



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Nukleáris Technikai Intézet

**A BME NTI Oktatóreaktor szubcsatorna modelljének vizsgálata PIV/LIF
méréstechnikával**

Tudományos Diákköri Konferencia

2012

Készítette: Kovács Arnold (4. évf.)
Babcsány Boglárka (4. évf.)
Konzulens: Yamaji Bogdán
Tanszéki mérnök
Témavezető: Dr. Aszódi Attila
Intézeti Igazgató

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta.

TARTALOMJEGYZÉK

ÁBRAJEGYZÉK	5
DIAGRAMJEGYZÉK.....	7
BEVEZETÉS.....	9
1. A BME NTI OKTATÓREAKTORA.....	11
2. IRODALOMKUTATÁS	13
3. AZ ALKALMAZOTT MÉRÉSTECHNIKÁK ISMERTETÉSE	14
3.1. PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV).....	15
3.2. LASER INDUCED FLUORESCENCE (LIF).....	18
4. A MÉRÉSI BERENDEZÉS ISMERTETÉSE	20
5. A MÉRÉS ISMERTETÉSE.....	28
5.1. A MÉRÉS ELŐKÉSZÜLETEI.....	28
5.2. KALIBRÁCIÓ.....	30
5.3. A MÉRÉS MENETE	31
6. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK.....	34
6.1 A PIV MÉRÉS EREDMÉNYEI	34
6.2 A LIF MÉRÉS EREDMÉNYEI.....	46
6.3 A MÉRT EREDMÉNYEK ÉS EGY SZÁMÍTÁSI MODELL KÖZTI KORRELÁCIÓ VIZSGÁLATA	54
KONKLÚZIÓ.....	57
IRODALOMJEGYZÉK.....	60

ÁBRAJEGYZÉK

1.1. ábra: Az Oktatóreaktor függőleges keresztmetszete és az aktív zóna.....	11
1.2. ábra: A szovjet EK-10-es típusú üzemanyag-kazetta.....	12
1.3. ábra: Az aktív zóna vízszintes keresztmetszete	12
3.1. ábra: A lézeres mérőberendezés elvi felépítése	16
3.2. ábra: A LIF méréstechnika működési elve.....	18
4.1. ábra: A mérés során alkalmazott berendezések	21
4.2. ábra: Az alkalmazott áramlásicsatorna-modell elemei	22
4.3. ábra: A kialakított hűtőkör-modell a szivattyúval, ventillátorokkal és a működtető elektronikával	23
4.4. ábra: A felhasznált termoelem-sor és elektronikája	23
4.5. ábra: A lézernyaláb számára kialakított rész	24
4.6. ábra: A lézerkar és az állítható állvány	24
4.7. ábra: PIV és LIF szűrők	25
4.8. ábra: A Rhodamin B adalékanyag és a poliamid szemcsék	25
4.9. ábra: Az összeállított mérés	26
4.10. ábra: A lézer tápegysége és az adatgyűjtéshez szükséges eszközök.....	26
5.1. ábra: A 16 mérési szint elhelyezkedése	29
5.2. ábra: A kalibrációs pálca	30
5.3. ábra: Egy tipikus hőmérséklet-kalibrációhoz alkalmazott felvétel	30
6.1. ábra: 8x32-es háló definiálása az áramlási csatornában.....	34
6.2. ábra: A határréteg vastagságának alakulása a magasság függvényében	40
6.3. ábra: A szintek felosztása pixelek szerint és a hozzájuk tartozó hőmérséklet és sebesség diagramok.....	42
6.4. ábra: A maximális sebesség alakulása a magasság függvényében	44
6.5. ábra: A 16. szint sebességeloszlása – a csatornából való kilépés	45
6.6. ábra: A lokális hőátadási tényező alakulása a magasság függvényében különböző átlagos közeghőmérsékletek mellett	49
6.7. ábra: A 7. szinten kialakult hőmérséklet-mező	53
6.8. ábra: A kilépési tartományt jellemző hőmérsékleti rétegződés.....	54

DIAGRAMJEGYZÉK

1. <i>diagram:</i>	Lamináris sebességprofil a beáramlásnál.....	35
2. <i>diagram:</i>	Torzult lamináris sebességprofil	37
3. <i>diagram:</i>	Egyre növekvő sebesség a pálcafal mentén	37
4. <i>diagram:</i>	Jellemző sebességprofil a fűtött pálcaszakasz mentén.....	37
5. <i>diagram</i>	Jellemző sebességprofil a fűtött pálcaszakasz felső régiója mellett	37
6. <i>diagram:</i>	A pálcamodell felső fűtetlen szakasza melletti sebességprofil	37
7. <i>diagram:</i>	Az áramlási csatornából történő kiáramlást jellemző sebességprofil	37
8. <i>diagram:</i>	A sebességprofil változása a pálca fala mentén	38
9. <i>diagram:</i>	A sebesség alakulása a 8.szinten a hőmérséklet függvényében.....	43
10. <i>diagramsorozat:</i>	A 4. szint különböző magasságaihoz és átlagos közeghőmérséklethez tartozó hőmérséklet-profilok	50
11. <i>diagramsorozat:</i>	A fűtés megszűnése a felső szakaszok mentén.....	51
12. <i>diagramsorozat:</i>	Az áramlási csatornából történő kilépést követően a hőmérsékletprofilok alakulása	52

BEVEZETÉS

A nukleáris energia hasznosítása során prioritásként kezelendő a környezet és a lakosság védelme. A nukleáris biztonság általános célja az ezen típusú energiaforrás alkalmazása során létrejövő ionizáló sugárzástól való védelem, amely nem csupán a sugárdózis egy adott határérték alatt történő tartását jelenti, hanem azt is, hogy minimálisra csökkentse a balesetek kialakulásának a valószínűségét.

Dolgozatunkban egy olyan problémakört járunk körül, mely kiemelt jelentőségű mind normál üzemi, mind üzemzavari folyamatok esetén. Az atomenergia felhasználásával kapcsolatos követelmények között kiemelt fontosságot kap a zóna mindenkor hűthetőségének biztosítása, amelyre különös tekintetet kell fordítani a tervezési fázis és az üzemeltetés során egyaránt. A hő elszállítását atomerőművekben típusonként eltérő hűtőközeggel biztosítják. A hő felszabadulásának helyétől a hűtőközegig történő transzport folyamatot mind a hőtani, mind az áramlástani paraméterek befolyásolják. Célunk olyan termo-hidraulikai paraméterek vizsgálata volt, melyek jelentős hatással vannak a hő-transzport folyamatok minőségére, dinamikájára és hatékonyságára. Ezt az elemzést célzottan a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen található Oktatóreaktorra vonatkozóan hajtottuk végre.

Vizsgálatunkat az Oktatóreaktor egy fűtőelempálca-modelljén végeztük, a hőtermelés folyamatát elektromos fűtéssel modelleztük. A mérések során a fűtőelempálca-modell egy függőleges üvegtartályban helyezkedett el, ahol a pálcát plexiből készült áramlásicsatorna-modell vette körül. Az áramlásicsatorna-modell méreteit előzetes kalkulációk alapján az Oktatóreaktor egy valós fűtőelemkötegének méretei alapján állapították meg úgy, hogy áramlási keresztmetszete megegyezzen a reaktorban található fűtőelempálcához tartozó áramlási csatorna keresztmetszetével [1].

Az elektromos fűtés hatására kialakuló hőmérséklet-, illetve sűrűség különbség következtében természetes áramlás indul meg a fűtőelempálca-modell mellett. Az így kialakuló sebességtér detektálására Particle Image Velocimetry (PIV) mérés technikát alkalmaztunk. A hőmérsékleti tér alakulásának vizsgálatára, illetve annak későbbiekben történő szemléltetése céljából a Laser Induced Fluorescence (LIF) mérés technikát alkalmaztuk. A mérési geometriánk alapját Szijártó Rita 2011-ben végzett méréssorozata során készített összeállítás adta, amelyet a mérési pontatlanságok csökkentésének céljából továbbfejlesztettük [1].

A fűtőelempálca-modellt teljes hossza mentén végigmértük, beleértve a középső, 500 mm hosszúságú fűtött, illetve az alsó és felső, összesen 200 mm hosszúságú fűtetlen részt is. A mérésünk pontosságának, átfogó voltának és több, különböző paraméter vizsgálatának köszönhetően részletesen és behatóan tudtuk elemezni a fűtőelempálca-modell körüli sebesség- és

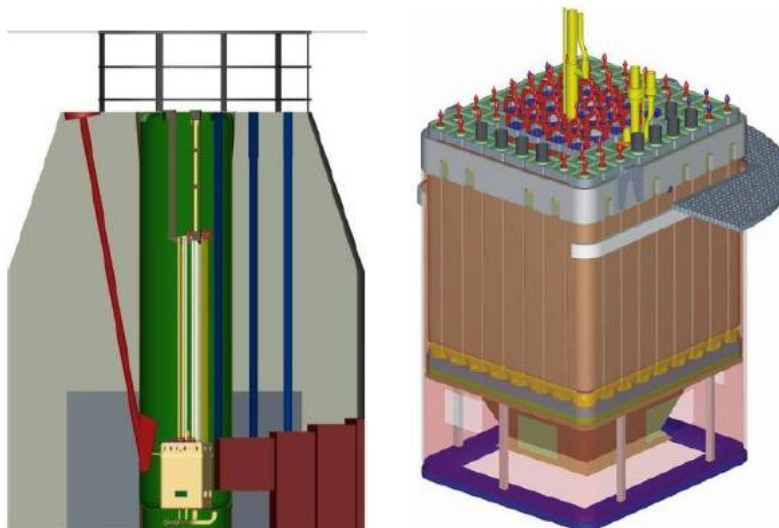
hőmérsékleti tér alakulását. Az elemzés eredményeként a fűtőelempálca-modell teljesítményének ismeretében, a pálcza hossza mentén a konvektív hőátadási tényező alakulását is meghatároztuk, illetve következtetni tudtunk a hidraulikus határréteg vastagságának változására is. Mivel egyes magasságokban a mérést több hőmérsékletérték mellett is elvégeztük, a hőátadási tényező áramlási csatornán belüli közeghőmérséklettől való függésének elemzését is elvégezhetjük.

A fűtőelempálca-modell melletti hőmérséklet- és sebességtér ismeretében pontosíthatóak lesznek az Oktatóreaktor biztonsági elemzésében alkalmazott, a megszaladás számítására fejlesztett számítógépes kódok. A mérési eredmények ezen felül felhasználhatóak a nehezen mérhető üzemi paraméterek számítására kialakított különböző, az elmúlt évtizedekben intenzív fejlődésen keresztülment általános célú termohidraulikai kódok validálására is.

Mérési eredményeinkkel a termohidraulika egyik jelentős kutatási területét kívántuk gazdagítani: jellemezni próbáltuk egy fűtőelempálca-modell esetében az áramlási csatornában kialakuló természetes áramlás során történő hőátadási folyamat paramétereit. Az elvégzett méréssorozat eredményei segítséget nyújtottak egy olyan fizikai folyamat megértésében, amely az atomenergia felhasználása során is jelentőséggel bír. A sebesség- és hőmérsékleti terek közötti korrelációk meghatározása, szemléltetése érdekes megállapítások megfogalmazását tette lehetővé számunkra, mely konklúziók további, a mérési geometria kibővítését célzó mérések alapjaként, illetve a BME Oktatóreaktor biztonsági elemzéséhez egyaránt felhasználhatók lehetnek. Az itt felhasznált módszerek és a kapott eredmények továbbá alkalmazhatóak atomerőművi üzemanyag-kazetták pihentető medencében történő tárolása során jellemző hőátadási viszonyok számítására is.

1. A BME NTI OKTATÓREAKTORA

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen 1971 óta üzemel a fizikus és mérnök hallgatók képzését szolgáló Oktatóreaktor. Az 1.1 ábrán az Oktatóreaktor függőleges metszete és az aktív zóna látható.

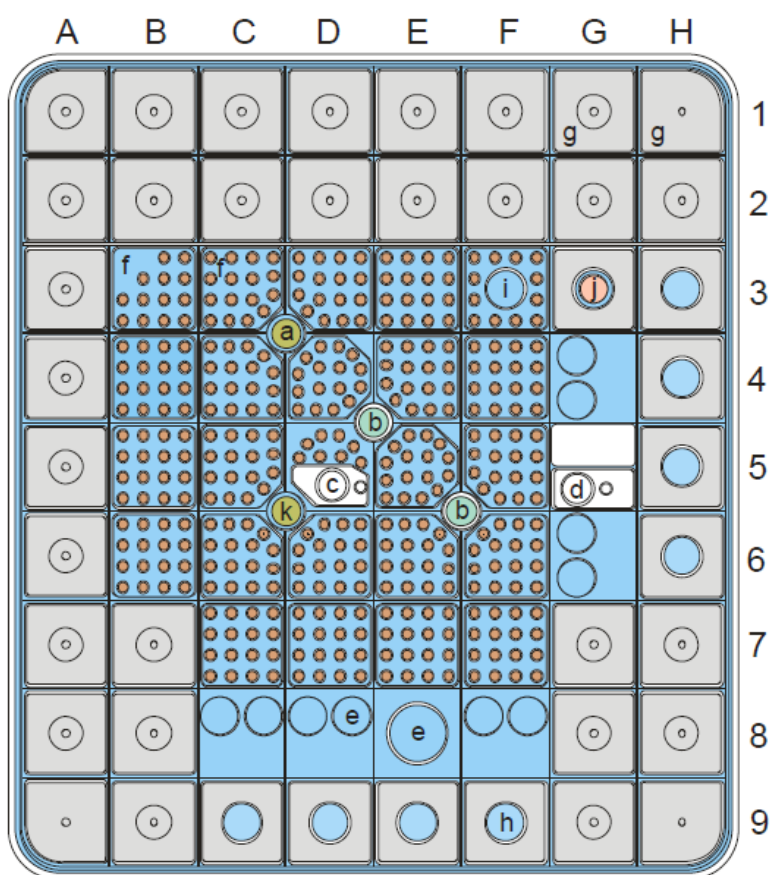


1.1. ábra: Az Oktatóreaktor függőleges keresztmetszete és az aktív zóna [2]

Az Oktatóreaktor szovjet gyártású EK-10 típusú fűtőelemekből álló zónája maximálisan 100 kW hőteljesítményt képes előállítani. A reguláris fűtőelemek tizenhat darab, egyenként 10 mm átmérőjű, 17 mm-es osztásközű négyzetes rácsban elhelyezkedő fűtőpálcát tartalmaznak (lásd 1.2. ábra). Az üzemanyagpálcák aktív átmérője 7 mm, aktív hosszuk 500 mm és 1,5 mm-es vastagságú alumínium borítással rendelkeznek. Maga az üzemanyag 10 %-os dúsítású UO_2 . Egy fűtőelempálca összesen 8 g ^{235}U -t tartalmaz, magnézium-oxid mátrixba ágyazva [3]. A zónában összesen huszonegy teljes és három részben kitöltött köteg helyezkedik el, összesen 369 fűtőelempálcával. Az aktív zóna keresztmetszete az 1.3. ábrán látható.



1.2. ábra: A szovjet EK-10-es típusú üzemanyag-kazetta [4]



1.3. ábra: Az aktív zóna vízszintes keresztmetszete [5]

Az Oktatóreaktor könnyűvíz moderátorral és hűtéssel rendelkező, medence típusú termikus reaktor. Maximálisan $2,7 \cdot 10^{12}$ n/(cm²s) termikus neutron fluxus jellemzi. A biológiai védelmet függőleges irányban a moderátorként és hűtőközegként is egyaránt funkcionáló, 4,8 m magas vízoszlop biztosítja, míg vízszintes irányban az aktív zóna 1,1 m vastag baritbeton és 0,9 m vastag normál beton fallal van ellátva [6].

A reaktivitás szabályozására a rendszer két biztonságvédelmi, valamint egy kézi és egy automata szabályozó rúddal van körbevéve. A biztonságvédelmi és kézi szabályozó rudak anyaga bórkarbid, míg az automata szabályozó rúd kadmiumozott acél.

A kísérleti és oktatási tevékenységek biztosításának céljából húsz függőleges besugárzó csatorna, öt vízszintes besugárzó csatorna, két csőposta és egy nagy méretű besugárzó alagút szolgál a zóna körüli neutron- és gammabesugárzásra.

Dolgozatunkban az említett szovjet tervezésű, EK-10 típusú üzemanyag-kazetta alapján épített, áramlási csatornába helyezett függőleges fűtőelempálca-modell körül kialakuló természetes áramlás következtében létrejött hőmérsékleti és sebességteret vizsgáljuk.

2. IRODALOMKUTATÁS

A dolgozatunkban ismertetett mérés megkezdése előtt tanulmányoztuk a szakirodalom releváns fejezeteit, és számos olyan beszámolót találtunk, melyekben a szerzők hozzánk hasonlóan PIV és LIF méréstechnikát alkalmaztak a hőmérséklet- és sebességtér mérésére. A méréstechnikákat részletesen a 3. fejezetben ismertetjük.

A PIV és LIF méréstechnika együttes alkalmazása gyakori módszer, általában akkor használják, ha mind a sebességtér, mind a hőmérséklettér ismeretére szükség van a vizsgált folyamatok jobb megértéséhez és paramétereinek meghatározásához. Erre jó példa Grafsrønningen és Jensen munkája, amiben egy vízszintesen elhelyezkedő fűtött henger fölött mért sebesség- és hőmérsékletterek közötti korrelációt vizsgáltak PIV és LIF méréstechnika egyidejű alkalmazásával [7]. A LIF méréstechnika a sebességtér meghatározása mellett koncentrációterek nagy felbontású mérésére is használható, így lehetőség nyílik egyes közegek között kialakuló fázishatárok szemléltetésére is. Ezt a módszert választotta Hlawitschka és Bart a sebességmező, a fázisok szétválása és a disszipálódó energia mennyiségének meghatározására egy DN32 típusú extraktorban [8]. A Hamburg-Harburg Műszaki Egyetem Integrált Folyamat- és Biotechnológiai Mérnöki Karán mind a mai napig nagy szerepe van a LIF méréstechnika alkalmazásának a mikrobiológiai folyamatok megértésére irányuló, Dr. Michael Schlüter által koordinált kutatásokban¹ [9].

A hőátadási tényező meghatározására ritkán alkalmaznak LIF mérés eredményeként kapott hőmérsékletmezőt. Ennek egyik oka az lehet, hogy a falhoz nagyon közeli közeg hőmérsékletének pontos meghatározása precíz beállításokat követel meg, valamint a LIF méréstechnika viszonylag újkeletű. A méréstechnika használata azonban egyre elterjedtebb, előnye, hogy a mérési

¹ Személyesen is szerencsénk volt megtekinteni a LIF méréstechnika ezen területen történő alkalmazását 2012 nyarán.

eredményként kapott sebességtér segítségével numerikus szimulációk eredményének validálása is lehetővé válik [1].

A LIF mérés technika önálló alkalmazására is találunk példát, legtöbbször gáz fázisú közegek és lángok hőmérsékletterének vagy koncentráció-terének vizsgálatára [10]. A PIV mérés jóval elterjedtebb a LIF mérésnél, szintén felhasználható CFD kódok validálására, valamint a kétfázisú áramlások vizsgálatában is egyre nagyobb szerepet játszik. Ennek nagy jelentősége van a reaktorok biztonsági elemzésénél, ahol üzemzavari és baleseti szituációkban kétfázisú áramlás alakulhat ki. Kumara és mások vízszintes csőben olaj és víz együtáramlását vizsgálták, turbulens sebességprofilokat határoztak meg [11]. A szakirodalomban háromdimenziós sebességterek mérésére is találunk példát [12]. Ebben a cikkben Brücker egy T-idom esetében az oldalágból a főágba becsatlakozó áramlatot háromdimenziós PIV mérés technikával vizsgálja, hogy meghatározza a numerikus szimulációk számára szükséges mérési eredményeket. Összességében a PIV mérés technikáról elmondható, hogy használata aránylag széles körben elterjedt, és várhatóan szerepe növekedni fog a többfázisú áramlások tulajdonságainak meghatározására irányuló kutatások széleskörű elterjedésével.

Mi a mérésünk során mind a PIV, mind a LIF mérés technikát alkalmaztuk, melynek célja a 2011-ben elvégzett hasonló méréssorozat bizonytalanságainak csökkentése, hogy a hőátadási tényező értékére pontosabb becslést adhassunk. A BME Oktatóreaktor fűtőelem-pálcája melletti hőátadási folyamat számításával és egyben méréssel történő vizsgálatával foglalkozik Könczöl Sándor is 1973-ban írt diplomamunkája keretében [13]. Azóta több számítógépes szimuláció is készült az Oktatóreaktorban zajló folyamatok megismerése érdekében, melyek eredményei a sebesség- és hőmérséklettér alakulását megfelelően szemléltették [14].

3. AZ ALKALMAZOTT MÉRÉSTECHNIKÁK ISMERTETÉSE

Az alábbi fejezetben ismertetjük az általunk alkalmazott Particle Image Velocimetry (PIV) és Laser Induced Fluorescence (LIF) mérés technika módszertanát, alkalmazásuk lehetőségeit, illetve a mérés során jelentkező hibaforrásokat. A PIV mérés technika sebességtér mérésére alkalmas, míg a LIF mérés technikát hőmérsékleti tér meghatározására használják.

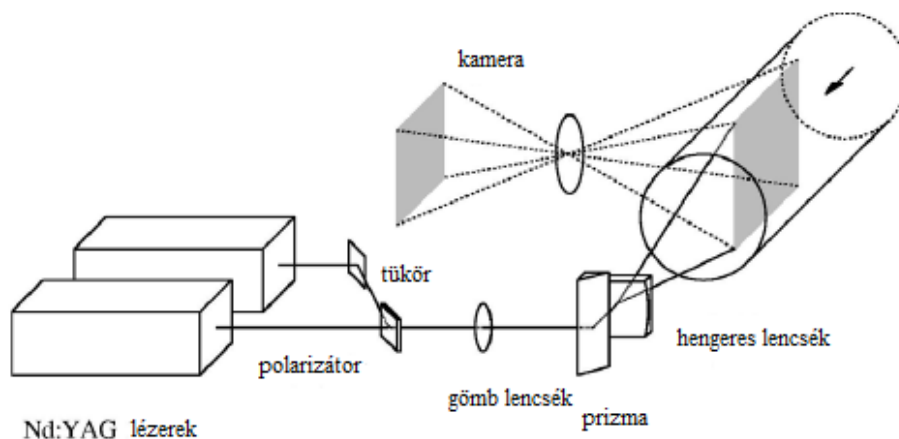
3.1. Particle Image Velocimetry (PIV)

PIV méréstechnika segítségével közvetve lehetővé válik egy áramló közeg két, vagy akár három dimenziós sebességterének a meghatározása. A méréstechnika alapelve, hogy az áramló közeghez a közeggel közel azonos sűrűségű, apró szemcséket keverünk, melyek azt követően a közeggel együtt áramlanak a kialakuló sebességtér szignifikáns befolyásolása nélkül. Erre a célra, víz közeg esetén néhány tíz mikron átmérőjű poliamid vagy polisztirol szemcséket szoktak alkalmazni.

A mérés során a detektálandó síkot impulzus üzemi lézerrel rövid időre megvilágítjuk és a közeghez kevert szemcséken annak fénye szóródik. Lézert azért alkalmaznak előszeretettel fényforrásként, mert nagy energiasűrűségű, monokromatikus nyalábot bocsát ki, melyet könnyedén síkká lehet transzformálni. A lézer szórt fényét a megvilágított síkra merőlegesen elhelyezett kamerával detektáljuk, mely elé olyan sávszűrőt helyezünk, amely a lézer hullámhosszán beeső fényt nagy, míg a környezetből beérkező fényt nagyon alacsony intenzitással engedi át. Ezáltal megkülönböztethetővé válik a szemcséken szórt fény [15].

A sebességmérés úgy valósul meg, hogy a detektálni kívánt területet két, egymást követő lézerimpulzussal világítjuk meg, melyek között rövid, ismert idő telik el. A szórt fényt megfelelő optikán keresztül, nagysebességű CCD (Charge Coupled Device) kamerával detektáljuk, mely feladata a fényként beérkező jel elektromos jellé történő alakítása. A digitális kamera kimenetét közvetlenül egy számítógéphez csatlakoztatjuk, így a lézeres megvilágítást követően a felvételeket a méréstechnikához tartozó adatgyűjtő számítógép és kiértékelő program (Dantec Dynamics v3.00) segítségével rögzíthetjük. A detektált területeket a kiértékelés során kisebb egységekre, ún. interrogációs területekre osztjuk fel. Abból a feltételezésből indulunk ki, hogy a két megvilágítás között a részecskék sebessége az adott interrogációs területen belül homogén eloszlást mutat. Fontos paraméter az interrogációs területek felbontása, optimális értékének megválasztása. Ha túl kicsi interrogációs területet választunk, hamis sebességvektor értékeket kaphatunk, de célszerű törekedni a lehető legnagyobb felbontású mérési eredmények elérésére.

Statisztikai módszerekre alapuló kereszt-korrelációs technika segítségével a két kép készítése között eltelt idő és a szemcsék elmozdulása alapján ezekhez a területekhez sebességvektorok rendelhetőek. Az elmozdulás hosszát kalibrálást követően metrikus értékben is megkaphatjuk. Kalibrálás során a készített felvételen két kijelölt referencia pont közötti távolságot pixelben és mm-ben is megadjuk, így a program ezt követően képes metrikus értékke kalibrálni a felvételen pixelben értendő távolságokat.



3.1. ábra: A lézeres mérőberendezés elvi felépítése [16]

A 3.1. ábrán szemléltetjük a mérés során alkalmazott berendezés felépítését, amelyre leggyakrabban, az impulzusok között eltelt idő rövid volta miatt két lézerfejből álló, úgynevezett duál lézert alkalmazunk. A két lézer fénynyalábot optikai eszközök segítségével koncentrálják egy lézernyalábbá, majd egy hengeres lencse segítségével síknyalábbá transzformálják, hogy azzal a detektálni kívánt sík megvilágíthatóvá váljon [16]. 2011-ben a Nukleáris Technikai Intézet a mérőberendezés kiegészítéseként egy lézerkar beszerzése mellett döntött. Ezzel a mérési geometria beállítása lényegesen egyszerűbbé vált, hiszen a lézernyaláb eddigi fix pozíciójával szemben most könnyedén a többi mérési összeállításhoz igazíthatóvá vált.

A 3.1. ábrán szemléltetett mérési elrendezés kétdimenziós sebességtér felvételére alkalmas, sztereó PIV méréssel azonban háromdimenziós sebességtér meghatározása is megvalósítható. Sztereó PIV mérések végzésére további kamerára lenne szükség, ami jelentős költségnövekedést jelentene. Kétdimenziós sebesség tér felvétele során azonban elhanyagolásokat végzünk, hiszen a rotációktól, deformációktól a sebesség számítása során eltekintünk. Tehát olyan jelenségek mérése végezhető ezen mérés technika segítségével, amely során a detektálni kívánt síkra merőleges effektusok elhanyagolása nem visz jelentős hibát a mérésbe.

A fent említett hibaforráson kívül a szakirodalom további szisztematikus, a kereszt-korrelációs kiértékelési eljárásból, illetve a mérés technika sajátosságaiból eredő reziduális hibaforrásokat is taglal. Az utóbbi csoportba a két lézer hangolatlanságából eredő pontatlanságok, a részecskék anyagából és méretének határozatlanságából adódó hiba, illetve az adatfeldolgozás során esetlegesen fellépő számítási bizonytalanságok sorolhatóak. A relatív hiba csökkentésére az említett szakirodalom a képek átlagolását ajánlja (persze instacionárius folyamatok, turbulencia esetén ez információvesztéshez vezethet), míg a geometriából fakadó hibák kiküszöbölésére a mérés sorozat során igyekeztünk a kamera lézersíkra való merőlegességét és a lézersík áramlással való

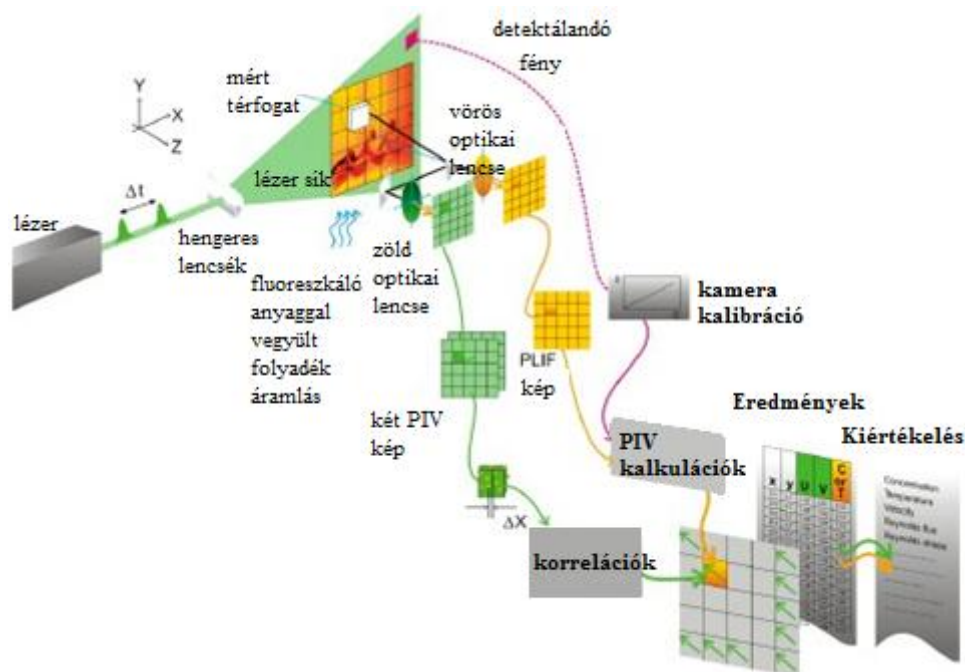
párhuzamosságát biztosítani. A kamera lézersíkra való merőlegességének biztosítása érdekében annak tartálytól való egyenletes távolságát egy vonalzó segítségével állítottuk be, míg vízszinteségét egy vízmérték alkalmazásával értük el. A lézersík áramlással való párhuzamosságát és a pálca középsíkjának lézerrel való eltalálását a tartály egyik oldalán hagyott 2 mm széles rés segítségével biztosítottuk. Feltételezve, hogy az adott szinten végrehajtott mérés során a lézerfény a szint alján a rés egyik szélét, míg tetején a rés másik szélét éri, a pálca középvonala által meghatározott síkot 3,5%-os hibával találjuk el [1].

Problémát jelenthet továbbá a megfelelő jelerősség elérése, mely érdekében — a szórt fény intenzitását növelendő — nagyobb átmérőjű részecskéket alkalmaznak vagy nagyobb részecske-sűrűséget hoznak létre [15]. Emellett a két megvilágítás között részecskéket veszthetünk, vagyis a másodszorra készült képen azok már nem feltétlenül jelennek meg. Figyelembe kell venni a CCD kamerával történő jelátalakítás során fellépő elektromos zaj hatását is. Ebben az esetben a gyengébb jelek a zajtól megkülönböztethetetlené válnak, azokat nem tudjuk többé hatásosan detektálni. A szakirodalom a hiba összértékét körülbelül 10%-ra becsülik [17].

3.2. Laser Induced Fluorescence (LIF)

A LIF mérés technika hasonló mérőberendezéseket igényel, mint a PIV mérés technika, alapját azonban az átlátszó közeghez kevert, lézerfény hatására fluoreszcenciára képes adalékanyag képezi. A közeghez adagolt anyag elhanyagolható mértékben befolyásolja a közeg áramlási tulajdonságait, a következőkben ismertetett fizikai folyamatok lévén azonban használatával meghatározható a közeg koncentráció- vagy hőmérséklettere.

A fluoreszcencia alapját az a jelenség képezi, hogy egy adott forrás felől beérkező fény (esetünkben lézerfény) hatására a közeghez adagolt anyag foton elnyelés következtében alapszintjéről gerjesztett állapotba jut. Ebből a gerjesztett állapotból a molekula az abszorbeált energia egy részének azonnali, hosszabb hullámhosszon történő kibocsátásával visszatér az alapállapotába. A kibocsátott foton hullámhossza a folyamat során bekövetkező energia-veszteség miatt nagyobb, mint az elnyelt fotoné. Bizonyos anyagok, mint a Rhodamin 6G fluoreszcencia intenzitás értéke a koncentráció függvénye, más anyagok (például az általunk is alkalmazott Rhodamin B) esetén az intenzitás mértékéből a hőmérsékletre következtethetünk (adott koncentráció esetén még az is megállapítható, hogy ez a függés lineáris). Olyan adalékanyagok is léteznek, mint például a só formájában uranin néven is ismert fluoreszcencia dinátrium, mellyel az intenzitás mértékéből mind a két, fent említett tulajdonságra következtethetünk [18].



3.2. ábra: A LIF mérés technika működési elve [19]

A LIF mérések során a fent leírt jelenség következtében kibocsátott fényt detektáljuk CCD kamera segítségével, mely elé a fluoreszcencia fény hullámhosszán áteresztő szűrőt helyezünk. A

fluoreszcens fény szeparálását követően, az elkészült kép pixelenkénti szürkeintenzitás értékeiből tudjuk a hőmérsékletet meghatározni. Az 3.2. *ábra* szemlélteti a mérés technika működési elvét.

Ahogy a PIV mérés során, itt is kalibrációt kell végezni a méréssorozat végrehajtása előtt, hogy később a pixelenkénti szürkeintenzitás értékekhez a megfelelő hőmérséklet értékeket rendelhessük. A kalibráció során közel homogén, ismert hőmérsékleti teret kell létrehozni, illetve gondoskodni kell a fluoreszcens molekulák koncentrációjának egyenletességéről is. Az ekként végrehajtott méréssel ismert hőmérséklethez pixelenként szürkeintenzitás értékeket rendelünk. Több, ismert hőmérsékleti érték mellett hasonlóan eljárva pixelenként meghatározható a szürkeintenzitás-hőmérséklet függés, melyből később az egész tartományra vonatkozó hőmérséklet teret is megkaphatjuk. A szükséges felvételek elkészítését követően a pixelenkénti kalibrációt Balogh Tibor 2012 nyarán elkészített kiértékelő programjának segítségével végeztük [20].

A mérés során hibaforrást nem csupán a fluoreszcens anyag koncentrációjának inhomogenitása, valamint a kalibráció során a hőmérséklettér egyenetlenségéből származó pontatlanság jelenthet, hanem a lézer intenzitásának idő- és térbeli fluktuációja is. Az időbeli egyenetlenség kiküszöbölésére legalkalmasabb módszernek releváns szakirodalmi ajánlás alapján több kép átlagolását találtuk [21]. A lézer térbeli fluktuációját küszöböltük ki a pixelenként történő kalibrálással.

További problémát okozhat a környezetből beszűrődő fény hatásának figyelembe vétele is. Mivel a LIF méréssorozat végrehajtása során különösen fontos, hogy a kalibrációként elvégzett méréssel azonos körülményeket teremtsünk az éles mérések számára is, ezért nem csak a geometria és a mérési berendezések pozíciójának szigorú azonosságára, hanem a külső fényforrás állandóságának biztosítására is törekednünk kellett. Ehhez a laboratórium ablakait sötétítéssel láttuk el, sőt az adatrögzítésre szolgáló számítógépek képernyőit is kikapcsoltuk a mérés idejére. A mérés pontosságának javítása érdekében a fűtőlempálca-modellt is matt feketére festettük, hogy lehetővé váljon a közvetlen közelében lévő terület sebesség- illetve hőmérsékletterének zavartalan detektálása.

Coolen [22] további hibaforrásokat is említ, melyek közül számunkra relevánsként az ún. photobleaching jelenségét érdemes megemlíteni. Ezen folyamat során a gerjesztés hatására fényt kibocsátó molekulák egy része újabb fluoreszcenciára képtelenné válik. Ezáltal gyakorlatilag csökken a fluoreszcens anyag koncentrációja.

A PIV és LIF mérés technika együttes alkalmazásával lehetővé válik olyan természetes áramlási terek vizsgálata, melynek elemzését mi is célunkként tűztünk ki. Ha a PIV és a LIF mérés technikák által igényelt részecskéket, illetve fluoreszcens anyagot egyidejűleg adagoljuk a mérni kívánt közeghez, akkor a fent ismertetett lézeres mérőberendezés és két, a megfelelő

szűrőkkel ellátott kamera felhasználásával parallel módon határozható meg a közeg kétdimenziós sebesség- és hőmérsékleti tere.

4. A MÉRÉSI BERENDEZÉS ISMERTETÉSE

Az alábbi fejezetben a méréssorozat végrehajtásának céljából összeállított és a vizsgálat során felhasznált mérési berendezéseket ismertetjük. A jelen fejezetben bemutatott azon felvételek, melyeket a forrás megjelölésével nem különböztettünk meg, saját készítésűek.

Az általunk felhasznált mérési összeállítás fizikai és geometriai paramétereit a vizsgálni kívánt Oktatóreaktor valós paramétereit alapján 2011-ben Szijártó Rita határozta meg [1].

A mérés egyik legfontosabb eleme a fűtőelempálca-modell, amelynek méretei gyakorlatilag megegyeznek a BME Oktatóreaktorában alkalmazott EK-10-es kazetta egy pálcájának méreteivel. A pálca-modell átmérője 10,1 mm, teljes hossza 700 mm, ebből a 100 mm-es alsó és a 100 mm-es felső fűtetlen szakaszok között elhelyezkedő, 500 mm-es aktív szakasz elektromosan fűthető, maximum 500 W teljesítmény leadására képes. A pálca energiaellátásáról egy transzformátor gondoskodik, aminek leadott teljesítménye egy kézi szabályozó segítségével állítható 0 és 100 %-os szint között. A pálca-modell eredetileg fémes fényű felülete túlságosan szórta a lézer fényét, ezért hőálló festékekkel matt feketére festettük. Ezáltal lehetővé vált — a LIF technikával készült képek alapján — a kiemelkedően fontos, a pálca falához közel eső régióban a területre jellemző hőmérséklet-eloszlás korábbanál precízebb meghatározása.

A fűtőelempálca-modell egy 1000x150x150 mm belső méretekkel rendelkező átlátszó tartályban helyezkedett el. A felülről nyitott tartály oldalfalai üvegből, az alsó lapja plexiből készült. A pálca-modell 100 mm hosszúságú fűtetlen tartományából egy 60 mm-es szakasz a tartályban helyezkedik el, míg a fennmaradó 40 mm a pálca rögzítését és a transzformátorhoz történő csatlakozást biztosítja. Ez a szakasz részben a plexi alaplapon, részben a tartályon kívül helyezkedik el. A tartály négy falából hármát fekete kartonpapírral fedtünk be, hogy a külső fényforrások (például napfény) nemkívánatos hatásait csökkenthessük. A pálcát egy állítható méretű távtartóval pozícionáltuk, amelyet szintén feketére festettünk. A tartályt vízzel töltöttük fel, körülbelül 850 mm magasságig, hogy az a pálcát ellepje. Az alkalmazott eszközökről általunk készített felvételeket a 4.1. ábra szemlélteti.

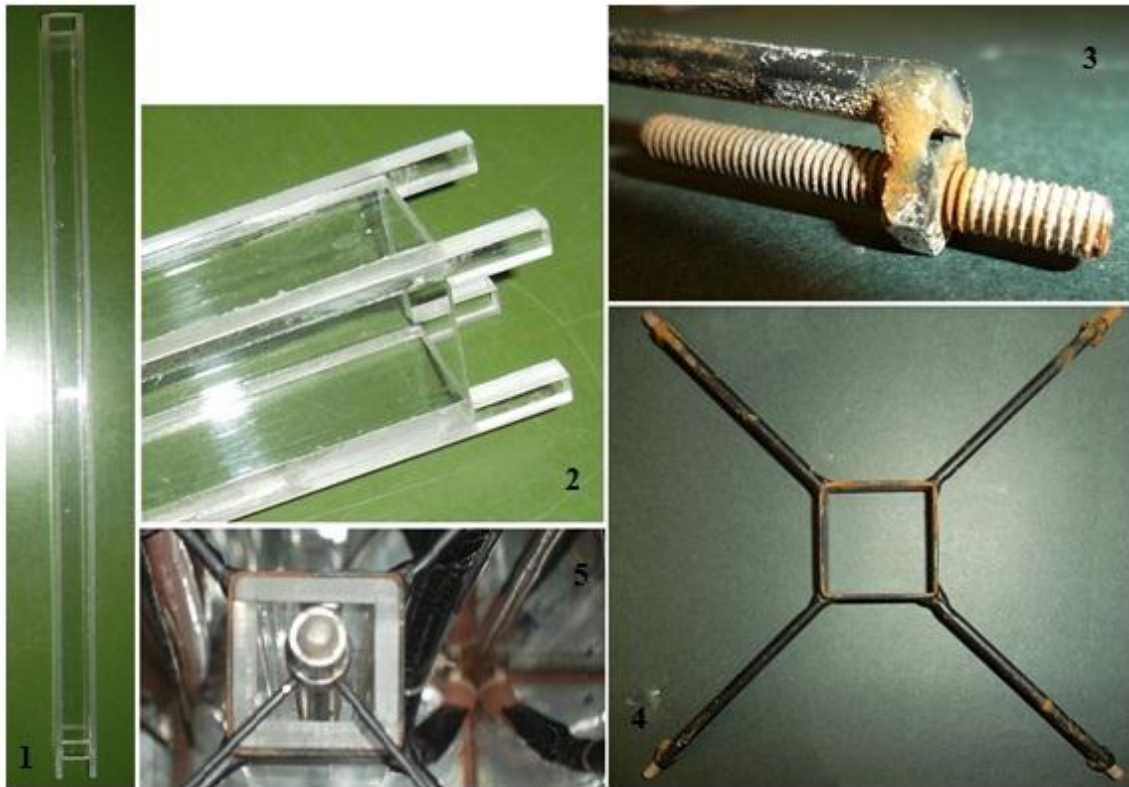
A távtartókon a tartály vizének korróziós hatása is megfigyelhető, ami a több órás mérések következménye. Ez a jelenség a mérések pontosságát javítani hivatott feketére történő festést követően is fellépett.



4.1. ábra: A mérés során alkalmazott berendezések

1: üvegtartály, 2: transzformátor, 3: a fekete kartonnal burkolt tartályfalak, 4: elektromos fűtópálca távtartója, 5: a fűtópálca tartálybeli elhelyezkedése, 6: a kijelölt mérési szintek a tartály falán, 7: állítható pozicionáló a távtartó sarkain

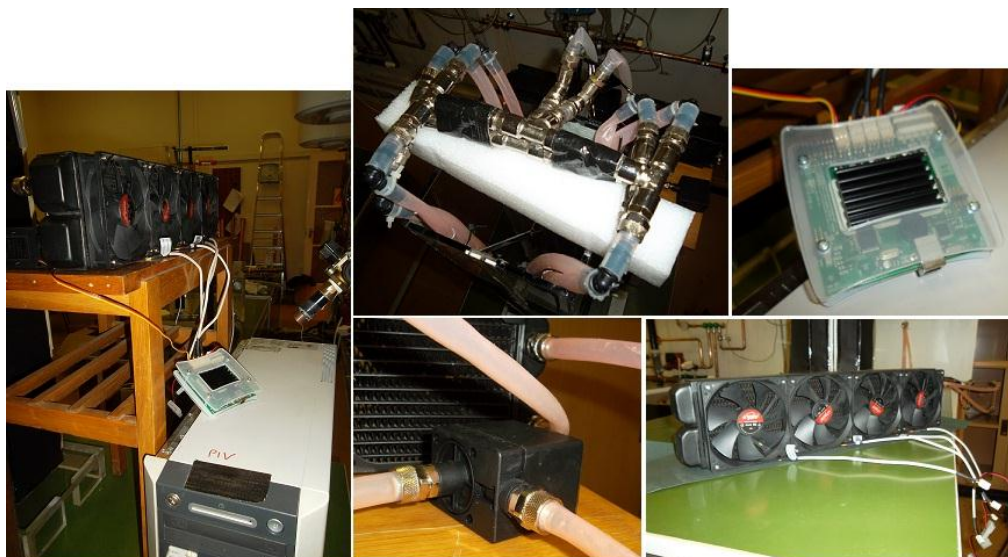
A 4.2. ábrán látható a tartály oldalfalai és a fűtópálca közé elhelyezett, plexiből készült áramlásicsatorna-modell, melynek méreteit úgy tervezték, hogy áramlási keresztmetszete megegyezzen az Oktatóreaktorban elhelyezkedő egy fűtőelempálcára eső áramlási csatorna keresztmetszetével. Az áramlásicsatorna-modellhez szintén tartozik egy távtartó, melynek segítségével a csatornát is a tartály közepére pozícionálhattuk (lásd 4.2. ábra).



4.2. ábra: Az alkalmazott áramlásicsatorna-modell elemei

1: a plexi áramlásicsatorna-modell, 2: az áramlásicsatorna-modell lábai, 3: az áramlási csatorna távtartójának állítható pozícionálója, 4: az áramlásicsatorna-modell távtartója, 5: az áramlásicsatorna-modell tartálybeli elhelyezkedése

A LIF méréseknél szükséges kalibráció szempontjából fontos volt, hogy homogén hőmérsékletteret tudjunk létrehozni. Erre – kísérletezést követően – optimális megoldásként Szijártó [1] egy hűtőkört épített be, melynek tartozékai egy Phobya DC12-260 szivattyú, egy GMR átfolyásmérő, egy radiátor hőcserélő négy ventillátorral és a tartállyal való összekötéshez szükséges szilikon csövek voltak. A berendezés a tartály felső részéről szívott melegebb vizet az akvárium aljára juttatja vissza egy 130x130 mm-es plexi lemez alá, ami a vizet az akvárium fala felé tereli, elősegítve ezzel a keveredést. A radiátornak és a ventillátoroknak a rendszer visszahűtésénél volt szerepe, melyet a tartály hőmérsékletének homogenizálása érdekében nem használtuk. A fenti berendezések számára a villamosenergia-ellátást egy tápegység biztosította. Az imént ismertetett berendezéseket a 4.3. ábra szemlélteti.



4.3. ábra: A kialakított hűtőkör-modell a szivattyúval, ventillátorokkal és a működtető elektronikával

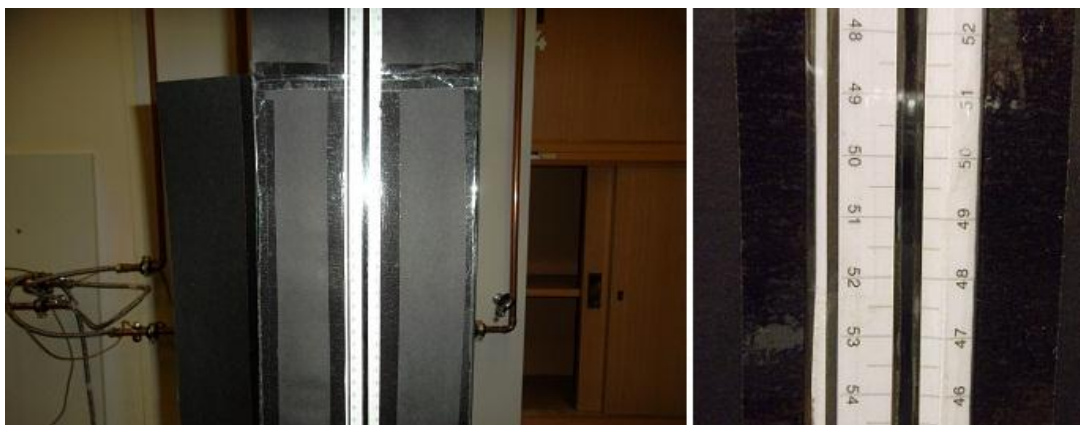
A tartály vizének hőmérsékletét nyolc különböző magasságban mértük egy nyolc termoelemből álló, előzőleg kalibrált termoelem-sorral (lásd 4.4. ábra).



4.4. ábra: A felhasznált termoelem-sor és elektronikája

A Szabó Bálint által tervezett és elkészített adatgyűjtő-program [23] segítségével a termoelemek által mért hőmérsékleteket valós időben értékelhettük, ezen adatok segítségével állapítottuk meg, hogy mikor fejezte be a hűtőkör a tartályban lévő víz hőmérsékletének homogenizálását.

Mind a PIV, mind a LIF mérésekhez szükség van lézerre és kamerákra. A lézer esetünkben egy 135 mJ maximális intenzitású duál Nd:YAG lézerforrás, amely 532 nm-es hullámhosszon képes fény kibocsátani. Maximális frekvenciája 15 Hz. A fekete kartonnal történő árnyékolás során a tartály egyik oldalán 2 mm széles rést hagytunk (lásd 4.5. ábra), melynek függőleges szimmetriatengelye egybeesik a tartály oldallapjának szakaszfelező merőlegesével.



4.5. ábra: A lézernyaláb számára kialakított rés

Az NTI által vásárolt lézervezető kar segítségével, a lézersíkká alakított nyalábot a résen keresztül a pálca-modellre fókuszáltuk, így lehetővé vált a detektálandó síkon a kétdimenziós sebesség- és hőmérséklettér meghatározása. A lézervezető kar végoptikáját egy állítható magasságú állványon rögzítettük (lásd 4.6. ábra), ennek segítségével a pálca teljes hosszának végigméréséhez szükséges függőleges irányú mozgás könnyen kivitelezhetővé vált.



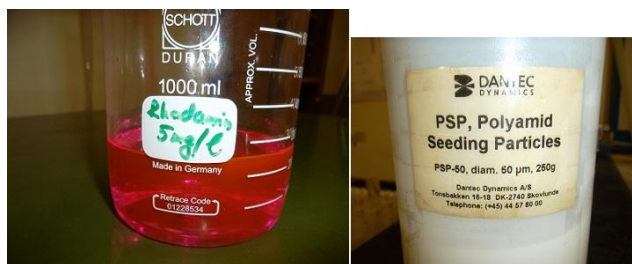
4.6. ábra: A lézerkar és az állítható állvány

A két CCD kamera is hasonló állványon helyezkedett el, melyek a lézer által megvilágított síkról készítettek felvételeket. A kartonpapír-árnyékolást természetesen nem ragasztottuk fel az akvárium azon oldalára, ahonnan a kamerák a képek detektálását végezték. A kamerákat számítógép vezérelte, hogy a lézer felvillanása és a kép készítése szinkronban történhessen. Az érzékeny CCD szenzorok védelme, illetve a nemkívánatos zajok csökkentése érdekében a kamerák elé szűrőket helyeztünk el. A 4.7. ábrán a PIV képeket készítő kamera elé helyezett, a lézer hullámhossza környékén (532 ± 1 nm) áteresztő, illetve a LIF képet készítő kamera elé helyezett 550 nm felett áteresztő szűrők láthatóak.



4.7. ábra: PIV és LIF szűrők

Az eredményes PIV és LIF mérésekhez a vízben megfelelő adalékanyagok jelenléte szükséges. Esetünkben a víz sűrűségével közel megegyező sűrűségű, 50 μm átlagos átmérőjű poliamidszemcséket kevertünk a vízhez a PIV mérés, 5 mg/l koncentrációjú Rhodamin B oldatot a LIF mérés végrehajtása érdekében (lásd 4.8. ábra). A szükséges mennyiségeket tapasztalati úton Szijártó Rita 2011-ben készített méréssorozata során optimalizálta [1].



4.8. ábra: A Rhodamin B adalékanyag és a poliamid szemcsék

A teljes mérési összeállítást a 4.9. ábra, míg a lézer tápegységet és az adatgyűjtéshez szükséges eszközöket a 4.10. ábra szemlélteti.



4.9. ábra: Az összeállított mérés

1: a kialakított hűtőkör, 2: a kamerák elhelyezése a tartály fedetlen falával szemben, 3: a lézerkar tartályra irányítása



4.10. ábra: A lézer tápegysége és az adatgyűjtéshez szükséges eszközök

Ahogy azt már a Bevezetőben említettük, a 2011-es mérési összeállítást több szempontból továbbfejlesztettük. A fejezet zárásaként összefoglaljuk azokat az méréstechnikai és a kiértékelés során alkalmazott módszereket, melyek a módosítás hatáskörébe estek.

A mérésnek helyet adó laboratórium ablakait kartonpapírral vontuk be, így a napszakváltozással együtt járó külső fényerősség-változás a mérés hosszas elhúzódása ellenére sem befolyásolta a mérési eredményeket. A fényerősség állandó értéken tartására a hőmérséklet-kalibráció szempontjából fontos, ezt bővebben az 5.2 fejezetben ismertetjük. Ezen hibaforrás hatásának további csökkentése érdekében a fűtőelempálcát tartalmazó tartály falait fekete kartonpapírral fedtük be. A pálca faláról visszaverődő fény a falhoz közeli tartományban a hőmérsékletmező meghatározásakor jelentős hibát okoz, de a visszaverődés mértéke csökkenthető. Emiatt a pálcát, annak távtartóját és az áramlási csatorna távtartóját matt fekete festékkel vontuk be.

Nem a berendezésben történt módosítás, de a hőmérséklet-kalibráció hibájának csökkentését eredményező megoldás a kalibráció céljára felvett képek átlagolása, mely a lézer időbeli fluktuációját hivatott kiegyenlíteni [22]. Esetünkben százkilencven kép átlagolására került sor.

A PIV mérés alapján meghatározott sebességtér x irányú felbontását az interrogációs területek méreteinek megváltoztatásával növeltük, annak nagyságát 16×16 pixelről 8×32 -re módosítottuk. Ez a hidraulikai határréteg-vastagság számítása miatt elengedhetetlen volt.

A fent említett változtatásokkal jelentősen növeltük a pontosságot a 2011-ben elvégzett méréssorozathoz képest.

5. A MÉRÉS ISMERTETÉSE

A következő fejezet során az általunk elvégzett méréssorozatot ismertetjük, kezdve a mérés előkészületeinek bemutatásával, a kalibráció menetének leírásával, majd az éles mérések szemléltetésével.

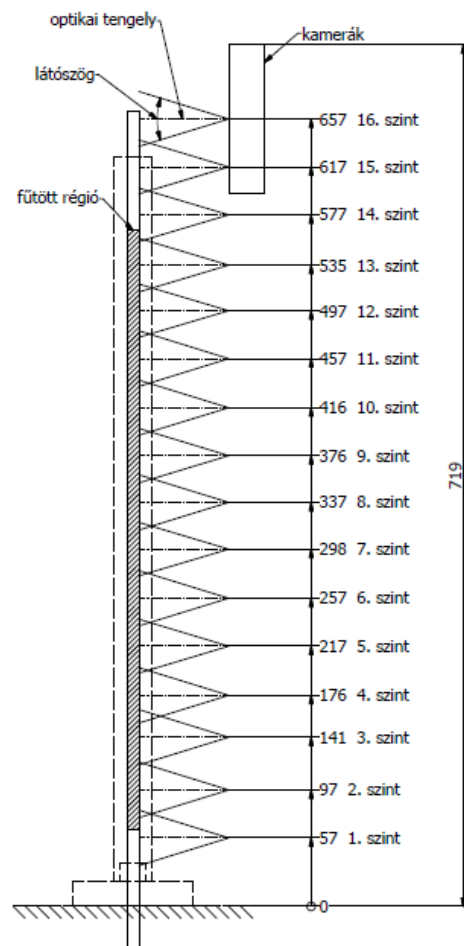
5.1. A mérés előkészületei

A mérés előkészületeként a tartályt vízzel töltöttük fel, majd hozzákevertük a poliamid-szemcséket és a Rhodamin B koncentrátumot. A hűtőkör szivattyúját az adalékanyagok egyenletes elkeverése érdekében maximális teljesítményen üzemeltettük.

A lézer optimális beállításait egy előző, felkészülési mérésünk alkalmával határoztuk meg. Ezzel elértük, hogy a duál lézer mindkét impulzusa hasonló intenzitású fényt bocsásson ki, ami a PIV méréstechnikával készült képeket feldolgozó, auto- és keresztkorrelációs technikát alkalmazó program számára fontos. A lézer tapasztalati úton meghatározott egyensúlyi beállításai a lézerek teljesítményét illetően: LASER1 82 %, LASER2 77 %, míg az erősítő, más néven ATTENUATOR 100 %-os értéken volt. Ezen beállítások mellett a lézernek szüksége van egy másodpercnyi időre a névleges teljesítmény elérésére, így a későbbiekben a mérések keretein belül 10 Hz frekvenciával készült képek közül az első tizet nem használtuk fel.

A lézer beállítása után a CCD kamerákat csatlakoztattuk a számítógéphez, majd elindítottuk a Dantec Dynamic Studio 3.00 programot. A megfelelő időbeli átlagolás elérése céljából egyszerre kétszáz képet készítettünk. A nagy tárhely-igény miatt a detektálásra felhasznált területet leszűkítettük, a mérés első felében — az elsőtől a kilencedik szintig — 600x1200 pixel, a második felében — a tizediktől a tizenhatodik szintig — 800x1200 pixel felbontású képeket készítettünk. A két lézerimpulzus között eltelt időt 1000 μ s-nak választottuk, a képpárokat 10 Hz gyakorisággal rögzítette a rendszer. Ezután a kamerákat a mérési pozícióba állítottuk az őket tartó állvány segítségével. A kamerákat a tartály árnyékolatlan falával szembe pozícionáltuk, a faltól 22-23 mm távolságra, míg a horizontális beállítás a tartály oldalára berajzolt, a fal szélétől 50 mm távolságra lévő függőleges vonal segítségével történt. A kamerával próbafelvételeket készítettünk, és azt tapasztaltuk, hogy az így kapott képek magassága 45 mm körüli. Ez alapján a pálca-modellt függőlegesen tizenhat szintre osztottuk fel úgy, hogy az első szinten a kamera teteje 112 mm magasságra legyen a tartály fenekétől. Ezt követően szintenként 40 mm-rel emeltük feljebb a kamerákat. Így a képek között körülbelül 3 mm átfedés alakult ki, ami szükséges távolság ahhoz,

hogy a pálca-modellt a teljes hossza mentén vizsgálni tudjuk. A 5.1. ábrán az általunk mért 16 szintet szemléltetjük. A kamerák teteje és az elkészített képek középsíkja közötti távolság állandó, így a reprodukálhatóság szempontjából mindegy, hogy a kamerák teteje, vagy a szintek elhelyezkedését jelöljük. A könnyebb érthetőség kedvéért a 5.1. ábrán a kamerák középsíkjának az asztallaptól vett távolságát jelöltük, a gyakorlatban azonban a kamerák tetejének pozícióját állítottuk be.



5.1. ábra: A 16 mérési szint elhelyezkedése

A mérési szintek megállapítása után behelyeztük a termoelem-sort a tartályba. Figyelmet fordítottunk arra, hogy az egyes termoelemek ne érintkezhessenek a mérőberendezés szintén tartályban található alkatrészeivel, valamint a tartály falával, mert ez hamis mérési eredményekhez vezetett volna.

A laboratóriumban a szemet súlyosan károsító lézertűnyel dolgoztunk, így a szükséges balesetvédelmi intézkedéseket megtettük, a mérés során védőszemüvegek viseltünk.

5.2. Kalibráció

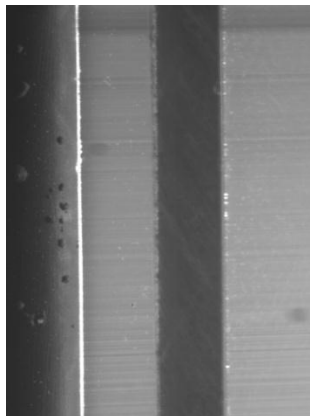
A mérés megkezdése előtt a PIV méréstechnikához távolság, a LIF méréstechnikához hőmérséklet kalibrációra volt szükség.

Minden kamerapozícióban el kellett végezni a távolság-kalibrációt, ennek segítségével állapíthattuk meg a mérés során elkészült képek valós méreteit. Ez különösen fontos a PIV mérések esetében, hiszen az áramló közeghez adagolt részecskék elmozdulását a program a kalibrációs fájl adatai alapján határozza meg. Összességében tehát a sebességtér vektormezőjében az egyes vektorokhoz rendelt sebességértékek nagysága a távolság-kalibráció függvénye. A kalibrációt egy vékony pálcára ragasztott milliméter-papír segítségével végeztük el (lásd 5.2. *ábra*). A kalibrációs pálcáról a detektált terület síkjában felvételeket készítettünk, majd a Dantec Dynamic Studio 3.00 program segítségével a felvételen látható milliméterpapír alapján meghatározható a kalibrációs tényező, azaz a képek felbontása pixel/mm-ben. A fenti kalibráció eredményeképp a felbontás átlagosan 26 pixel/mm-nek adódott.



5.2. *ábra*: A kalibrációs pálca

A LIF mérések elvégzéséhez szükséges hőmérséklet-kalibráció során a tartályban lévő Rhodamin B koncentrátumot tartalmazó vizet több, termoelemek segítségével meghatározott hőmérsékletre melegítettük, majd a hőmérséklet homogenizálása után a vizsgált tartományról szürkeintenzitás képeket készítettünk.



5.3. *ábra*: Egy tipikus hőmérséklet-kalibrációhoz alkalmazott felvétel

Az 5. szint 32°C átlagos közeghőmérsékletéhez tartozó kalibrációs kép található a 5.3. ábrán. A vizsgált hőmérséklettartományban a Rhodamin B által kibocsátott fény intenzitása lineárisan függ a hőmérsékletétől [22], ami megegyezik a hordozó közeg hőmérsékletével. Célunk ezen kalibrációs egyenes egyenletének a meghatározása a detektált terület minden pontjában. Ennek érdekében az egyes mérési szinteken öt-nyolc hőmérséklet-érték beállítását végeztük el, majd a területről minden hőmérsékleti érték mellett 200 felvételt készítettünk, amelyből a már említett okok miatt csak 190 kép átlagát számoltattuk ki a programmal. A szakirodalom harminc kép átlagolását tartja elegendőnek a Nd:YAG lézer által kibocsátott fény intenzitásának időbeli fluktuációját kiküszöbölendő [22]. Ezeket a képeket exportáljuk egy – csak az egyes pontokban mérhető intenzitások számértékeit tartalmazó – fájlba, mely az adott hőmérsékleten detektált terület jellemzője.

A fájlokat Balogh Tibor 2012-ben elkészített kaib_bt nevű kalibráló programjának segítségével feldolgoztuk [20]. A program minden pontban meghatározza a kalibrációs egyeneseket, ezek közül hármat véletlenszerű pontok esetében ábrázol, így lehetővé válik annak a megállapítása, hogy az egyenes megfelelően lett-e illesztve a pontokra.

A program a továbbiakban ezeket az egyeneseket használja fel az elvégzett mérés eredményeként létrejövő szürkeintenzitás-mezők hőmérsékletmezővé való konvertálására.

5.3. A mérés menete

A mérési előkészületek és a távolság-kalibráció elvégzése után minden készen állt a mérések végrehajtására, melyeknek a LIF mérés technikához szükséges hőmérséklet-kalibráció is része volt. Ebben az alfejezetben a mérés menetét írjuk le lépésről lépésre.

A távolság kalibráció elvégzése után a lézert beindítottuk és megvártuk, amíg a hűtőfolyadék felmelegedett az előírt szintre. A Dynamic Studio 3.0 program segítségével a kamerákat Preview üzemmódba állítottuk, így azok nem készítettek felvételeket, de a képernyőn látható volt az, amit éles mérés során (Acquisition) rögzített volna a rendszer. Ekkor lehetőség volt a lézer pozicionálására, így megbizonyosodhattunk róla, hogy a lézersík valóban a fűtőelem-pálca középsíkját találta-e el. Ennek a lépésnek akkor van kiemelt jelentősége, amikor a mérési szintek közötti váltáskor állítani kell a lézert tartó állvány magasságát. Egy szinten belüli mérések alkalmával a lézert megfelelő pozicionálás esetén már nem kellett mozgatni. A kamerákat objektívjeik segítségével a lézersík hatására láthatóvá váló poliamid szemcsékre fókuszálhattuk (utólagos finomhangolás), így a jel-zaj arány javítható volt, különösen a PIV mérés esetében.

Ezek után a laboratórium elsötétítését végeztük el, és végrehajtottuk az első hőmérséklet kalibrációs mérést. Mivel a mérési előkészületek során a poliamid szemcsék és a Rhodamin B oldat elkeverése során a keringtető rendszert már működtettük, a tartályban homogénnek tekinthető volt a hőmérséklet eloszlás. A közeg hőmérsékletét a termoelemek segítségével megmértük és feljegyeztük, majd kétszáz képet készítettünk az áramlási csatorna és a pálca közötti térrészről. A kamerák Single Frame üzemmódban üzemeltek, tehát csak egy képet rögzítettek, hiszen a dupla képekre csak a PIV mérések során van szükség. A mérés eredményeként kapott kétszáz kép közül a már ismertetett okból az első tízet kitöröltük, a maradék 190 darabot pedig átlagoltuk. A fájlt numerikus formában későbbi használatra kimentettük.

Ezt követően a transzformátort maximális teljesítményre állítottuk, és megvártuk, amíg kialakul az állandósult áramlási tér a pálca körül, majd Double Frame módban kameránként 200 képet készítettünk, melyekből 190-et mentettünk el. A mérést követően a hűtő-keringtető rendszert bekapcsoltuk (csak keringtető funkcióval üzemelt) és a közeget előírt hőmérsékletre melegítettük. A hőmérséklet-értékeket a termoelem-sor mérési eredményei alapján határoztuk meg. A kívánt hőmérséklet elérése után a transzformátort lekapcsoltunk, miközben a keringtető rendszert járattuk, míg homogén eloszlásúnak tekinthető hőmérsékletteret nem mértünk a nyolc termoelemmel. Ekkor újabb hőmérséklet-kalibrációs mérést végeztünk, majd a transzformátor bekapcsolása után újra az áramlásról készítettünk felvételeket. Egy mérési szint esetében ezt a eljárást többször megismételtük, így jutottunk szintenként öt-nyolc hőmérséklet-kalibrációs ponthoz és három-hat éles mérési eredményhez.

A folyamatot a rendszer visszahűtése követte, mely részben a tartályba lógatott fagyasztott vizes palackokkal, részben a hűtőrendszer ventillátorainak és hőcserélőinek segítségével történt. Ez körülbelül egy-másfél órán keresztül tartott, így a mérés és a visszahűtés együtt kettő-kettő és fél órát vett igénybe. A tartály vizéhez kevert adalékok ülepedése miatt fontos, hogy a kalibráció és a mérés között ne teljen el sok idő, így a kalibráció és a mérés csak együtt volt kivitelezhető. A fent leírt folyamatot mind a tizenhat mérési szint esetében elvégeztük. Az egyes szintek beállításakor a lézer állításán kívül a kamerákat is értelemszerűen állítani kellett, a pozicionálást a 5.1 fejezetben leírt módon valósítottuk meg. Az elvégzett mérések pontos beállításairól az *I. táblázat* tartalmaz összefoglalót.

I. TÁBLÁZAT

Mérési szint	Kamerák pozíciója (cm)	Készített kép magassága (cm)	A pálcafal vízszintes pozíciója (pixel)			A csatornafal vízszintes pozíciója (pixel)		
			y=300 (pixel)	y=600 (pixel)	y=900 (pixel)	y=300 (pixel)	y=600 (pixel)	y=900 (pixel)
1	11,2	4,63	123	125	127	275	275	275
2	15,2	4,63	138	137	135	307	302	295
3	19,6	4,62	186	185	184	338	338	332
4	23,1	4,62	199	196	193	333	330	328
5	27,2	4,5	149	146	143	288	285	283
6	31,2	4,61	123	122	118	273	269	267
7	35,3	4,47	159	157	154	279	279	281
8	39,2	4,62	188	184	179	301	300	299
9	43,1	4,55	153	151	153	317	313	312
10	47,1	4,6	205	209	208	364	364	365
11	51,2	4,64	190	191	190	351	352	357
12	55,2	4,44	171	166	160	335	329	327
13	59	4,48	180	176	169	348	337	329
14	63,2	4,46		142	138		287	281
15	67,2	4,5	121	123	122	263	259	372
16	71,6	4,58	215	212				

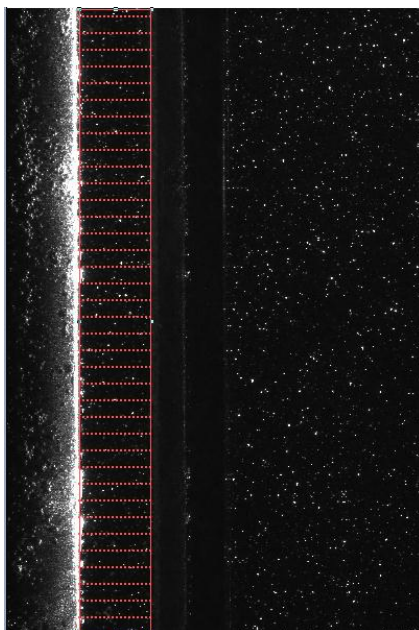
A szürke cellák jelölik azokat a helyeket, ahol a pálca és az áramlási csatorna határait nem tudtuk értelmezni, a 14. szint y=300 pixelértéknél az áramlási csatorna távtartójának, míg a 16. szinten az y=900 pixelértéknél a fűtőelempálca távtartójának jelenléte miatt. A 16. szinten a közeg már kilép az áramlási csatornából, így annak határai már nem definiálhatóak.

6. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK

6.1. A PIV mérés eredményei

A PIV és a LIF mérést párhuzamosan végeztük. A PIV mérést mind a tizenhat, fent definiált mérési szint esetében végrehajtottuk, hogy a pálca teljes hosszában vizsgálható legyen a sebességtér — a fűtött és fűtetlen pálca-szakaszok melletti tartományban egyaránt.

Egy beállított kameraszinten minden – LIF méréshez beállított – közeghőmérséklet esetében elvégeztük a sebességtér mérését, egy mérés során százkilencven feldolgozható képpárt kaptunk. A Dantec Dynamic Studio 3.00 programja segítségével, a program FlexPIV nevű alkalmazásával a képek egy meghatározott tartományát vizsgáltuk, nevezetesen a fűtőelempálca és a plexi áramlási csatorna belső fala közötti térrészt. A program a képek analizálását egy általunk megrajzolt háló (grid) segítségével végzi el, mely háló rácsmérete adja az interrogációs területek nagyságát is. A képek elemzését több rácsméret mellett elvégeztük, ezek közül több is a vártnak megfelelő eredményt adott, de optimálisnak végül a 8x32 pixel méretű, függőlegesen elnyújtott interrogációs terület bizonyult (lásd 6.1. ábra). A döntésünk hátterében az állt, hogy a kis vizsgált térrészben, az áramlási csatorna fala és a fűtőelempálca felülete között 5 mm széles rés van, így a határréteg vizsgálata szempontjából a horizontális felbontás nagyobb szerepet játszik, mint a vertikális. A 32 pixeles függőleges felbontásra a viszonylag nagy áramlási sebesség miatt is szükség van.



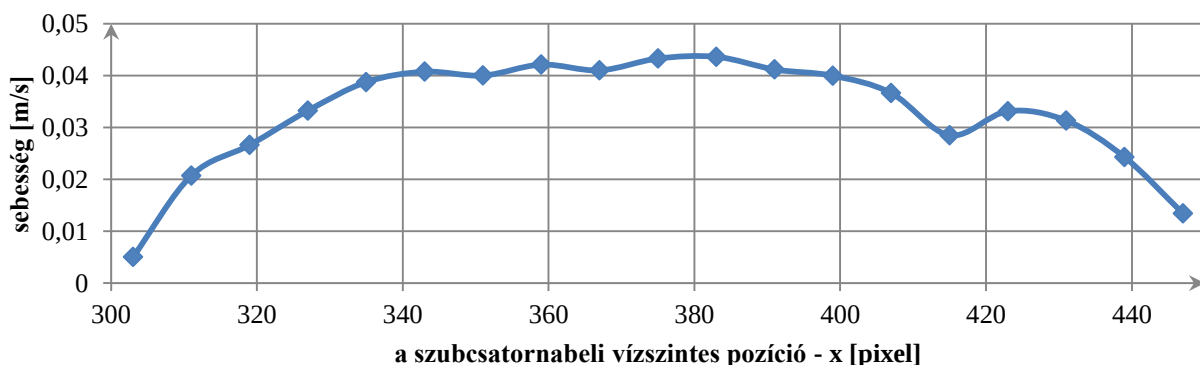
6.1. ábra: 8x32-es háló definiálása az áramlási csatornában
(a pontsor bal oldalán a fűtött pálcafelület, jobb oldalán a plexi áramlási csatorna fala látható)

A mérés során elkészült százkilencven képpár elemzése során ugyanennyi vektormezőt kaptunk eredményül, melyek a már említett módon a grid által meghatározott interrogációs területek esetében a rájuk jellemző sebesség-vektorokat tartalmazzák. Ez nagyságrendileg ezer vektort jelent képpáronként, mely vektorok a pillanatnyi sebességértékeket jelölik. A program Vector Statistics nevű alkalmazásával a 190 vektormezőt átlagoltuk, így azt a vektormezőt kaptuk meg, mely a vizsgált térrészre a 19 s alatt jellemző volt. Az alkalmazás a feltételezhetően irreális eredményt mutató vektorokat figyelmen kívül hagyta, az átlagba nem számolta bele. A Dynamic Studio lehetővé teszi, hogy a vektormezőt numerikus formában kimentsük, ahol az exportálandó paraméterek megválasztására is lehetőségünk nyílik. Ezt a fájlt később a Microsoft Excel programjával feldolgoztuk.

Az adatfeldolgozás célja a közeg áramlási sebességének illetve sebességprofiljának meghatározása volt. Ez utóbbi segítségével számolhatjuk a hidraulikus határreteg vastagságát és annak magasságfüggését.

A fűtőelem-pálca-modell alsó, fűtetlen tartománya mellett lamináris áramlásra jellemző parabolikus sebességprofilra következtethetünk, melyet az első detektált szintről készült felvétel alapján meghatározott 1. diagram is szemléltet. A sebességprofilok ábrázolása a Dynamic Studio 3.0 program által meghatározott és onnan manuálisan exportált sebességértékekből a Microsoft Office Excel program segítségével történt. Az elkészített felvételek kiértékelésekor, az interrogációs területek beállítása során a rácsot úgy vettük fel, hogy annak bal széle a fűtött pálca külső felületén, jobb széle az áramlási csatorna belső falán helyezkedjen el. Mivel egy interrogációs terület 8 pixel szélességű és a kiértékelő program az interrogációs terület középpontjához rendeli a meghatározott sebességvektort, így az ábrázolt sebességprofilok első adatpontja a pálca falától, illetve utolsó adatpontja az áramlási csatorna belső falától is 4 pixel távolságra helyezkedik el.

1. diagram:
Lamináris sebességprofil a beáramlásnál



A sebességprofil az első szinten 26°C-on készült felvétel y=900 pixelhez tartozik

Az 1. szintet és a 2. szint nagyjából kétharmadát a lamináris áramlásra jellemző parabolikus profil jellemezte addig, amíg a pálca fűtött szakaszának határára nem értünk. A lamináris jellegét egy közelítő számítás elvégzésével is alátámasztottuk. Természetes áramlás esetén az áramlás jellegére a Rayleigh-szám értékéből következtethetünk. Ha értéke 10^9 alatti, akkor lamináris, ha 10^{13} feletti, akkor turbulens áramlásra következtethetünk.

$$Ra = Gr * Pr = L^3 \frac{\beta g (T_1 - T_2)}{\nu^2} Pr \quad [-] \quad (6.1)$$

ahol:

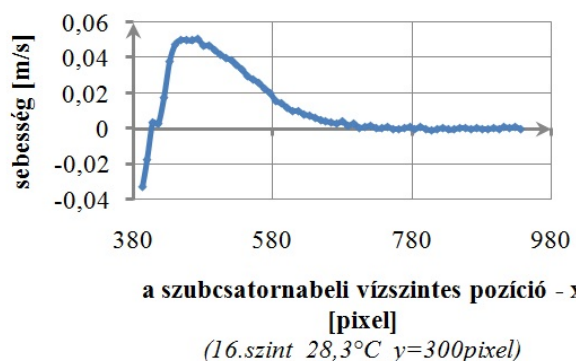
- $T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$: mértékadó hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
- Pr : a közeg mértékadó hőmérsékleten vett Prandl-száma [-]
- ν : a közeg mértékadó hőmérsékleten vett kinematikai viszkozitása [m^2/s]
- g : a gravitációs gyorsulás [m/s^2]
- L : a geometriára jellemző méret (jelen esetben az áramlási csatorna szélessége) [m]
- β : a közeg mértékadó hőmérsékleten vett térfogati hőtágulási együtthatója [$1/\text{K}$]
- T_1 : a pálcafal hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]
- T_2 : a közeg hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]

A mért adatok segítségével a becsült Ra -szám $4 \cdot 10^4$ körüli értéket vett fel, vagyis lamináris jellegre következtethetünk.

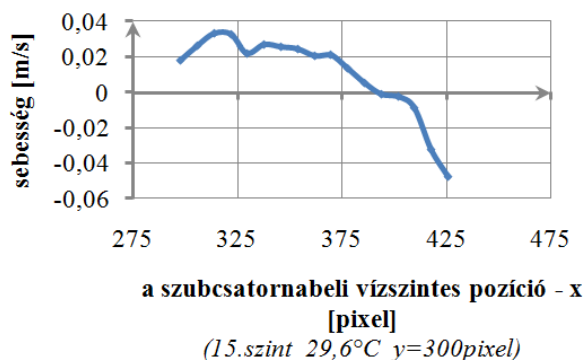
A kezdeti szakaszon az áramlás maximális sebessége 5 cm/s körül alakult, hidraulikus határréteg kialakulásáról nem beszélhetünk. A fűtetlen szakasz melletti nem nulla sebességértéket a kémény-effektus hatásának köszönhetjük [24].

A fűtött pálcaszakasz mellett a falhoz közeli rétegben a víz felmelegszik, és a sűrűségkülönbség hatására felfelé száll, ezért a sebességprofil alakja fokozatosan megváltozik. A belépésnél látható profil először deformálódik, majd teljesen eltűnik, a sebesség maximuma a fűtőelem-pálca fala felé tolódik el, maximuma pedig eléri a 8 cm/s -ot is. Ezt a folyamatot mutatja be a 2-7. diagramokból álló sebességprofil-sorozat.

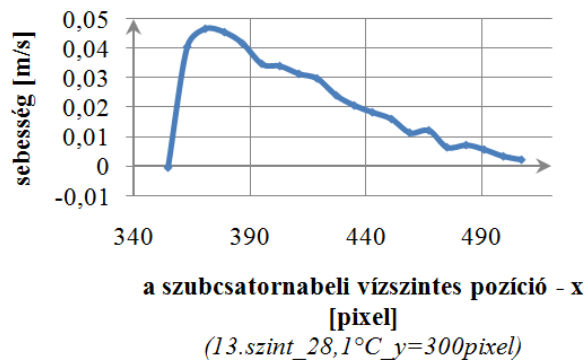
2. diagram:
Az áramlási csatornából
történő kiáramlást jellemző
sebességprofil



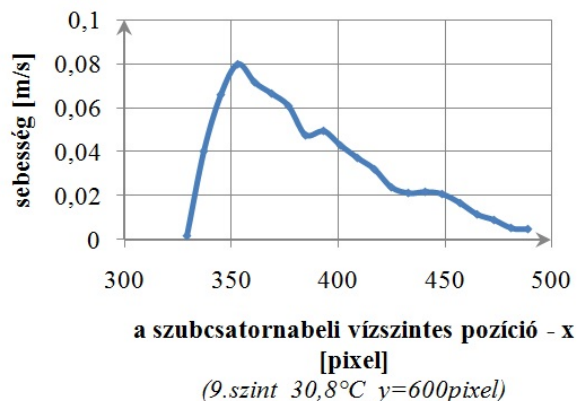
3. diagram:
A pálcamodell felső fűtetlen
szakasza melletti
sebességprofil



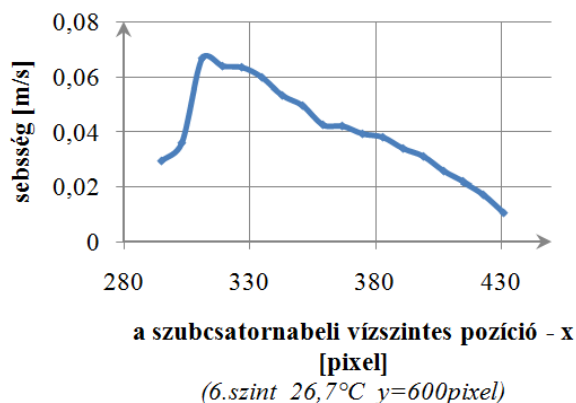
4. diagram:
Jellemző sebességprofil a
fűtött pálcaszakasz felső
régiója mellett



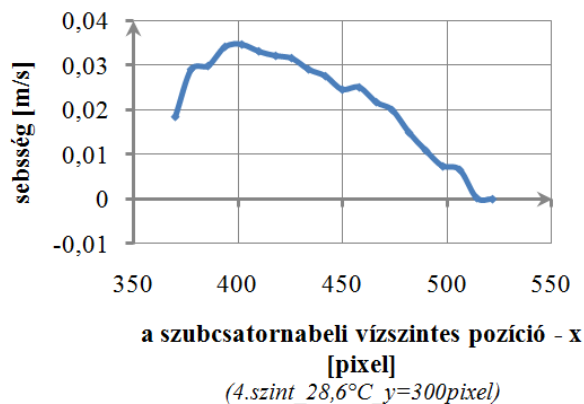
5. diagram:
Jellemző sebességprofil a
fűtött pálcaszakasz mentén



6. diagram:
Egyre növekvő sebesség a
pálcafal mentén

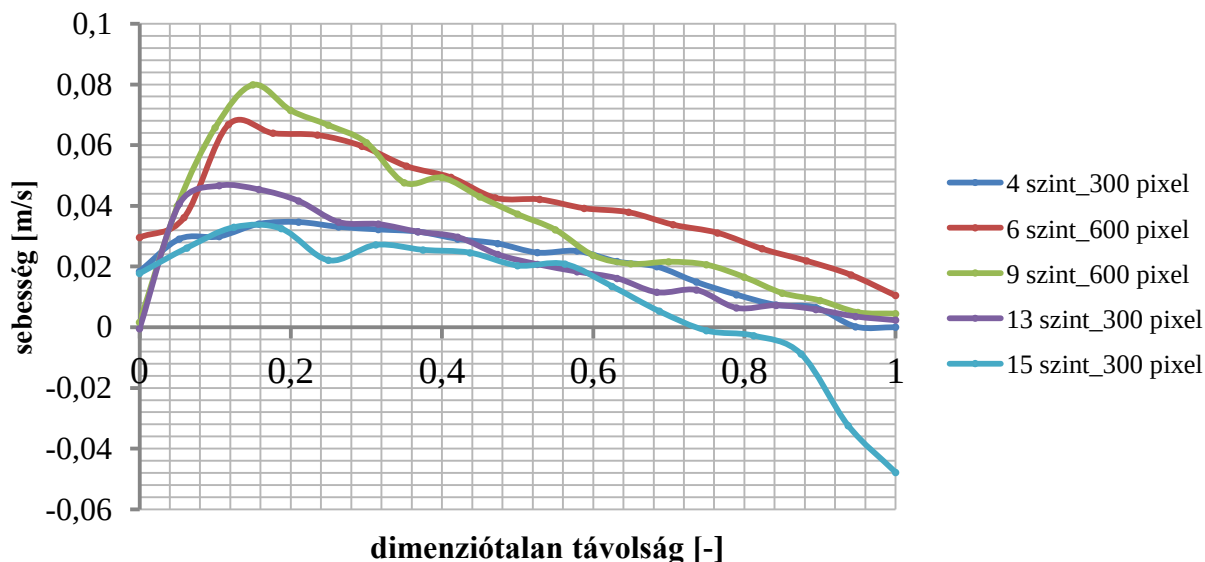


7. diagram
Torzult lamináris
sebességprofil



A sebességprofil alakulását a pálca fala mentén a 8. diagramon úgy is ábrázoltuk, hogy a kamerák mozgásából eredő vízszintes pozícióbeli eltéréseket az x irányú távolság dimenzióatlanításával oldottuk meg, ahol az $x=0$ érték a pálca felületét, míg az $x=1$ az áramlási csatorna belső falát jelzi.

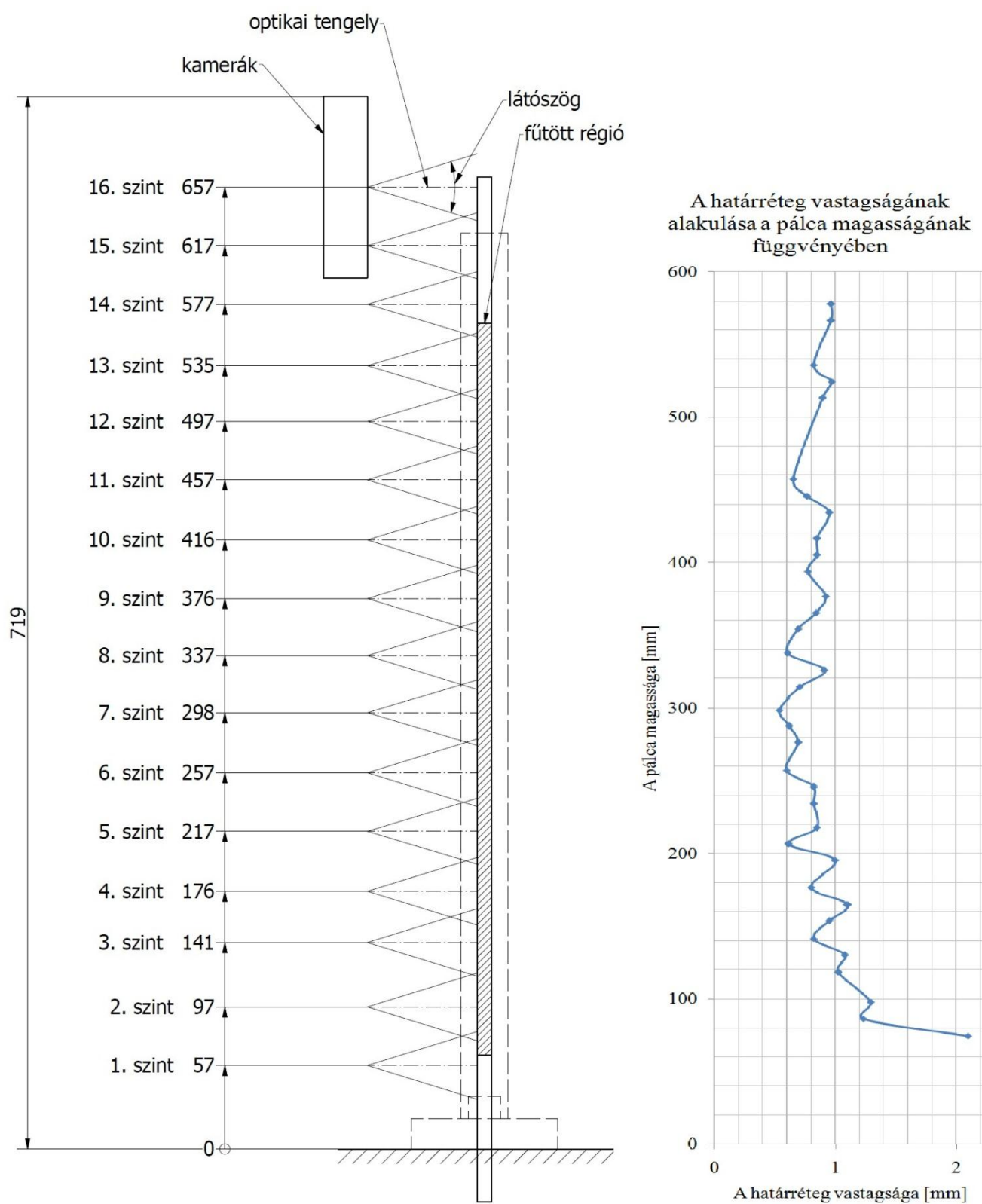
8. diagram:
A sebességprofil változása a pálca fala mentén



A fenti diagramok esetén a már említett okfejtésből kifolyólag a pálca felületének és az áramlási csatorna belső falának elhelyezkedését meg tudjuk határozni. A diagramokon, a fűtőpálca fala mellett felfelé haladva megfigyelhető a hidraulikus határréteg kialakulása is: az áramlási sebesség ezért nem a fal melletti régióban éri el a maximumát, hanem ott jelentősen lecsökken. Ez azzal magyarázható, hogy a tapadás törvénye szerint a szilárd fallal érintkező folyadék sebessége közvetlenül a falnál megegyezik a fal sebességével, hiszen az áramló közeg molekulái rendezetlen mozgásuk során a falnak ütközve felveszik annak sebességét. A fűtőelempálca helyzete rögzített, így esetünkben a fal sebessége zérus. A sebesség ilyen mértékű csökkenését a mérésekkel nem minden esetben sikerült bemutatni, mert az interrogációs területek szélessége a becsült határréteg-vastagság nagyságrendjébe esik. Tudva azt, hogy a csatornán belüli áramlás határolt térben történik, illetve feltételezve, hogy magának a mérésnek a hibája is meghaladja a határréteg számítása során szükséges 1%-os mértéket, az approximációt akként végeztük, hogy megvizsgáltuk adott szinten a falhoz közeli legnagyobb sebességű pont pálcáfaltól vett távolságát. Így az átlagos határréteg vastagsága becslésünk szerint 0,6 és 1 mm között adódott a pálca hossza mentén. Ezen értékek körüli ingadozás szemléltetésére szolgál az 6.2. ábra.

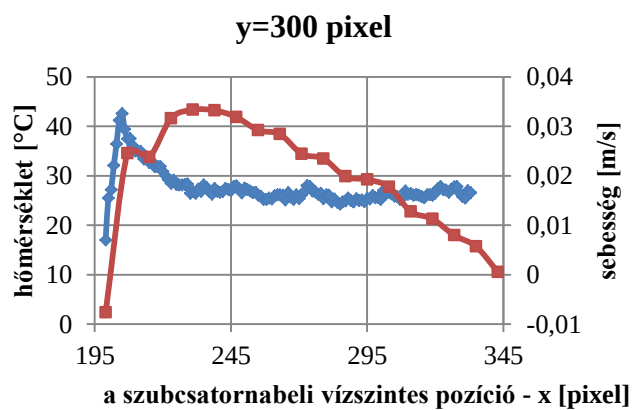
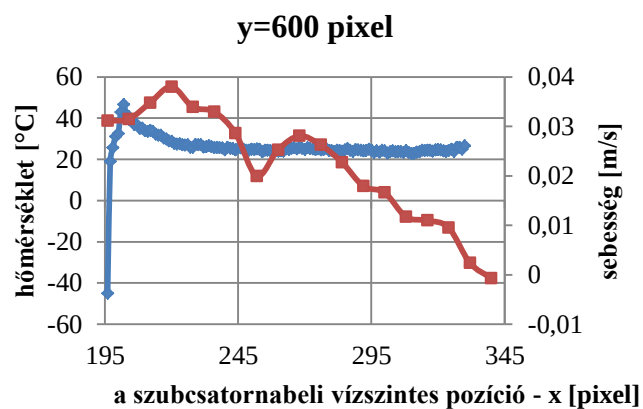
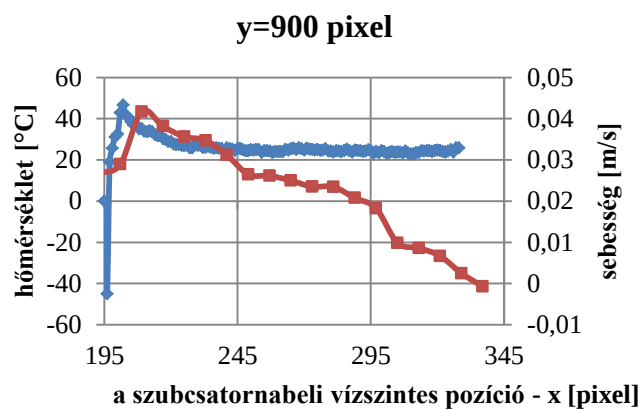
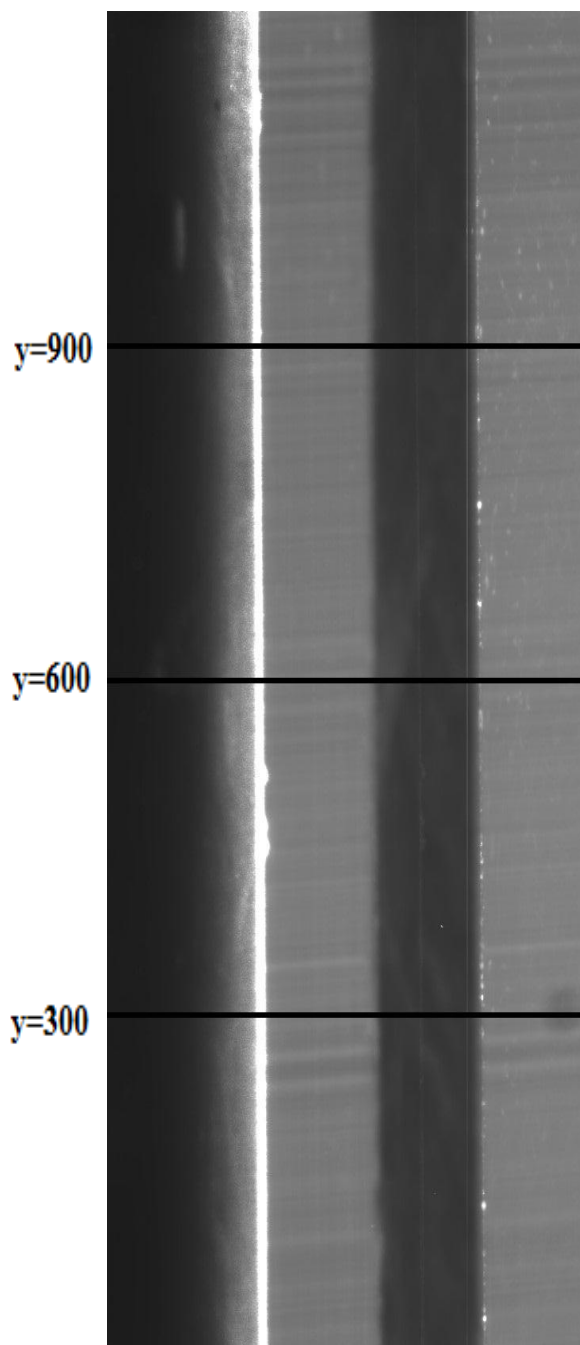
A pálca alsó, 100 mm alatti része esetében a belépésnél kialakult lamináris profil hatását figyelhetjük meg. Ahogy az 1. diagramon is látható, a sebességprofil a maximumát nem a pálca

falához közel éri el, így a számítások nagyobb határréteg vastagságot eredményeznek. Itt természetesen nem beszélhetünk még mérhető hidraulikus határrétegről. A határréteg vastagsága az egyes szinteken, különböző mérési hőmérsékletek mellett felvett sebességterek elemzése során a hőmérséklettől függetlennek adódott. Ennek tudatában az egyes szintek osztósíkjaira jellemző határréteg-vastagságokat az ott – különböző hőmérsékleteken – mért határréteg-vastagságok számtani középértékeként számoltuk. A pálca felső fűtetlen szakasza mellett a határréteg-vastagság ismét növekedni kezd. Ennek oka az, hogy a fal mellett fűtés hiányában már nem kényszeríti semmi a közeg részecskéit nagy sebességű mozgásra, így elkezd visszaállni az alsó fűtetlen szakasz mellett megfigyelhető sebességprofil.



6.2. ábra: A határréteg vastagságának alakulása a magasság függvényében

A sebességtér alakulásának vizsgálatához egyébként a sebességprofilt minden szint esetében három vízszintes osztóvonal mentén ábráztuk adott közeg átlaghőmérsékletek mellett. A vízszintes vonalak a képeken rendre az $y=300$, $y=600$ és $y=900$ pixelértékek mentén helyezkednek el. A hőmérséklet- és sebességteret az adott szinteken jellemző profilokat a 6.3. ábrán látható módon gyűjtöttük ki. Az ábrán feltüntetett profilokat a 4. szinten, $27,4^{\circ}\text{C}$ -os átlagos közeghőmérséklet esetén mért eredmények alapján kaptuk. Látható, hogy a hőmérséklet görbék a pálcához közeli tartományban irreálisan kis hőmérsékletértékeket mutatnak. Ez a pálca feketére festése ellenére is visszaverődő fény eredménye. A pálcafal közvetlen közelében lévő tartományban a fényintenzitás értéke nagyon magas értékeket vesz fel, így a negatív meredekségű hőmérséklet-kalibrációs görbe nagyon alacsony hőmérséklet értékekre extrapolál. Ezeket az adatokat hibás eredményeknek tekintjük.



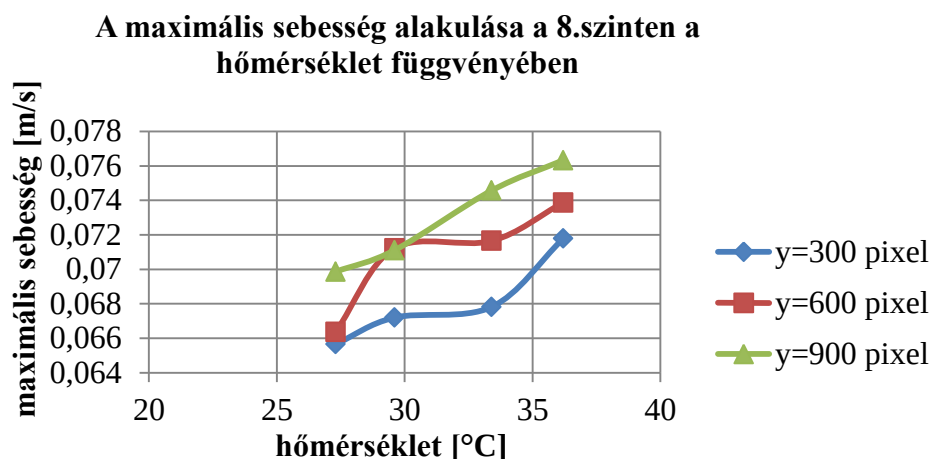
6.3. ábra: A szintek felosztása pixelek szerint és a hozzájuk tartozó hőmérséklet és sebesség diagramok

—♦— hőmérséklet
—■— sebesség

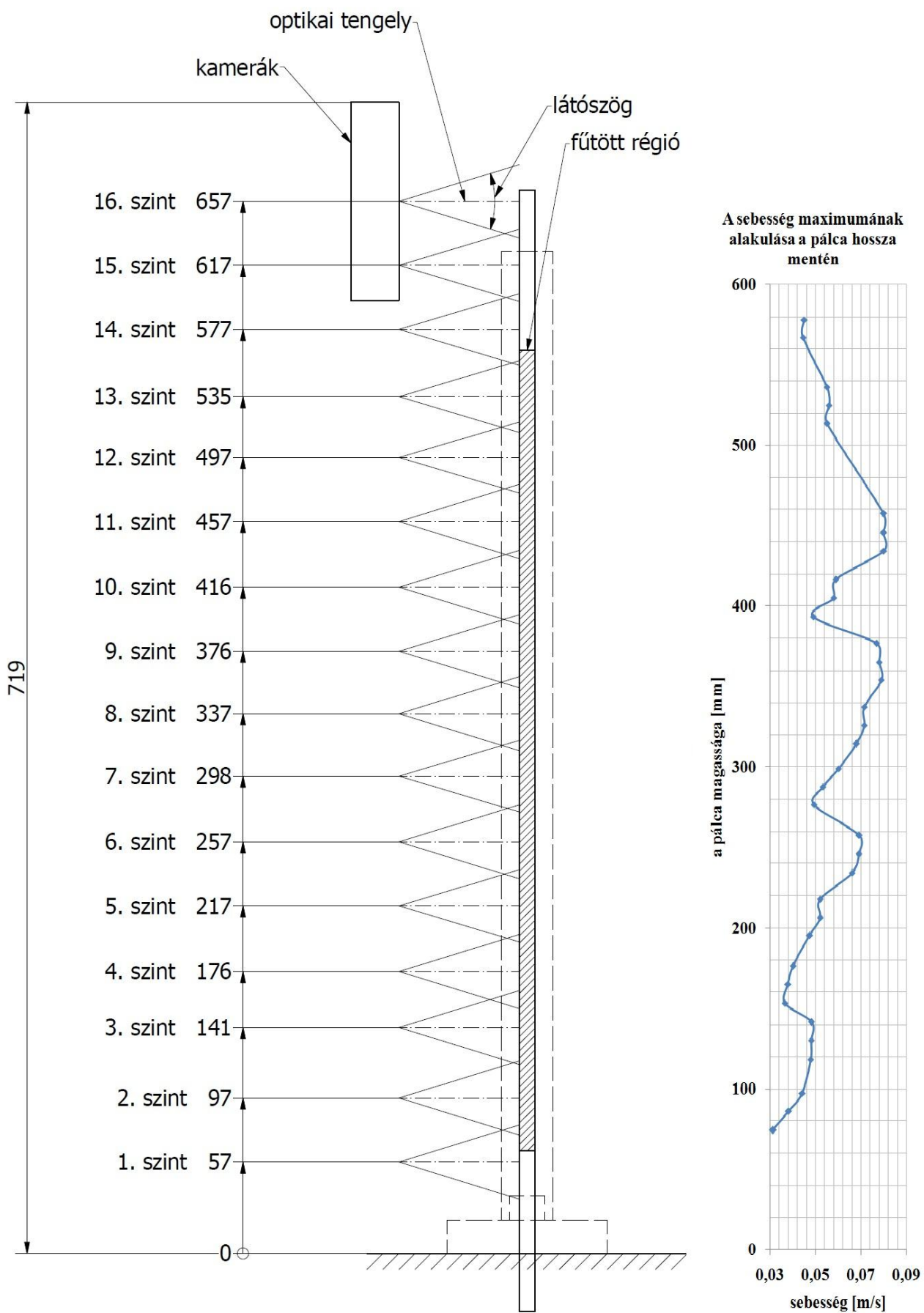
Mivel az adatfeldolgozás során a kiértékelő szoftverben az interrogációs területeket 8x32-es méretűre választottuk, ezért a sebességprofilokat nem tudtuk pontosan a 300, 600 illetve 900 pixeles magasságban ábrázolni. A fentieket figyelembe véve a mérés kiértékelése a 16 szint esetében több mint 300 sebességprofil eredményezett, melyek segítségével meghatározható a maximális sebesség és a közeg átlaghőmérsékletének kapcsolata, illetve a hidraulikus határréteg vastagságának alakulásáról is pontosabb információ nyerhető. Szintenként ennél több vízszintes vonal mentén is meghatározható a sebességprofil, mellyel jobb felbontású elemzés készíthető, de az összefüggések megállapításához és a jelenség hidraulikai tulajdonságainak vizsgálatához a szintenként három sebességprofil is elegendőnek bizonyult.

A maximális sebességértékek és a közeg átlaghőmérsékleteinek felhasználásával megállapítható az adott osztóvonal mentén a $v_{\max}$ hőmérsékletfüggése. Az 9. diagram szemlélteti, hogy az adott magasság szinteken a hőmérséklet növelésével a maximális sebesség értéke is növekvő tendenciát mutat.

9. diagram



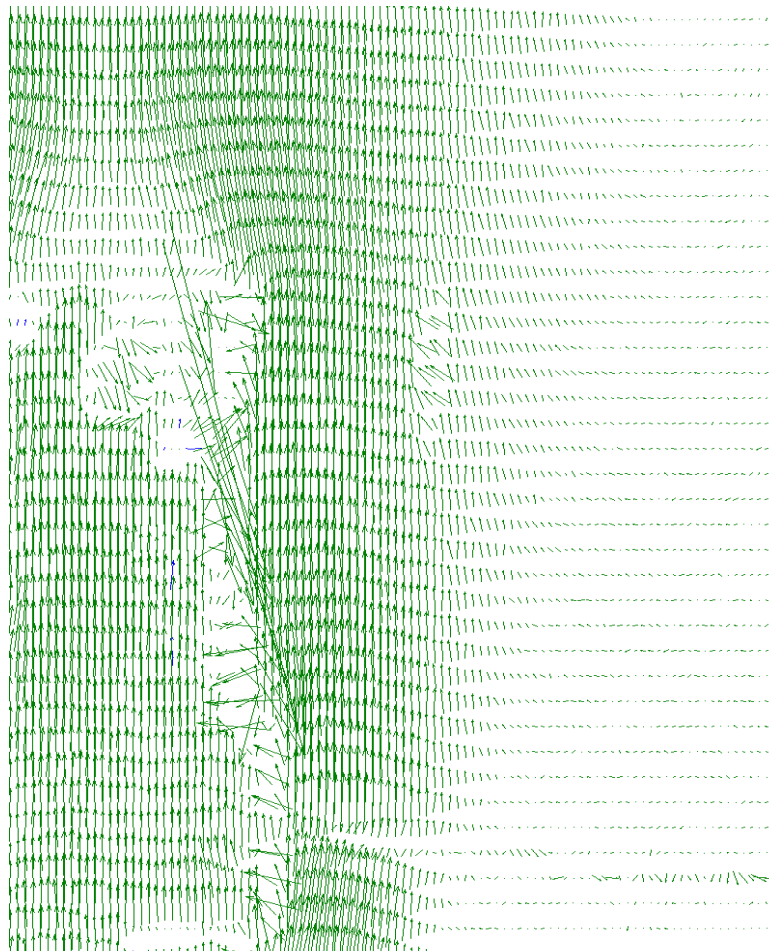
Az egyenletek lineáris interpolációjával meghatároztuk a 30°C-os hőmérsékletéhez tartozó $v_{\max}$ értékeket a pálca teljes hossza mentén, így megkaptuk a $v_{\max}$ magasságtól való függését is. Ezt szemlélteti az 6.4. ábra. Látható, hogy a sebesség maximuma körülbelül a 450 mm-es magasság eléréséig növekvő tendenciát mutat, majd ismét csökkenni kezd. A kezdeti növekedés a folyamatos fűtés következtében egyre melegedő közegre ható növekvő felhajtóerő hatásának tudható be, míg a pálca felső harmadában a sebességmaximum csökkenése egyfajta sebesség-homogenizációként magyarázható. Az 560 mm környékén megszűnő fűtés hatására a közeg sebességeloszlása egyenletesebbé válik a pálca fala és az áramlási csatorna fala által határolt térrészben, így a maximális sebességérték lecsökken.



6.4. ábra: A maximális sebesség alakulása a magasság függvényében

A definiált mérési szinteken meghatározott maximális sebesség, az átlagos közeghőmérséklet és extrapolált pálcafal hőmérséklet segítségével (az utóbbiak meghatározásának módját az 6.2. fejezet során részletesen taglaljuk) az (6.1) *egyenlet* segítségével a Ra-számot kiszámoltuk. Az így kapott értékek – bár jelentősen szórtak – 10^4 és 10^5 nagyságrendűek voltak. Így végezetül azt is sikerült megállapítani, hogy a fejezet elején említett feltételekből következően, a pálca teljes hossza mentén lamináris áramlásról beszélhetünk.

A fejezet lezárásaként a PIV méréstechnikával készült felvételekből a Dynamic Studio 3.0 program segítségével meghatározott pálca melletti sebességmezőket szemléltetjük, mely ábrákon a vektorok hossza arányos a sebesség nagyságával, továbbá a részecskék mozgásának iránya is jól érzékelhető. Jól megfigyelhető az is, hogy ahol a felületre felvitt festés részleges kopása, illetve a távtartó zavaró hatása miatt a részecskék követése nem vált lehetővé, ott a kiértékelés során érvénytelen adatokként kezelt vektorok hiányában a sebességmező nem tartalmaz vektorokat, esetenként pedig téves értékeket mutat.



6.5. ábra: A 16. szint sebességeloszlása – a csatornából való kilépés

6.2. A LIF mérés eredményei

A LIF mérés célja a hőmérsékletmező ismerete alapján az α konvektív hőátadási tényező meghatározása volt. A számításunk során a Newton-féle lehülési törvény összefüggésével számoltunk:

$$\dot{q}'' = \alpha \cdot (T_w - T_\infty) \quad (6.2)$$

Az egyenlet az általunk vizsgált fizikai jelenség vizsgálatára alkalmasnak bizonyult, hiszen a fűtőelem-pálca fajlagos felületi hőteljesítmény-sűrűsége a pálca 500W-os teljesítményének ismeretében számolható. A pálca 500W teljesítményét az aktív hosszának felületével osztjuk, megkapjuk, hogy a felületi hőteljesítmény-sűrűség:

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{A} = \frac{\dot{q}}{l_{aktív} d \pi} = \frac{500W}{0,5m \cdot 0,001m \cdot \pi} = 31831 \frac{W}{m^2} \quad (6.3)$$

Számításaink során $\dot{q}'' = 31800 \frac{W}{m^2}$, kerekített értékkel számoltunk.

Az általunk lement hőmérséklettérkép alapján T_∞ (távoli közeg átlagos hőmérséklete) értékét az egyes szinteken a hőmérsékletprofil felvételét követően jó közelítéssel meghatározhattuk, hiszen a 6.3. ábrán is látható módon a pálcától távoli tartományban a hőmérséklet egy állandósult értékre áll be. A görbe maximumának és a pálcával pontos elhelyezkedésének ismeretében jó becslést adhattunk a T_w falhőmérsékletre is. A hőmérsékletterek meghatározása a 5.2. Kalibráció című fejezetben leírt kalib_bt nevű programmal történt, a hőmérséklet-kalibrációs fájlok segítségével a mérés során készített szürkeintenzitás fájlokból. A kiértékeléshez a 190 kép átlagát használtuk fel, hogy a PIV mérés miatt a vízhez adagolt poliamid szemcséken szóródó fény ne jelenhessen meg a szürkeintenzitás-mezőkben – ezen a módon csökkentettük a térbeli zajokat [22].

A hőmérsékletprofilokat a sebességprofilokkal analóg módon és azonos magasságokban határoztuk meg. Az adott magasságon kapott $T(x)$ függvények függenek a közeg hőmérsékletétől és a mérés beállításaitól is. A mérési összeállítást javító intézkedések ellenére a lézernyaláb pálcával való szóródása megnehezítheti a falhoz közeli tartományban a hőmérséklet pontos mérését. Ennek köszönhetően a fenti összefüggés alkalmazásával pontatlanabb hőátadási tényező értékeket kaptunk.

A pálca pontos vízszintes pozíciója illetve a pálca fala és a plexi áramlási csatorna fala közötti mérési eredményekből származó hőmérsékletprofil minden felvétel esetén ismert. Így az adott szinteken a maximális hőmérséklet érték vízszintes pozíciója és a fűtőelem-pálca-modell falának elhelyezkedéséből a köztük lévő vízszintes irányú eltérés kiszámítható. A becsült falhőmérsékletet ez alapján a mért hőmérsékleti pontokra illesztett görbe extrapolációjával

határoztuk meg. A görbe illesztését a legkisebb négyzetek módszerével végeztük. Feltételeztük, hogy a hőmérséklet és az x értékek között exponenciális összefüggés áll fenn, majd becslést adtunk a $T_0 e^{-\frac{x-x_0}{\tau}} + b$ alakú függvény T_0 , x_0 , τ és b változóira. A Microsoft Office Excel program Solver makrójának segítségével a mért adatpontokra az együtthatók változtatásával illesztettünk görbét, úgy, hogy a mért pontok és a görbe által meghatározott pontok közötti különbség négyzete minimális legyen. A pálca külső falának x pozícióját a függvénybe helyettesítve megkaptuk a fal hőmérsékletét, majd ugyancsak a Newton-összefüggés segítségével kiszámítottuk a konvektív hőátadási tényező értékeit. A mérési pontokra illesztett görbe alakja megfelel a fizikai képünknek, hasonló geometria numerikus szimulációja is ilyen menetű görbét eredményezett [25] [14].

Az illesztés során mindig megvizsgáltuk, hogy vízszintesen hol helyezkedik el a pálca, a pálca melletti körülbelül 5 pixelnyi hőmérséklet adatot, melyek a pálca felületéről visszaverődő fény okozta nagy intenzitás értékek miatt irreálisak, hibásnak tekinthetők, a fenti függvénnyel újra becsültük. Továbbá azokat a pixelértékeket is figyelmen kívül hagytuk az illesztés során, melynél nagyobb értékek esetén a hőmérséklet a mért adatok alapján állandósult értéket vett fel, ami már a hőátadási folyamat szempontjából nem releváns. A görbék illesztését minden szint esetén így végeztük el.

Az így kapott falhőmérsékletekkel az alábbi – 8. szintre vonatkozó – II. táblázatban szemléltetett módon határoztuk meg a konvektív hőátadási tényező értékeit.

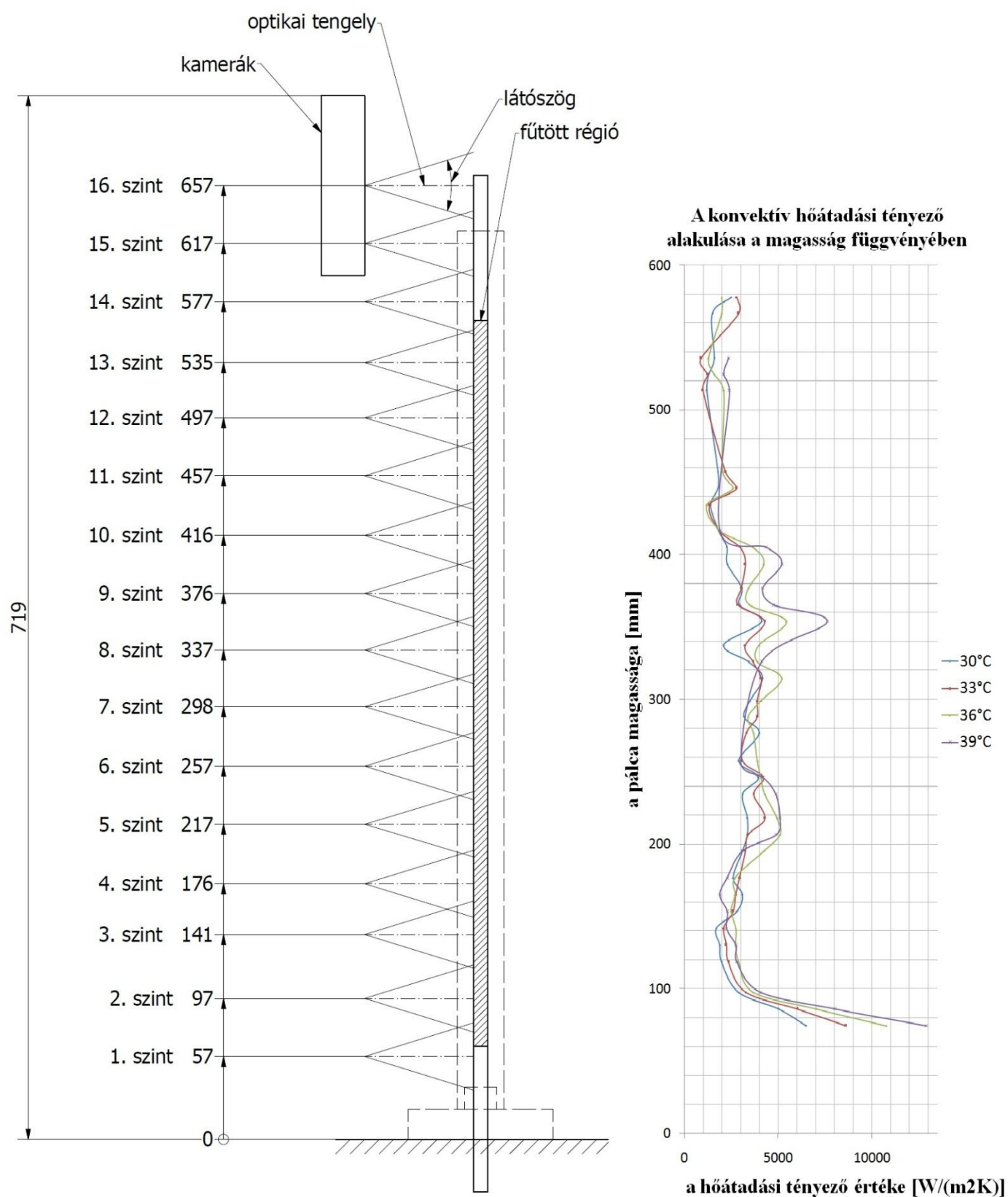
II. TÁBLÁZAT

A 8. szinten különböző hőmérsékletértékek és magasság mellett a hőátadási tényező számítása						
Hőmérséklet értékek	Magasság (pixel)	Magasság (cm)	T_{fal} (°C)	$T_{közeg}$ (°C)	Pálcateljesítmény (W/m ²)	Hőátadási tényező (W/(m ² K))
27,3	y=300	31,439	39,07	24,98	31800	2256,92
	y=600	32,594	36,3	26,06	31800	3105,47
	y=900	33,749	38,12	24,19	31800	2282,84
29,6	y=300	31,439	35,46	27,93	31800	4223,11
	y=600	32,594	37,61	28,61	31800	3533,33
	y=900	33,749	42,78	26,68	31800	1975,16
33,4	y=300	31,439	40,62	33,24	31800	4308,94
	y=600	32,594	41,65	33,2	31800	3763,31
	y=900	33,749	41,22	32,49	31800	3642,61
36,2	y=300	31,439	43,06	37,19	31800	5417,38
	y=600	32,594	44,05	35,75	31800	3831,33
	y=900	33,749	43,62	35,81	31800	4071,70

Egy szinten több közeghőmérséklet mellett végeztünk méréseket, ezért a hőátadási tényező hőmérsékletfüggése is meghatározható volt, hasonlóan, mint a közeg maximális sebességének hőmérsékletfüggése is a sebességterek kiértékelése folyamán. A kapott pontokra függvényt illesztünk, és meghatározzuk a 30, 33, 36, 39°C-hoz tartozó értékeket. Az így kapott lokális α értékek segítségével meghatároztuk a pálca mentén a hőátadási tényező változását a magasság és a hőmérséklet függvényében, amit a 6.6. ábra is szemléltet.

A diagramról leolvasható, hogy a hőátadási tényező a 2011-es mérés során is eredményként kapott 2000-4000 W/m²K környékén alakul, értéke a közeghőmérséklet változásától nagyjából független. A 39°C-os közeghőmérsékletnél 354 mm-es magasságon (9. szint, y=300 osztóvonal) megfigyelhető kiugrást valószínűleg egy hibásan mért érték vagy a pálca nem egyenletes felületi hőtéljesítménye okozza. Ennek későbbi tisztázása lényeges, hiszen a hőátadási tényezők számításánál állandó felületi hőfluxust tételeztünk fel. Ha ez nem teljesül, az a mérési eredmények pontatlanságát eredményezi. A későbbiekben javaslatot teszünk e probléma méréstechnikai megoldására.

Az alsó tartományban a görbe elszáll, ennek az a magyarázata, hogy az áramlási csatorna alja felől érkező közeg a pálca mellett is hideg, így a fűtött felületet sokkal hatásosabban hűti le. Ennek eredményeképpen az 6.2 egyenlet jobb oldalán lévő hőmérsékletkülönbség sokkal kisebb, mint a pálca felsőbb régiói mentén, így a hőátadási tényező értéke megnő. A hőmérsékletkülönbség növekedésével azonban a hőátadási tényező értéke is csökken – az 500 mm-es magasság környékén az α már csak 1500-2000 W/m²K környékén mozog.

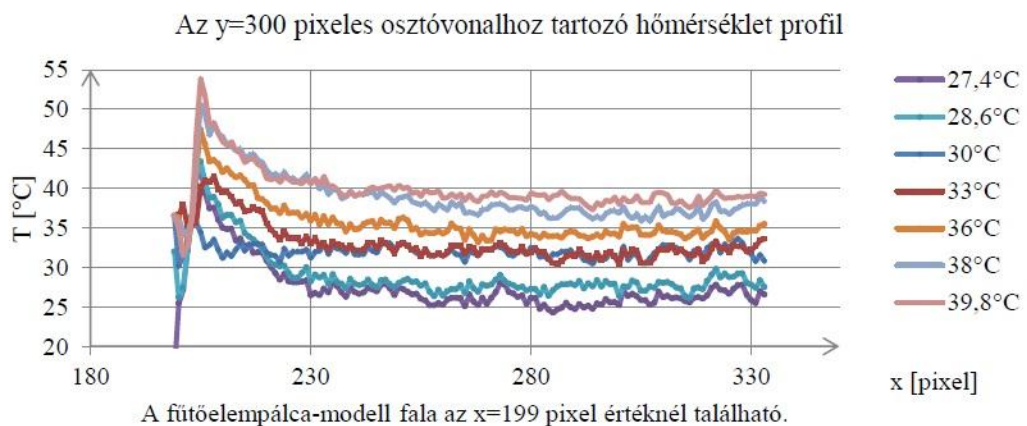
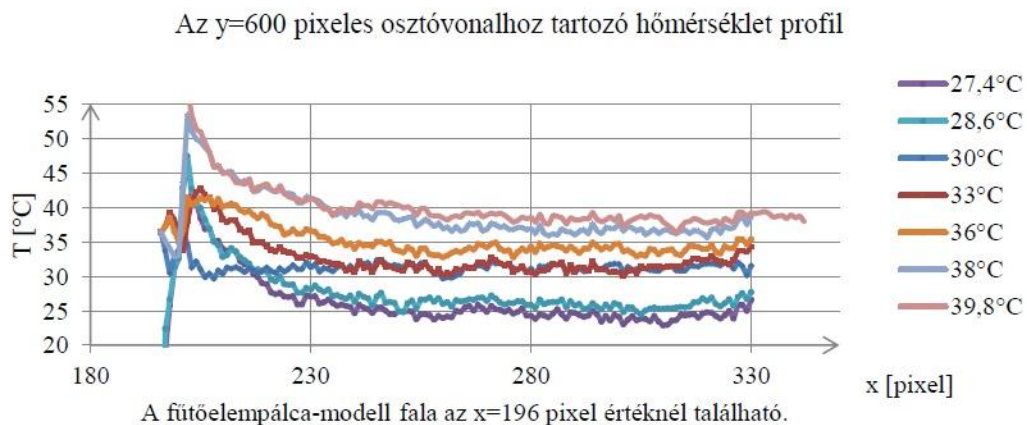
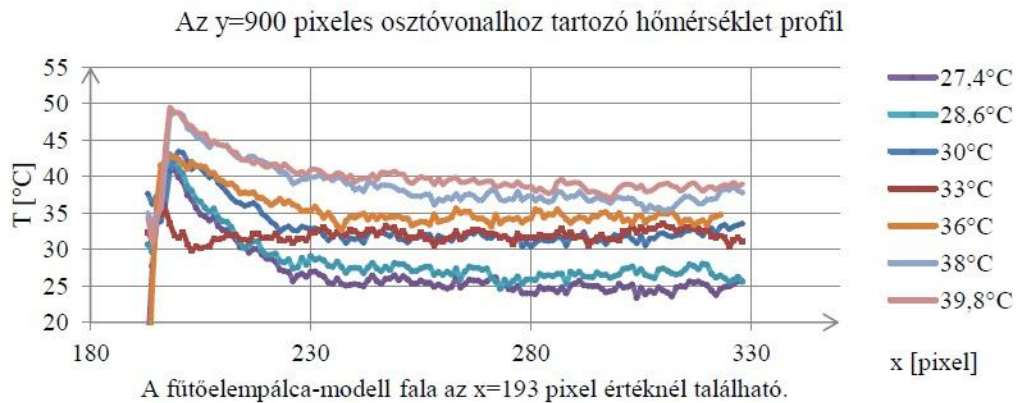


6.6. ábra: A lokális hőátadási tényező alakulása a magasság függvényében különböző átlagos közeghőmérsékletek mellett

A 10. diagramsorozaton a 4. szinten, három különböző magasságban mérhető hőmérsékletprofilokat ábrázoltuk. A bal oldalon látható meredek hőmérséklet-növekedés utal arra, hogy a pálca felmelegíti a falhoz közeli régióban a vizet. A fal közvetlen közelében tapasztalható nagyon negatív hőmérséklet-értékek a már diszkutált hatásoknak köszönhető.

10. diagramsorozat

A 4. szint különböző magasságaihoz és átlagos közeghőmérséklethez tartozó hőmérséklet-profilok

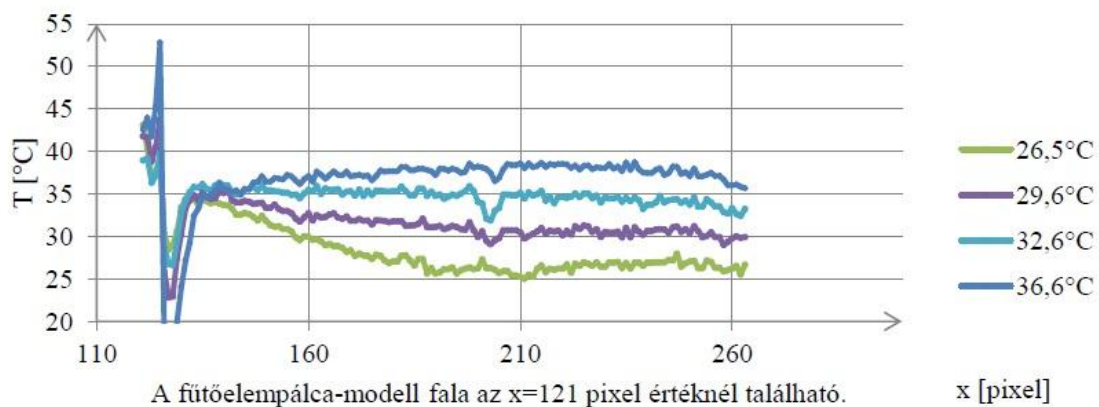


A görbék a pálca szélétől kezdve ábrázoltuk, így jól megfigyelhető a fent leírt jelenséghatása, amely a fűtött fal mellett a hőmérsékletmérést torzítja. Látható, hogy a sebességméréssel ellentétben értelmezhető a faltól távoli közeg hőmérséklete. A PIV mérésnél ugyanis a szűk áramlási csatorna megakadályozza a határolatlan térben történő áramlásra jellemző, faltól távoli egyenletes sebességtér kialakulását.

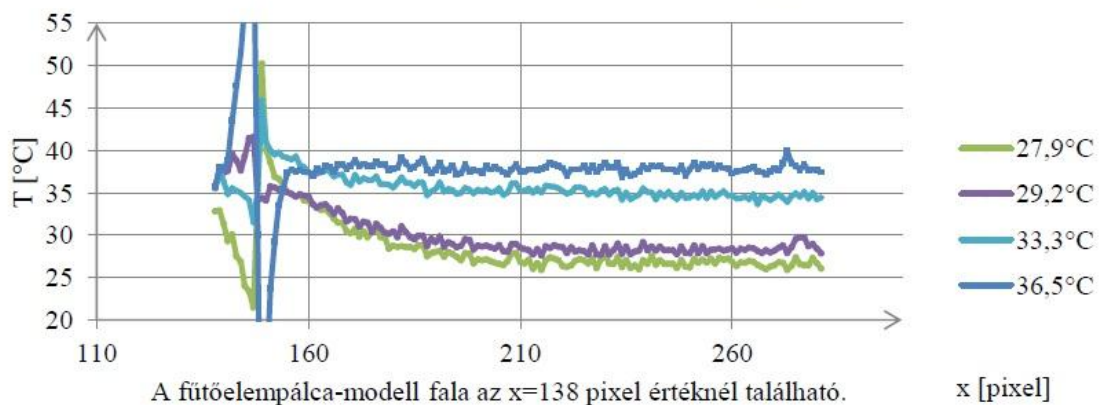
11. diagramsorozat

A fűtés megszűnése a felső szakaszok mentén

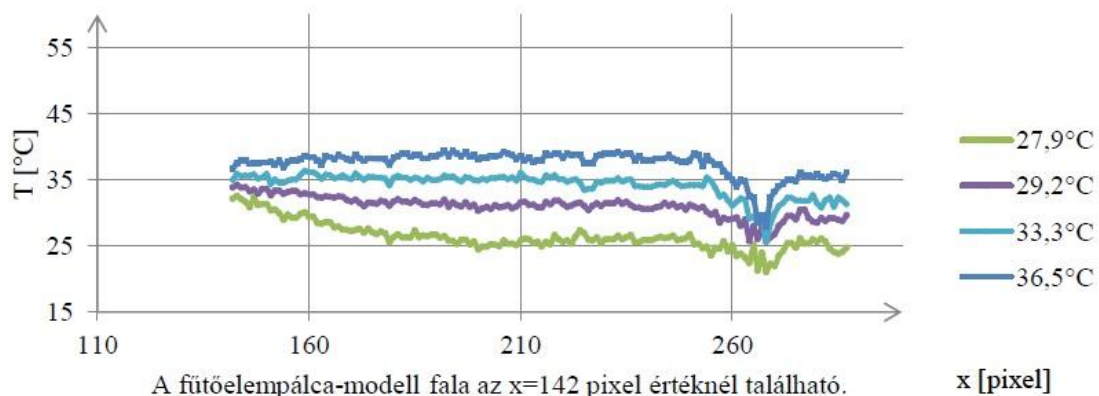
Az $y=300$ pixeles osztóvonalhoz tartozó hőmérséklet profil (15. szint)



Az $y=900$ pixeles osztóvonalhoz tartozó hőmérséklet profil (14.szint)



Az $y=600$ pixeles osztóvonalhoz tartozó hőmérséklet profil (14.szint)

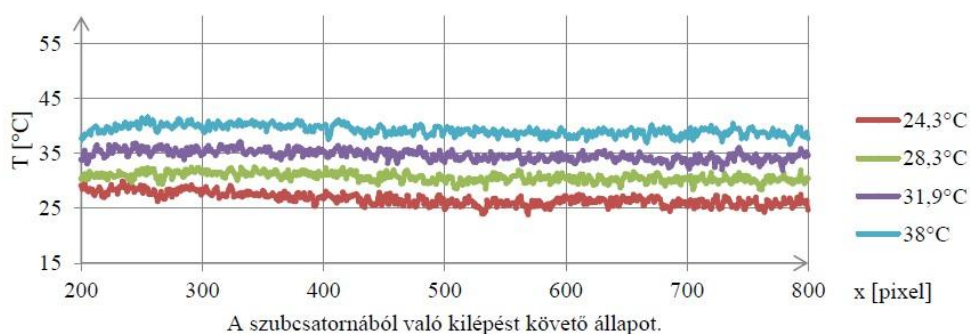


A 11. *diagramsorozat* a pálcza felső része melletti tartomány hőmérsékletprofiljait ábrázoltuk. A diagramsorozaton jól megfigyelhető, ahogy a felső fűtetlen pálczaszakasz mellé érünk, az áramló közeg hőmérséklete fokozatosan lecsökken és a 10. diagramsorozaton megfigyelhető jellegzetes hőmérsékletprofil megváltozik. A pálcza jó hővezető anyagból készült, tehát a fűtött szakasz elhagyása után, de annak közvetlen közelében még melegebb a pálcza felülete, mint a fűtött szakasztól távol. Ennek következtében az alacsony hőmérsékletű vizet még melegíti, miközben a melegebbet már hűti a pálcza fala.

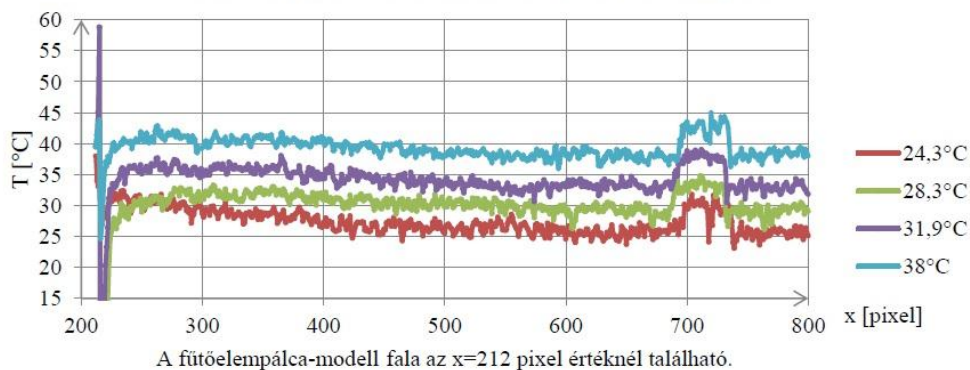
12. diagramsorozat

Az áramlási csatornából történő kilépést követően a hőmérsékletprofilok alakulása

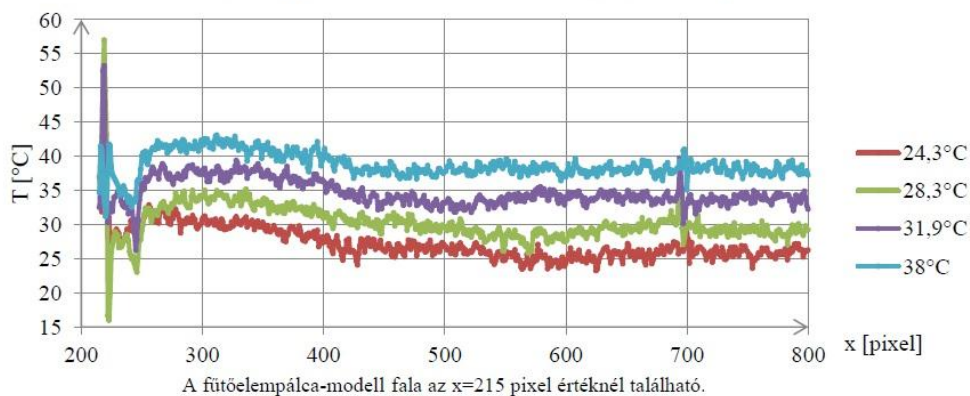
Az $y=900$ pixeles osztóvonalhoz tartozó hőmérséklet profil



Az $y=600$ pixeles osztóvonalhoz tartozó hőmérséklet profil

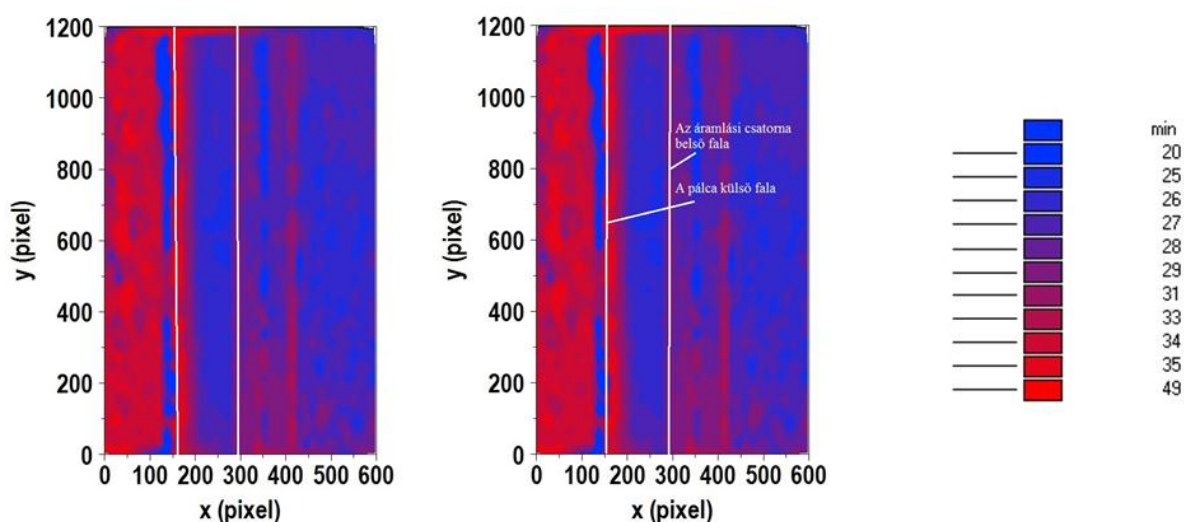


Az $y=300$ pixeles osztóvonalhoz tartozó hőmérséklet profil



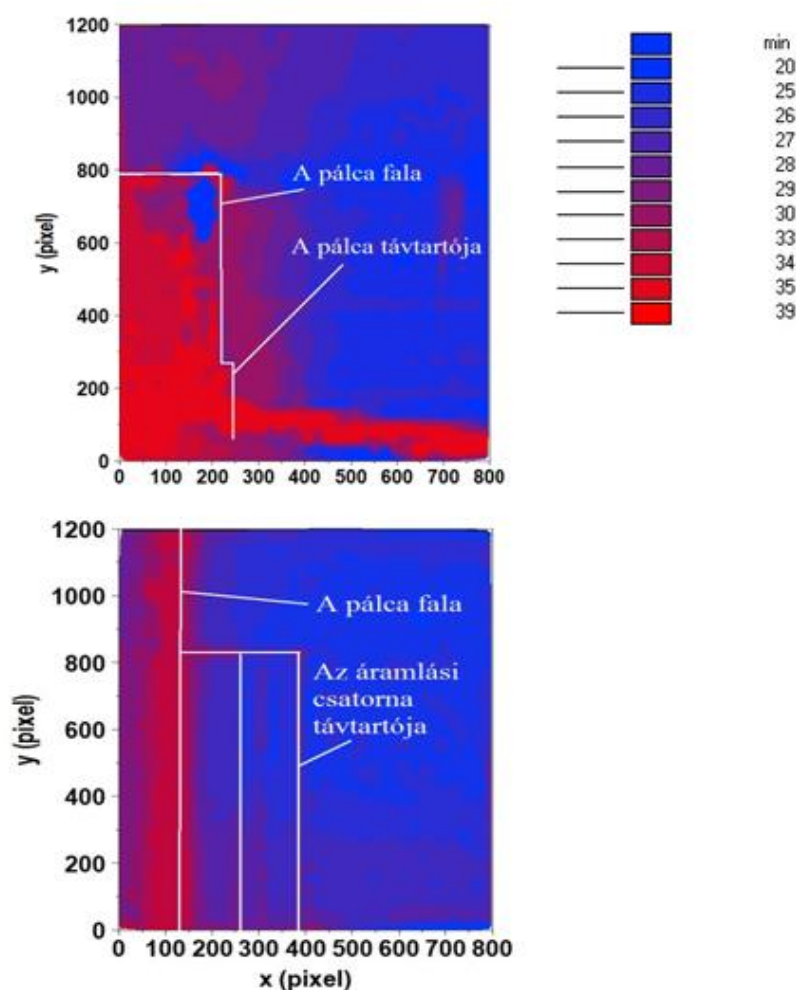
A 12. *diagramsorozat* az áramlási csatornát elhagyó közeg hőmérséklet-profiljait szemlélteti, mely szakaszok a 15. és 16. mérési szint tartományába esnek. A felfelé áramló közeg szabadsugárként viselkedve kilép a hideg, nyugvó közegbe, azzal keveredik, és közben mind sebességéből, mind hőmérsékletéből veszít. A diagramokon megfigyelhető a szabadsugárra jellemző profil kialakulása is, miközben a hideg közegtől való hőmérséklet-eltérés fokozatosan csökken.

A hőmérsékletmező alakulását a LIF méréstechnikával mért eredmények alapján az UniPlot 5.12.0 háromdimenziós függvényábrázoló program segítségével ábrázoltuk. Az 6.7. *ábrán* a hetedik mérési szinten, tehát a pálca fűtött szakasza mellett kialakuló hőmérsékletmező látható. A fűtött pálca belső falát illetve az áramlási csatorna külső falát az ábrákon fehér, függőleges vonalakkal jelöltük. Kitűnően megfigyelhető a pálca mellett kialakuló hőmérsékleti határréteg, vastagságának meghatározása azonban a mérés bizonytalansága miatt nehezen kivitelezhető. Szintén látható, hogy a határrétegtől távolodva a közeg hőmérséklete nagyjából állandó, így a T_∞ hőmérséklet értelmezhetővé válik, ahogy ezt már az 6.2 *fejezet* során már tárgyaltuk.



6.7. ábra: A 7. szinten kialakult hőmérséklet-mező

A fűtőpálca melletti kiáramlást látványosan szemlélteti az alábbi ábrasorozat:



6.8. ábra: A kilépési tartományt jellemző hőmérsékleti rétegződés

Az 6.8. ábrán érdemes megfigyelni az áramlási csatorna, majd a pálea megszűnésének hatását. A maximális hőmérséklet a 12. diagramsorozaton is megfigyelhető módon csökken (felső kép), miközben a hideg közeggel keveredik.

6.3. A mért eredmények és egy számítási modell közti korreláció vizsgálata

Mérésünk során a fűtőelem köré helyezett csatornában a fűtés hatására felfelé áramló közeget vizsgáltunk. Az átvitt hő hatására kialakuló sűrűségkülönbség következtében természetes áramlás indult meg a függőleges csatornában. A természetes áramlás során kialakuló, a LIF mérés technika segítségével megvizsgált hőmérséklet-eloszlásból lokális hőátadási tényező értékeket számoltunk több mint negyven definiált pálcamagasság, illetve adott magasságon több átlagos

közeghőmérséklet mellett. Az 6.6. ábrán szemléltetett mérési eredményként kapott értékeket számítási modellel is összehasonlítottuk, melynek tanulságait ismertetjük az alábbi fejezetben.

Elsőként a hőátadási folyamat hasonlósági kritériumának, a Nusselt-számnak (Nu-szám)² a számítására kerestünk adott geometriára és fizikai folyamatra illeszthető modellt. A VDI Heat Atlas-ban talált modell alapján az (6.5.a.), (6.5.b) egyenletek és a III. táblázat segítségével az összes definiált pálcamagasságnál kiszámítottuk a Nu-szám értékét [26].

$$Nu_s = \frac{C_1 Gr_s Pr \left(\frac{h}{s}\right)^2}{C_2 \left(\frac{h}{r_a}\right)^4 \left(\frac{r_i}{h}\right) + \left[Gr_s Pr \left(\frac{h}{s}\right)^3\right]^{n_1} \left(\frac{r_i}{h}\right)^{n_2}} \quad (6.5.a)$$

A fenti egyenletben C_1 , C_2 , n_1 és n_2 értékeket az alábbi segédparaméter kiértékelését követően a III. táblázatból állapítottuk meg.

$$N = \left[Gr_s Pr \left(\frac{h}{s}\right)^4\right]^{-0,25} \left(\frac{h}{r_i}\right) \quad (6.5.b)$$

III. TÁBLÁZAT

	C_1	C_2	n_1	n_2
$N < 0,2$	0,48	854	0,75	0
$0,2 < N < 1,48$	0,93	1646	0,84	0,36
$1,48 < N$	0,49	862	0,95	0,8

A fenti egyenletekben:

- $Gr_s = \frac{s^3 \beta g (T_w - T_\infty)}{\nu^2}$: Grasshoff-szám [-]
- s : a geometriára jellemző méret (esetünkben az áramlási csatorna belső fala és a pálca felülete közti távolság) [m]
- Pr : a közeg mértékadó hőmérsékleten vett Prandl-száma [-]
- ν : a közeg mértékadó hőmérsékleten vett kinematikai viszkozitása [m^2/s]
- g : a gravitációs gyorsulás [m/s^2]
- β : a közeg mértékadó hőmérsékleten vett térfogati hőtágulási együtthatója [$1/K$]
- h : a pálca magassága [m]
- r_i : a pálca sugara [m]
- r_a : a négyzet keresztmetszetű áramlási csatorna egyenértékű átmérőjéből kalkulált sugár [m]³
- T_w : a pálcafal hőmérséklete [$^\circ C$]
- T_∞ : a közeg hőmérséklete [$^\circ C$]

² A Nu-szám a Newton-féle lehűlési egyenlet dimenzióalanítása során kapott hasonlósági szám.

³ Négyzet keresztmetszetű csatornák egyenértékű átmérője megegyezik a csatorna oldalának a hosszával.

A számításhoz az általunk extrapolált fal- és megállapított átlagos közeghőmérséklet értékeket használtuk fel, melyek átlaga szolgált alapul az áramló közegek anyagjellemzőinek meghatározásakor is. Ehhez a műszaki hőtan tanulmányaink során alkalmazott segédletben megtalálható, víznek egy bar nyomáson meghatározott anyagjellemzőit összefoglaló táblázatot vettük segítségül [27]. Az általunk mért hőmérsékletekhez tartozó értékek meghatározásához azonban interpolációra volt szükség. Az említett táblázatot a Microsoft Office Excel programba importálva egy automatikusan interpoláló munkalapot szerkesztettünk, amely az összes szinten, az adott mértékadó hőmérséklethez tartozó anyagjellemző értéket kigyűjtötte. Az (6.5.b.) egyenlet által megadott N értékek számolását is programoztuk, így a Nu-szám kalkulációja is lényegesen leegyszerűsödött.

Miután a Nu-szám értékeit megkaptuk, a mértékadó hőmérsékleten vett hővezetési tényező és a jellemző méret segítségével a hőátadás tényező értéke is számítható volt az (6.6.) összefüggés alapján.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot s}{\lambda} \quad (6.6)$$

A végeredményül kapott konvektív hőátadási tényező értékek segítségével az átlagos közeghőmérséklet ismeretében a pálca falának hőmérsékletét az (6.2.) összefüggés segítségével visszaszámoltuk. A kapott értékek eltérése miatt iterációt hajtottunk végre. Az iterációs folyamat eredményeképp a pálcafal átlagos hőmérséklete 90°C körül, a konvektív hőátadási tényező értéke pedig 200 és 300 W/(m²K) értékek között adódott. A pálca falának a számítás során kapott hőmérséklete a valóságos 45-55°C-os értéktől nagyban eltért. Az utóbbi értékekre egy közelítő becslést termoelemek segítségével végzett mérést követően adtunk. A számítással kapott hőátadási tényező értékek pedig egy nagyságrenddel eltértek az általunk és a 2011-ben [1] kapott értékektől is. Az általunk végzett pálcafal-hőmérséklet extrapoláció lényegesen közelebbi értékeket adott az ellenőrző mérés során kapott közelítő hőmérséklet értékekhez, így az általunk számított nagyságrendű hőátadási tényező értéket fogadtuk el helyesnek.

Ezen számítási modell alkalmazását tehát nem javasoljuk az általunk mért geometria esetén hőátadási tényező meghatározására, hiszen nukleáris biztonság szempontjából hiába becsül kedvezőtlenebb eseteket, vagyis konzervatívabbnak mondható, jelentősen torzít, vagyis hamis képet ad a valóságról.

KONKLÚZIÓ

Dolgozatunk célja Szijártó Rita 2011-ben elvégzett mérésének reprodukciója, illetve a mérési összeállítás továbbfejlesztésével történő pontosabb paramétervizsgálat volt. A méréssorozatot olyan szemléletmódban hajtottuk végre, hogy a 2011-ben mért adatok megerősítése mellett a bizonytalanságok csökkentésével, részletesebb és átfogóbb vizsgálattal a hőmérséklet- és sebességtér több változótól való függését detektálni tudjuk.

Az általunk végzett méréssorozat aprólékossága miatt több mint egy szemeszternyi elfoglaltságot jelentett mindkettőnk számára. A mérőberendezések pozicionálása, az adatrögzítő számítógép kezelése és a kalibrációs folyamat csaknem egyidejű végrehajtása precizitást, odafigyelést igénylő munka, melynek egy személyben történő elvégzése jelentős hibaforrást jelenthet.

Amellett, hogy megerősítettük a 2011-ben elvégzett mérés eredményeit, a folyamat reprodukálhatóságát is sikeresen alátámasztottuk. A mérési hibák csökkentésének céljából – a kezdetben tapasztalt zavaró tényezők kiküszöbölése végett – a fűtőpálca, illetve a távtartók feketére festésére is sor került. Ezáltal a lézerfény tükröződése minimálissá vált, így lehetővé vált a pálca melletti régió precízebb mérése, illetve kiértékelése. Emellett a tartály falát a környezetből besűrűdő fény elleni védelem érdekében fekete karton lapokkal fedtük le, amely ugyancsak hozzájárult a mérési eredmények pontosságának növeléséhez.

A fűtőpálca teljes hossza melletti tartomány detektálására sor került, ami megengedte a magasságfüggő paraméterek alakulásának alaposabb tanulmányozását. A 2011-ben végzett mérés hét definiált szinten történt, ezzel szemben mi 16 szintet vizsgáltunk. Ezáltal valóban teljessé vált az Oktatóreaktor fűtőelempálca-modelljének egész hossza mentén kialakuló áramlási és hőmérsékleti tér vizsgálata. Mind a 16 szinten négy-öt különböző közeghőmérsékleten végeztünk méréseket, így a vizsgált paraméterek közeghőmérséklettől való függését is elemezni tudtuk.

A mért adatok feldolgozása és kiértékelése során számos, a releváns szakirodalmakban fellelhető hibacsökkentő eljárást alkalmaztunk. Minden szinten és minden hőmérsékleti érték mellett 200 darab felvételt készítettünk, melyeket átlagolva pontosabb értékekhez jutottunk, illetve az interrogációs területek méreteit is optimalizáltuk.

Méréssorozatunk legfontosabb eredménye többek között az, hogy a fűtőpálca mellett, több mint 40 különböző magasságban meghatároztuk a sebességprofil áramlási csatornán belüli alakulását. Ezáltal szemléltethetővé vált a pálca fűtöttségének hatása a sebességprofil alakjának változására, az áramlási csatornán belüli maximális sebesség, illetve a hidraulikus határréteg vastagságának magasságfüggése. Megállapítottuk azt is, hogy a csatornában nem történt átmenet

lamináris áramlásból turbulensbe. A Dynamic Studio 3.0 program segítségével a felfelé áramló közeg áramlási csatornában kialakuló sebességmezejét is szemléltetni tudtuk, amely a fizikai folyamat teljesebb megértéséhez is hozzájárul.

A LIF mérés eredményei által pontosításra kerültek a lokális konvektív hőátadási tényező értékei több mint 40 szinten, mely következtében jobb felbontásban vizsgálhattuk a fűtőpálca és a csatornában áramló közeg közötti hőátadás magasságtól és közeghőmérséklettől való függését. Eredményeink megerősítették a 2011-ben elvégzett méréssorozat során kapott értékek nagyságrendjének helyességét, a hasonlósági elméletre alapozva végzett számításaink során azonban jóval kisebb értékeket kaptunk. Az eltérést tapasztalva megállapítottuk, hogy a számítási modell nem alkalmas az általunk vizsgált geometria és fizikai folyamat kellő hitelességgel történő leírására.

A lokális hőátadási tényező függőleges alakulását vizsgálva nem várt eredményeket is tapasztaltunk. Néhány magassági szinten a hőátadási tényező értéke az átlagosnál magasabb értékeket vett fel. Ennek oka valószínűleg mérési pontatlanság, de nem zárható ki annak lehetősége sem, hogy a pálca fűtése függőleges irányban nem egyenletes. Ennek tisztázására egy olyan mérési összeállítást javasolunk, ahol a pálca felületébe termoelemeket építenek be, így annak lokális hőmérséklete a LIF méréstől függetlenül meghatározható.

Bár a hidraulikus határréteg vastagságára megfelelő pontosságú becslést adtunk, a termikus határréteg vastagságának meghatározása a nem elhanyagolható relatív mérési bizonytalanság miatt nem állt módunkban. Ezt a mérési összeállítás javításával sem lehet olyan mértékben csökkenteni, hogy a termikus határréteg vastagsága meghatározatónak váljon.

A dolgozatunkban szemléltetett eredmények bizonyítják, hogy az elvégzett mérések sikeresek voltak a kitűzött céljaink megvalósításának szempontjából. Bár a mérési hibák csökkentése terén előrelépést jelentettek az általunk végrehajtott javító és optimalizáló intézkedések, a valós környezeti állapot közelítése újabb kihívásokat jelent. Jelenleg az Oktatóreaktor csupán egy fűtőpalcájának modelljét vizsgáltuk, érdemes lenne azonban egy egész fűtőelem-köteget megvizsgálni a már létező numerikus számítások eredményeivel történő összehasonlítás végett. Emellett a jövőben – a PIV és LIF méréstechnikák széleskörű alkalmazhatósága által – további, nukleáris biztonság szempontjából fontos jelenségek vizsgálatára is lehetőség nyílik. Tartályok leürítő csomópontjai fölött kialakuló örvények paraméterei – melyek atomreaktorok aktív zónájához kapcsolódó üzemzavari hűtőrendszerek szempontjából lehetnek relevánsak – ugyancsak vizsgálhatók ezen méréstechnikákkal.

Dolgozatunk folytatásaként egy numerikus szimuláció is készül a mért adatok és a számított eredmények összehasonlítása végett, melynek eredményei nem csak számunkra lesznek

tanulságosak a mért eredmények további értelmezése szempontjából, de a mérés technikák alkalmazásának korlátosságát is jellemezni fogják.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Szijártó R., Yamaji B., Dr. Aszódi A. [2011]: New studies of the natural convection around the fuel rod model of the BME training reactor with PIV/LIF technique. 21st Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. Drezda, Németország, 2011.09.19.
- [2] Kovács Máté [2005]: A BME Oktatóreaktor gépészeti modellezése Solid Edge rendszerben; TDK dolgozat, BME NTI
- [3] BME NTI [2008]: BME Oktatóreaktor Végleges Biztonsági jelentés. Budapest (NT-VBJ-01-1,1/2008)
- [4] A BME NTI honlapjáról a <http://www.reak.bme.hu/toertenet/mindennapok.html> címen; Internet, 2012.10.02.
- [5] Dr. Zsolnay É., Dr. Szatmáry Z. [2007]: Termikus neutronfluxus meghatározása aktivációs módszerrel - Hallgatói gyakorlati mérésútmutatója, a Laboratóriumi mérések I. tárgy (BMETE80AE09) tananyaga
- [6] Általános információk a BME NTI Oktatóreaktoráról a <http://www.reak.bme.hu/kutatas/oktatoreaktor.html> oldalon; Internet, 2012.10.02.
- [7] Grafsrønningen S., Jensen A. [2011]: Simultaneous PIV/LIF measurements of a transitional buoyant plume above a horizontal cylinder. International Journal of Heat and Mass Transfer, No. 55, p. 4195–4206
- [8] Hlawitschka M. W., Bart J. [2012]: Determination of local velocity, energy dissipation and phase fraction with LIF- and PIV-measurement in a Kühni miniplant extraction column. Chemical Engineering Science. N. 69, p. 138–145
- [9] Hoffmann M., Schlüter M., Rübiger N. [2005]: Experimental investigation of liquid–liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV. Chemical Engineering Science, Volume 61, Issue 9, p. 2968–2976
- [10] Copeland C., Friedman J., Renksizbulut M. [2007]: Planar temperature imaging using thermally assisted laser induced fluorescence of OH in a methane–air flame. Experimental Thermal and Fluid Science, N. 31, p. 221–236
- [11] Kumara W.A.S., Elseth G., Halvorsen B. M., Melaaen M. C. [2010]: Comparison of Particle Image Velocimetry and Laser Doppler Anemometry measurement methods applied to the oil-water flow in horizontal pipe. Flow Measurement and Instrumentation, N.21, p. 105-117
- [12] Brücker C. [1996]: Study of the Three-Dimensional Flow in a T-Junction Using a Dual-Scanning Method for Three-Dimensional Scanning-Particle-Image Velocimetry (3-D SPIV). Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 14, Issue 1, p. 35–44
- [13] Könczöl S. [1973]: Hőátadás vizsgáلتa atomreaktor fűtőelemén. BME, Budapest

- [14] Csapó J. [2003]: BME Oktatóreaktor üzemanyag kötegében lejátszódó termohidraulikai folyamatok háromdimenziós numerikus modellezése. 25. oldal BME, Budapest
- [15] Raffel M., Willert C. E., Wereley S. T. and Kompenhans J. [2007]: Particle Image Velocimetry - A Practical Guide. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York
- [16] Particle Image Velocimetry (PIV) mérőberendezés használata sebességmérésre, a Laboratóriumi mérések II. (BMETE80AE10) tantárgy tananyaga
- [17] Husted B. P., Petersson P., Lund I., Holmstedt G. [2009]: Comparison of PIV and PDA droplet velocity measurement techniques on two high-pressure water mist nozzles. Fire Safety Journal, Issue 44., p. 1030-1045, Elsevier
- [18] Meyer K. E., Larsen P. S., Guillard F., Westergaard C. H. [2002]: Temperature and velocity fields in natural convection by PIV and LIF. 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Proceedings. Lisszabon, 2002. július 8-12.
- [19] A Dantec Dynamics honlapja a <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1169> címen; Internet, 2012.10.16.
- [20] Balogh Tibor [2012]: A Kalib-BT LIF kiértékelő program dokumentációja. BME NTI
- [21] Seuntjens H. J., Kieft R. N., Rindt C. C. M., Van Steenhoven A. A. [2001]: 2D temperature measurements in the wake of a heated cylinder using LIF. Experiments in Fluids, Issue 31. p. 588-595., Sringer-Verlag
- [22] Coolen M. C. J., Kieft R. N., Rindt C. C. M., Van Steenhoven A. A. [1999]: Allpication of 2-D LIF temperature measurements in water using a Nd:YAG laser. Experiments in Fluids, Issue 27. p. 420-426., Sringer-Verlag
- [23] Boros I., Fülöp I., Szabó B., Zachár A., Aszódi A. [2007]: Hőmérsékleti rétegződés vizsgálatára vonatkozó számítási eredmények kísérleti validálása – A kísérletek előzetes CFD vizsgálata, Az első kísérleti berendezés; kutatási jelentés, BME-NTI-416/2007, Budapest
- [24] Kazansky S., Dubovsky V., Ziskind G., R. Letan [2003]: Chimney-enhanced natural convection from a vertical plate: experiments and numerical simulations. International Journal of Heat and Mass Transfer Issue 46, p. 497–512., Elsevier
- [25] Moshfegh B., Sandberg M. [1996]: Investigation of fluid flow and heat transfer in a vertical channal heated from one side by PV elements, Part I. - Numerical Study. Renewable Energy, Volume 8, Issue 1-4, p. 248-253.
- [26] VDI Wärmeatlas 10. Auflage [2006]: Fc 4 - Wärmeübergang durch freie Konvektion in geschlossenen Fluidschichten. Vertikale Ringspalte. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- [27] Dr. Bihari P. [2010]: Műszaki Hőtan - Hőközlés. Feladatgyűjtemény és Segédlet. 103. oldal, BME, Budapest