcsatornák belsejében térfogatáram nagy sebességgel, szinte irányváltoztatás nélkül halad át. A többi eredmény közül kiugróan szélsőséges eredménnyel szolgált a tölcséres (c) keverőelemmel felszerelt távtartó rács, amelynél a sebességtér teljesen inhomogén, még a vizsgált szakasz vége felé is jelentős kilengés van a szélső pontok és a középvonal sebességértékei között. Ennél az esetnél ugyanúgy kialakul egy eltérített nagy sebességű vízszugár a mérőcsatorna falai mentén, ami viszont kiterjedt pálcakötegeknél nem valószínű, hogy megjelenne, mint az látható a középvonalban kialakult rövidtávú gyors vízszugár alapján. A jól látható viszont, hogy hatalmas leválási örvények keletkeztek a tölcsérek fölött, ami lokálisan pangó zónákat eredményezett, és a szubcsatornán belül az áramlás számottevő lassulását. Az is megfigyelhető, hogy a forgásszimmetrikus keverőelem minden irányba viszonylag egyenletesen tereli el a közeget. Ez azt eredményezi, hogy a köteg középvonalában ezek az elterelt térfogatáramok ütköznek, és kioltják egymás transzverzális sebességkomponenseit, ezzel szinte hatástalanítva a keresztirányú áramlásokat. Ezek alapján valószínűsíthető, hogy a kapott eredményeken jelentősen javítana, ha csak minden második szubcsatornában lennének kialakítva ezek a keverőelemek, és az egymást követő kazettákban felváltott pozíciókban, így sokkal effektívebb lenne az átkeveredés. A tölcséres keverőelemhez képest lényegesen homogénebb sebességeloszlást eredményezett a hornyolt keverőelemes kialakítás (c), amelynél a felgyorsult vízszugár csak nagyon rövid távon maradt fenn. A szubcsatornák belsejében kialakult lassabb áramlási sebesség a mérősíkon kívül eső erősen turbulens folyamatok hatására utalhat, ezek ugyanis fékezhetik az áramlás sebességét. A járókerekes keverőelem (e) sebességtérét összevetve az előzőekben tárgyalt eredményekkel láthatóvá válik, hogy erős hasonlóságot mutat a keverőelem nélküli esethez. A közeg áramlásának irányában nem tapasztalhatók olyan jelentős változások, mint amit a (b) és (c) esetben láttunk, és nem figyelhetők meg jelentős keresztirányú áramlások. A távtartó rácson keletkező leválások is egyértelműen hasonlítanak a keverőelem

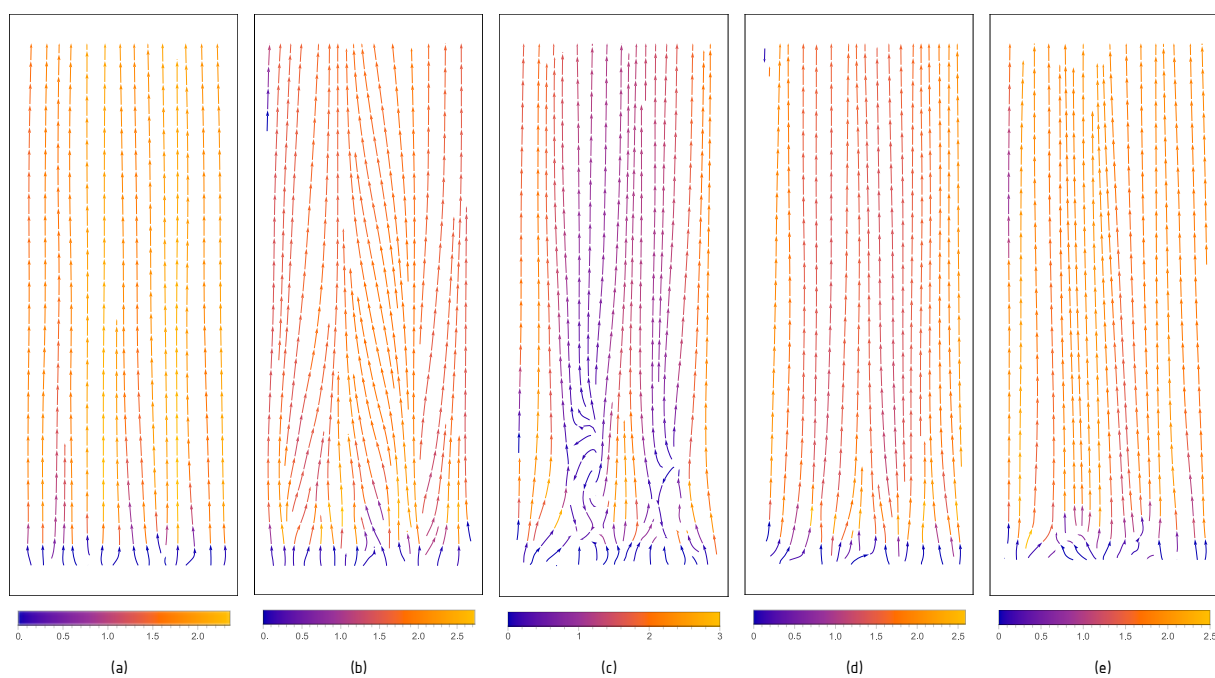
nélküli esethez, azonban a sebesség viszonylag homogén a pálcaköteg teljes szélességében és a vizsgált szakasz közel teljes hosszán. A fal menti régió kivételével nem alakulnak ki olyan nagy sebességű csóvák a szubcsatornák belsejében mint az (a) esetben.



5.11. ábra. Különböző keverőelem által keltett sebességterek a) keverőelem nélkül b) "split" keverőfűl c) tölcséres keverőelem d) hornyolt tölcséres keverőelem e) járókerekes keverőelem (vektorgrafikus)

Az áramképek összevetésére egy kisebb információsűrűségű, viszont szemléletesebb módosulattal szolgál az 5.12 ábra. Az itt közölt képek a sebességmező áramvonalait emelik ki, amelyek megalkotását a Wolfram Mathematica programcsomag interpolációs függvénye tett lehetővé. Az ábrák segítségével könnyebben lekövethetővé válnak a folyadék hosszú időn keresztül fennmaradó domináns mozgási irányai, átláthatóbbá válnak az átkeveredések. Az (a) ábrarészletet figyelve látható, hogy a keverőelem nélküli esetben keresztirányú áramlás alig történik, legfeljebb csak a távtartót követő leválások hatására a köteg középvonalának környékén. A "split" keverőfűles (b) esetben jelentős átkeveredések látszódnak, főként a jobb oldali szubcsatornából a bal oldali irányába. Ez az áramlat szubcsatorna belsejében találkozik egy szembe irányuló átkeveredési csóvával, és lassan kiegyenesedik, de maga az átáramló jelenség a teljes vizsgált hosszon fennmarad. A (c) részen ábrázolt tölcséres keverőelem hatására kisebb mértékű, de továbbra is jelentékeny átkeveredés van a jobb oldali szubcsatornából a bal oldali irányába. A leválási zónában látható, hogy a hirtelen irányt változtató folyadék sebességvektorait az interpolációs függvény nehezebben tudta kezelni, ezért kifejezetten zavaros áramvonalak rajzolódtak

ki. Mint az korábban már ki lett emelve, ez a hatás viszonylag korlátozottan megfigyelhető a pálcaköteg kis méretéből adódóan. Egy nagyobb pálcakötegre kiterjesztett mérés során jobban megfigyelhetővé válnának a szomszédos szubcsatornák közötti kölcsönhatások. Az utóbbi kijelentés a (d) részben bemutatott hornyolt tölcséres keverőelem esetére is igaz, bár ebben az esetben kevésbé intenzívek a áramlásba bevitt zavarok. A korábbi két esethez képest képest itt már nem figyelhetők meg nagy mértékű átkeveredések, a térfogatáram viszonylag egyenes vonalakat követ, és csak kisebb mértékű átsodródások figyelhetők meg a jobb oldali szubcsatornából kiindulva. Ebben az esetben viszont a sebességterek homogenitásában jelentős javulás mutatkozik a keverőelem nélküli és a tölcséres keverőelemes esethez képest. Az (e) részletben látható járókerekes keverőelem esetében az figyelhető meg, hogy többnyire egyenes áramvonalak vezérlik a közeg pályáját a kötegen belül. A propellerek hatására viszont kialakul egy kisebb mértékű, de a hornyolt tölcséres keverőelem esetével összevetve jelentősebb, balos irányultságú átáramlás az egyik szubcsatornából a másikba.

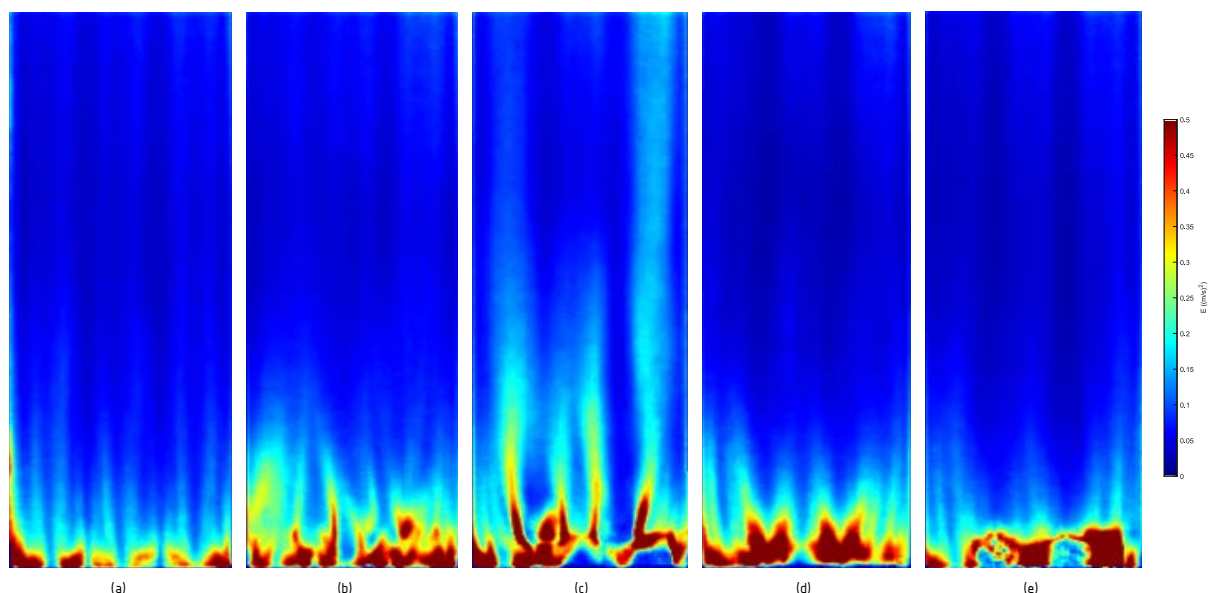


5.12. ábra. Különböző keverőelemeket követő mezők áramképei a) keverőelem nélkül b) "split" keverőfűl c) tölcséres keverőelem d) hornyolt tölcséres keverőelem e) járókerekes keverőelem (vektorgrafikus)

Az 5.13 ábra az öt vizsgált esetre kapott turbulens kinetikus energia mezők összevetésére szolgál. Ennek a mennyiségnek a vizsgálatánál kiemelt fontossággal bír a referencia mérések figyelembe vétele, ugyanis a hossz mentén uralkodó átlagos TKE értékek a skála alsó tartományába esnek,

és az egyes esetekben ez az érték általában csak kis mértékben változik. Ennél fogva sokkal könnyebb érdemi következtetéseket levonni az elért változásokról, ha azt összemérjük az alapul vett esettel. A két referenciát összevetve látható, hogy a keverőfülekkel felszerelt távtartó (b) jelentős növekedést eredményez az átlagos TKE értékekben a keverőelem nélküli (a) esethez képest. Ezekkel a összevetve a tölcséres (c) kialakítás hatását szembetűnően magas értékek láthatók, a vizsgált mező jelentős részében közel kétszeresei a két referencia mérésnél tapasztaltaknak, és a hatás az egyes folyadékcsóvákon belül hosszú távon fennmarad. Ez jelentős veszteségeket eredményez, hiszen a turbulens kinetikus energia a folyadékok kavargó mozgása következtében disszipálódik, és a közeg fűtésére fordítódik. Ideális esetben a TKE növekmény még nem jelent túl komoly veszteséget, azonban a turbulencia serkentése elősegíti a hőátadást. A tölcséres keverőelem esetében viszont ezek a veszteségek már lényeges növekedést eredményezhetnek a szivattyúzási költségekben. Ez utóbbi esettel összevetve a hornyolt tölcséres (d) keverőelemet látható, hogy a megvilágított síkban a TKE értéke szép homogén, sokkal közelebb áll a keverőfüles esethez tapasztaltakhoz. Ez meglepő, ugyanis a geometriában véghez vitt módosítások alapján nem volt ilyen drasztikus változás prognosztizálható. A látható jelenség azonban valószínűleg csak egy részlete egy kiterjedt, bonyolult folyamatnak, aminek jelentős része kívül esik a megvilágított síkból. Ennek felderítése a jövőben kiterjesztett vizsgálatot igényel. A hornyolt tölcséres esethez nagyon hasonló eredményekkel szolgált a járókerekes (e) keverőelemmel felszerelt távtartó. Az eredményeket összevetve, és összességében szemlélve több következtetés is levonható. A turbulens kinetikus energia nagyságrendi növekedése csak a keverőelemek lokális hatásaként megy végbe, a közeg továbbhaladtával gyorsan disszipálódik, és állandó, alacsonyabb értékhez közelít. A hőterképek oldalsó peremeit megfigyelve, valamint az 5.2, 5.4, 5.6, 5.8 és 5.10 ábrák (b) részletében látható grafikonokra visszatekintve megfigyelhető, hogy a mérőcsatorna fala mentén egységesen ugrásszerű növekedés figyelhető meg a TKE értékekben. Ez nem más, mint a lamináris-turbulens határréteg átmenete. A csatorna fala mentén kialakult vékony lamináris határrétegben a turbulens kinetikus energia értéke zérus, majd a határrétegek váltásakor hirtelen felszökik ez az érték, és befelé haladva a csatornába normalizálódik. Szintén minden egyes geometria esetében megfigyelhető, hogy a vizsgált szakasz jobb felső sarkához közeledve a turbulens kinetikus energia újból növekedni kezd. Valószínűsíthető, hogy ez nem fizikai jelenség, hanem a sarok elégtelen megvilágításából és háttérzajokból eredő hiba. Ezt alátámasztja az is, hogy a csatornák bal oldalról kerülnek megvilágításra, és

a A5, A6, A7, A8 és A9 mellékletekben közzé tett Reynolds-feszültségekben jól látható változás főként azokban a tagokban figyelhető meg, amelyek a transzverzális sebességkomponens beszámításával eredeztethetők.



5.13. ábra. Különböző keverőelemeket követő mezők TKE értékei a) keverőelem nélkül b) "split" keverőfűl c) tölcséres keverőelem d) hornyolt tölcséres keverőelem e) járókerekes keverőelem (vektorgrafikus)

6. Összefoglalás

Kutatásom során TR-PIV módszer segítségével vizsgáltam különböző kialakítású, 3D nyomtatással készült, nem szokványos keverőelemek áramlási térre gyakorolt hatását. A mérés pontosításához MIR technikát alkalmaztam, amivel kiküszöbölhető volt a vizsgált térfogatban található különböző anyagok eltérő törésmutatójából eredő hiba. Az eredmények kiértékelésének megsegítése céljából a kutatást kiterjesztettem a három vizsgált keverőelemen kívül egy keverőelem nélküli, valamint egy évtizedek óta a gyakorlatban alkalmazott "split" keverőfűles geometria vizsgálatára is. A mérést a BME Nukleáris Technikai Intézetében található PIRO-UETTE rendszeren végeztük, a felvett és feldolgozott adatokon pedig hibaszámítást végeztem, aminek köszönhetően teljes értékű eredményeket kaptam. A vizsgálat célja olyan keverőelemek hatásának megismerése volt, amelyek a turbulencia és szubcsatornák közötti átkeveredésen keresztül növelhetik a hőátadás mértékét valamint a CHF értékét, ezzel növelve az energetikai reaktorok üzembiztonságát és az elvonható hőteljesítményt. A mérési eredményeket összevetve



az alábbi következtetések vonhatók le. Keverőelemek alkalmazása nélküli esetben is az áramlás a magas Reynolds-számok miatt erősen turbulens. Hosszú távon vizsgálva azonban megfigyelhető, hogy az áramlást vezérlő irányok nagyjából párhuzamosak a pálcákkal, és nincs tömeg-, impulzus- és energiacsere az egyes szubcsatornákon áthaladó folyadékmennyiség között. A tömegáram nagy része nagy sebességgel halad át a szubcsatornán, ezzel csökken a hőelvonási potenciál, míg egy kisebb része alacsonyabb sebességgel áramlik a pálcák közötti részben, ahol túlmelegedhet, és ezzel a pálcák felhevülését okozhatja. Ennek kiküszöbölésére hosszú ideje alkalmaznak "split" típusú keverőfüleket a PWR kazetták távtartóin. Az erre vonatkozó mérés során láthatóvá vált, hogy milyen hatékonyan éri el keverőfűl a térfogatáram áterelését egyik szubcsatornából a másikba, ezzel homogenizálva az áramlás sebességeloszlását, és kiküszöbölve az előzőekben bemutatott keverőelem nélküli eset hátrányosságait. Fontos előnye ennek a keverőfüles megoldásnak, hogy gyártástechnológiai megközelítésből nagyon egyszerűen integrálható az alkalmazott pálcakötegeken, ugyanis könnyen kialakítható ugyanabból a lemezből, amiből a távtartó rács lemezei kerülnek kivágásra, és később összehegesztésre. A rendhagyó kialakítású keverőelemek közül elsőként egy tölcséres kialakítású került lemerésre. Itt a vártaknak megfelelő eredményeket kaptunk, a forgásszimmetrikus tölcséreket az áramlás nem tudta könnyebb úton megkerülni, így a kiszélesedő szájnál jelentős leválási örvények keletkeztek. Ezekben az áramlás irányt váltott, hogy betöltse a keletkezett üreget, és ez egy pangó zónát eredményezett, ami kitöltötte a szubcsatorna teljes keresztmetszetét, és hatása a vizsgált szakasz teljes hosszán fennmaradt. Vagyis a pálcaköteg keresztmetszetének jelentős részében lassult sebességgel folytatódott az áramlás, ami a korábban részletezett túlmelegedés kockázatát növeli. További hátrányos jelenség, hogy az eltérülő közeg átáramlás a szubcsatornák között nem volt hatásos, mivel a pálcák közötti részben találkozott a két, ellentétes irányú csóva, és kioltották egymás transzverzális sebességét. Ennél az esetről kiemelkedően magas turbulens kinetikus energia értékek voltak megfigyelhetők, amelyek a folyadék mozgásának következtében hővé disszipálódnak, és a közeg fűtésére fordítódnak. Ez jelentős veszteséget jelent az áramlásban, és a keverőelem geometriai kialakítása is komoly hidraulikai ellenállást visz be a pálcakötegebe, ami a szivattyúzási költségek megemelkedését eredményezheti. Említésre méltó az is, hogy ennek a keverőelemnek a kialakítása jelentős gyártástechnológiai kihívást jelent, ami akár igen költséges, additív gyártási eljárást igényelhet. Az utóbbi geometria egy módosított változata a hornyolt tölcséres keverőelem. A mérést követő kiértékelés eredményei ebben az esetben



kifejezetten meglepőek voltak, a geometriában ugyanis nem mentek végbe olyan jelentős változtatások, amiből erre lehetett volna következtetni. A sebességteret megfigyelve egyáltalán nem láthatók jelentős leválási örvények, csupán néhány, a hornyokon átszűrődő nagy sebességű vízsugár. A sebességtér viszonylag homogén, a szubcsatornákon belül kis mértékben lassult az áramlás, ami a hőátadás szempontjából előnyös lehet, hiszen hosszabb a tartózkodási idő, de nem olyan hosszú, hogy az túlmelegedéssel fenyegetsen. Az előzőleg tárgyalt geometriához képest a turbulens kinetikus energia értékek sem voltak kiemelkedően magasak, ami kismértékű veszteségeket jelent. Fontos azonban megemlíteni, hogy a keverőelem orientáltsága miatt a mérősíkon kívül eső térfogatban is jelentős folyamatok játszódhatnak le, amelyeket nem volt lehetőség rögzíteni és kiértékelni. Érdekes lehet a jövőben további vizsgálatokat végezni arra az esetre, amikor a keverőelem a szimmetriatengelye körül 45° -os elfordítással kerülne kialakításra. Gyártástechnológiailag a hornyolt tölcsér sokkal könnyebben kivitelezhető lemezek alakításával, mint a sima tölcséres keverőelem, ami jelentős megtakarítást jelent az additív gyártási eljáráshoz képest. Végül egy dinamikus keverőelem került lemérésre, amely kialakítását tekintve egy axiális járókerékre hasonlít. Az átáramló közeg hatására a járókerék elfordul, várakozások szerint ezzel perdületet adva a folyadéknak, és helikális örvénypályára állítva azt. A keveredésen túlmenően ez a folyadékmozgás elősegítheti a CHF közeli tartományokban a képződő gőzbuborékok leszakadását a pálcák faláról, ezzel késleltetve a filmforrás kialakulását. A kiértékelés során kapott sebességmező hasonlít a keverőelem nélküli estre, azonban sokkal homogénebb, nem alakultak ki nagy sebességű csóvák a szubcsatornák belsejében. A turbulens kinetikus energia értékek a szubcsatornákon belül viszonylag alacsonyak, ami viszont az örvényleések hiányára utal. Egy ilyen nem statikus keverőelem kialakítása és alkalmazása nem csak gyártástechnológiai és gazdaságossági szempontból vet fel kérdéseket, de üzembiztonsági vonatkozása is van, ugyanis a "fretting" kialakulásának kockázatával jár. Ez az utóbbi megállapítás természetesen minden keverőelemre vonatkozik, de statikus elemeknél lényegesen kisebb ennek a kockázata. A vizsgált keverőelemek közül ígéretes eredményekkel a "split" keverőfüles valamint a hornyolt tölcséres kialakítás szolgált. Minden aspektust összevetve ez a két keverőelem jó megoldásnak bizonyul a kitűzött cél eléréséhez. A jövőben viszont alternatív elrendezések vizsgálatával a tölcséres, valamint a hornyolt tölcséres koncepciók tovább optimalizálhatók.



Köszönetnyilvánítás

A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta.



Ezúton szeretném köszönetemet kinyilvánítani a témavezetőmnek, Dr. Orosz Gergely Imrének a kutatásom során adott rengeteg sok segítségért, támogatásért és a tanúsított türelemért, valamint a tartalmak lelkiismeretes ellenőrzéséért, ami nélkül ez a dolgozat nem valósulhatott volna meg.

Továbbá szeretném hálámat kifejezni Kammerer Márton, Lóki Dániel János és Széles Tamás kollégáimnak a dolgozat szerkesztését illető technikai tanácsokért és javaslataikért, amelyekkel hozzájárultak egy szakszerű külalak létrehozásához.

Felhasznált szakirodalom

- [1] *ANSI/ASME PTC 19.1-1985: Measurement Uncertainty*. American National Standards Institute / American Society of Mechanical Engineers. 1985.
- [2] Dantec Dynamics A/S. *Particle Image Velocimetry*. 2004.
- [3] Markus Raffel és tsai. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. márc.



- [4] M.R. Nematollahi és M. Nazifi. “Enhancement of heat transfer in a typical pressurized water reactor by different mixing vanes on spacer grids”. *Energy Conversion and Management* (2008. júl.).
- [5] *Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis for Particle Imaging Velocimetry*. International Towing Tank Conference. 2008. szept.
- [6] Diana Caraghiaur, Henryk Anglart és Wiktor Frid. “Experimental investigation of turbulent flow through spacer grids in fuel rod bundles”. *Nuclear Engineering and Design* (2009. okt.).
- [7] Elvis Dominguez-Ontiveros és Yassin A. Hassan. “Experimental study of a simplified 3×3 rod bundle using DPTV”. *Nuclear Engineering and Design* (2014. nov.).
- [8] Han Seo és tsai. “Swirling performance of flow-driven rotating mixing vane toward critical heat flux enhancement”. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2015. okt.).
- [9] Bogdán Yamai, Máté Szieberth és Szabolcs Czifrus. *Új PIV mérési eredmények sóoldékos reaktor kisminta modelljén és a mérések bizonytalanságának elemzése*. Techn. jel. Institute of Nuclear Techniques, Faculty of Natural Sciences, Budapest University of Technology és Economics, 2015.
- [10] Xing Li és tsai. “PIV study of velocity distribution and turbulence statistics in a rod bundle”. *Annals of Nuclear Energy* (2018. júl.).
- [11] Wenhai Qu és tsai. “High-fidelity PIV measurement of cross flow in 5×5 rod bundle with mixing vane grids”. *Nuclear Engineering and Design* (2019. ápr.).
- [12] Wenhai Qu és tsai. “PIV measurement of turbulent flow downstream of mixing vane spacer grid in 5×5 rod bundle”. *Annals of Nuclear Energy* (2019. okt.).
- [13] Camila F. Matozinhos és tsai. “Experimental measurements of turbulent flows in a rod bundle with a 3-D printed channel-type spacer grid”. *International Journal of Heat and Fluid Flow* (2020. okt.).
- [14] Peiyao Qi és tsai. “Experimental study of flow structures in a large range downstream the spacer grid in a 5×5 rod bundle using TR-PIV”. *International Journal of Heat and Fluid Flow* (2020. aug.).



- [15] Gergely Imre Orosz és tsai. “ALLEGRO Gas cooled Fast Reactor Rod Bundle investigations with CFD and PIV method”. *Nuclear Engineering and Design* (2022. dec.).
- [16] Gergely Imre Orosz és tsai. *SafeG WP3.5 support report ALLEGRO Gas cooled Fast Reactor Rod Bundle investigations during normal and LOFA conditions with CFD and PIV method*. Techn. jel. Institute of Nuclear Techniques, Faculty of Natural Sciences, Budapest University of Technology és Economics, 2023. jan.
- [17] Westinghouse Electric Company. *Westinghouse’s Additive Manufacturing Innovation Improves Safety and Efficiency in Operating Nuclear Reactors*. Techn. jel. Westinghouse Nuclear, 2024. jún.
- [18] Gergely Imre Orosz és tsai. “PIV measurements for VVER pressurized water reactor rod bundle geometries including spacer grids for CFD model validations”. *Nuclear Engineering and Design* (2024. ápr.).
- [19] *Ebara CDXM/G 200/20 rozsdamentes egyfokozatú dentrifugálszivattyú termékadatlap*.