



MISKOLCI EGYETEM
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet
*Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti
Tanszéke*



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

HENGERES TEST MÖGÖTT KIALAKULÓ SPANWISE JELENSÉG VIZSGÁLATA

MOLNÁR BENCE

II. éves Energetikai mérnök Msc. szakos hallgató

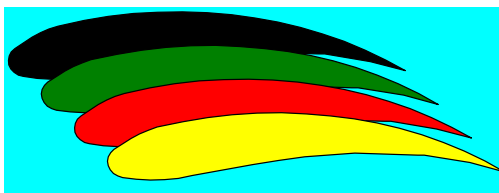
Konzulens:

BENCS PÉTER

Tanszékvezető:

PROF. DR. SZABÓ SZILÁRD

Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA 2014

MISKOLCI EGYETEM

2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Kutatási terület	4
2.1. Kör keresztmetszetű rúd körüli áramlás	4
2.2. Kármán-féle örvénysor	6
2.3. Spanwise jelenség	8
3. Mérési összeállítás	11
3.1. Részecske képen alapuló sebesség meghatározás [10]	11
3.1.1. A rendszer sajátosságai	11
3.1.2. A PIV rendszer mérési elve	12
3.2. A Schlieren technika	14
3.3. PIV és Schlieren rendszerek párhuzamos alkalmazása	15
3.4. Spanwise jelenség vizsgálata PIV mérőberendezéssel	19
4. Numerikus szimuláció	21
4.1. Előfeldolgozás	22
4.1.1. Geometria modell	22
4.1.2. A numerikus háló	25
4.2. A szimuláció	28
5. Eredmények	31
5.1. 2D szimuláció-valóságos mérési tér	32
5.2. 2D szimuláció csökkentett számítási tartomány	32
5.3. A 3D modell eredményeinek kiértékelése	33
6. A numerikus szimuláció és a mérési eredmények összevetése	38
7. Köszönetnyilvánítás	41
8. Irodalomjegyzék	42

1. Bevezetés

A tudományos diákköri munkám feladata, egy áramlásba helyezett fűtött hengeres rúdról leváló örvények eloszlásának, valamint a fűtött rúdról leváló hőcsomagok terjedésének numerikus vizsgálata. A numerikus szimulációk mellett szélcsatornabeli mérések is folyamatban vannak.

A numerikus szimulációk és a mérési összeállítás tárgyát képező jelenség a műszaki gyakorlatban is megjelenik, hiszen az áramlásba helyezett környezeti hőmérséklettől eltérő hőmérsékletű prizmatikus testekkel gyakran találkozhatunk. Jó példa ezekre az elektromos távvezetékek, fűtőpatronok, hőcserélők, gyárkémények. Örök kérdés a fűtött prizmatikus testek hatása az örvényleválás struktúrájára és az örvények helyzetére valamint a kényszerkonvekció hatása a test hővesztésére. Így nem meglepő hát, hogy a prizmatikus test körüli áramlás struktúrája régóta kutatott terület, számos kutató foglalkozik levegő- vagy folyadékáramlásba helyezett álló körhengerről leváló örvények vizsgálatával. A szélnek kitett magas, karcsú oszlopokról, gyárkéményekről, épületekről vagy a villamos távvezetésekről leváló örvények gyakran a szerkezet meghibásodását okozzák. Áramlástechnikai szempontból fontos a szerkezeti elemek körül kialakuló áramlás vizsgálata a szerkezet szilárdságtani és lengéstani méretezése szempontjából, illetve akusztikai, környezetvédelmi kérdés is felmerül a leváló örvények keltette zaj kapcsán.

A áramlásba helyezett fűtött rúd mögött kialakuló jelenségek vizsgálatára optikai mérés technikai berendezések kerültek alkalmazásra, melyekkel a szükséges mérések a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékének műhelycsarnokában található szélcsatornában lettek kivitelezve. A rúd mögötti térrészben kialakuló sebességmező vizsgálatára alkalmazott PIV (Particle Image Velocimetry) berendezés egy jól meghatározott kétdimenziós lamináris áramlást igényel, így ennek elérése érdekében a szélcsatornában beállítható legkisebb alapáramlással 0,3 m/s zajlottak a mérések, ahol az áramlás a szélcsatornában lamináris. A dolgozatban bemutatom a mérési rendszer felépítését, az alkalmazott optikai mérőberendezések működési elvét, sajátosságait valamint a kapott adatokból kiértékelt eredményeket.

A numerikus szimulációk a szélcsatornabeli mérésekkel azonos paraméterekkel kerültek beállításra. A szimulációkat az ANSYS szoftvercsomag véges térfogatok módszerét alkalmazó Fluent moduljában kerültek elkészítésre. A dolgozatomban kitérek a szimulációk előkészítésnek folyamatára, bemutatom a különböző változatok eredményeit, végül összehasonlítom a szimulációk és a mérések eredményeit.

2. Kutatási terület

Tudományos diákköri kutatómunkám, illetve ezért a dolgozatom témáját is egy szélcsatornában elhelyezett, fűtött, henger alakú rúd mögötti térrészben kialakuló örvényleválások valamint a hőmérséklet és sebességmező vizsgálata adta. A kutatási munkám során két vizsgálati módszert, a numerikus szimulációt valamint optikai méréstechnikai módszereket alkalmazok a jelenségek vizsgálatára, majd ezek eredményeit összevetem. Az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékének műhelycsarnokában található zárt Göttingen típusú szélcsatornában elhelyezett fűtött rúd mögött kialakuló jelenségek vizsgálatára modern optikai méréstechnikai eszközöket alkalmaztunk, ahol egy korábbi kutatás eredménye képen sikerült egyidejűleg meghatároznunk a rúd mögött kialakuló hőmérséklet és sebességmezőt. Mindehhez részecskeképen alapuló sebességmeghatározó berendezést (PIV) valamint a hőmérsékletmező megjelenítésére Schlieren mérőrendszert használtunk. Munkánk folytatásaként a mérések eredményeit tovább szeretnénk javítani, melyet a mérési elrendezés átalakításával valamint új alkatrészek beépítésével szeretnénk elérni. Az aktuális mérés során PIV rendszert alkalmazva a sebességmező mérésével vizsgáljuk a rúdról történő örvényleválásokat, ahol az úgynevezett spanwise jelenséget szeretnénk tanulmányozni. A mért eredmények alátámasztására első lépésben kísérletet tettem a mérési elrendezésünknek megfelelő numerikus szimulációk elkészítésére. A szimulációk elkészítése mellett összeállítottuk az új mérési elrendezést, melytől pontosabb eredményt remélünk, beépítve az új lézernyalábot eltérítő tükröket, és a nagyobb látószöget biztosító optikát. A mérések jelenleg folyamatban vannak.

2.1. Kör keresztmetszetű rúd körüli áramlás

Az egyszerű geometria ellenére a körhenger mögött kialakuló áramlási tér igen bonyolult, így ennek egzakt meghatározása, törvényszerűségeinek leírása nehéz feladat. Régebben a test körüli áramlás vizsgálatát mérésekkel vagy kísérletekkel tudták elvégezni. Manapság azonban a számítástechnika nagymértékű fejlődésének köszönhetően, a számítógépek segítségével is lehetőség nyílt a kör henger mögött kialakuló jelenségek leírására szolgáló bonyolult és hosszadalmas egyenletek gyorsabb megoldására, ahol az adott probléma numerikusan modellezhető, majd megoldásuk valamilyen megoldó séma alapján történik.

A rúd körüli áramlás tanulmányozása több szempontból is indokolt. A körhenger formájú tárgyakra egy bizonyos áramlási sebességnél örvények válnak le, amelyek oldalirányú erőket ébresztenek, és ez által lengésbe hozhatják a testet. Abban az esetben, ha nem számolnak ezzel és az örvényleválások frekvenciája eléri a szerkezet sajátfrekvenciáját, rezonancia alakulhat ki, ami meghibásodásokat, károkat eredményezhet. Ebből kifolyó okokból a körhenger körüli áramlás régóta kutatott terület és széleskörű irodalma van.

Jelen dolgozatban bemutatásra kerülő munkában, a fő hangsúly egy, a mérési összeállításunk paramétereivel megegyező, működőképes, reális eredményt adó 3D szimulációs modell elkészítése volt, melynek eredményeit a már meglévő, és a későbbi mérési eredményinkkel összevethetünk.

Ahogy arról már a bevezetésben említettem a PIV lézeres méréstechnika alkalmazása a szélcsatornában egy jól meghatározott kétdimenziós lamináris áramlást igényel. Ennek eléréséhez a szélcsatornában beállítható legkisebb alapáramlást ($0,3 \text{ m/s}$) állítottuk be. A részecskéken alapuló sebesség meghatározás elméleti hátterére egy későbbi fejezetben részletesebben kitérek.

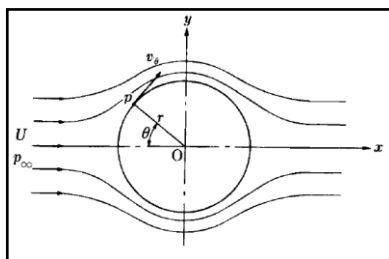
A folyadékáramlásba helyezett körhenger vizsgálatánál az áramlási tér szerkezetének formája szerint megkülönböztetünk lamináris, átmeneti és turbulens áramlást. A lamináris és a turbulens áramlás elkülönítését a Reynolds szám segítségével tehetjük meg, amely a tehetetlenségi és a súrlódási erők viszonyát fejezi ki:

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot d}{\nu} \quad (2.1.1.)$$

- ahol a d a körhenger átmérője,
- az u_{∞} a zavartalan áramlási sebesség,
- ν a folyadék kinematikai viszkozitása.

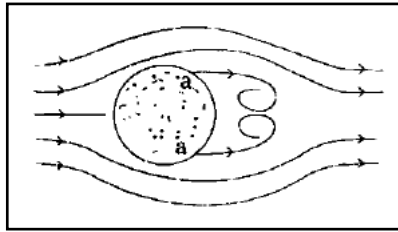
A Reynolds-szám változásával eltérő áramlási képek alakulhatnak ki a henger mögötti térrészben:

- $Re < 5$, vagyis nagyon kis értékeknél még szimmetrikus áramképet láthatunk, nem keletkeznek örvények, ekkor sima, úgynevezett kúszó áramlásról beszélünk. A leválás első jelei $Re = 5$ -nél jelentkeznek.



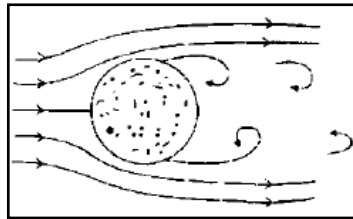
1. ábra: $Re < 5$ [1]

- az $5 < Re < 40$ tartományban a határréteg leválik a hengerről és megindul a cirkuláció, így a henger mögött két álló ikerörvény keletkezik. Az ikerörvények, azaz a leválási buborék hossza a Re értékkel együtt növekszik. Ebben az értéktartományban az áramlás még stacionárius, azaz időben állandó.



2. ábra: $5 < Re < 200$ [1]

- a $40 < Re < 200$ közötti tartományban a folyadékáramlás még lamináris jellegű, de az örvények már periodikusan válnak le a henger két oldaláról. Innentől kezdve válik az áramlás instacionáriussá [2].



3. ábra: $40 < Re < 200$

Amennyiben áramlásba helyezett hengeres rúd esetében a Reynolds-szám, $5 < Re < 200$ között van, úgy a rúd mögött kialakuló áramlás még lamináris.

2.2. Kármán-féle örvénysor

Kis Reynolds számok esetén tehát a párhuzamos áramlásba helyezett henger mögött két ellentétes irányban forgó ikerörvény jelenik meg, amely a leválás irányában továbbterjed. A Reynolds szám növekedésével az örvények meghosszabbodnak és egy kritikus érték felett ($Re_c > 47$) periodikus örvényleválás figyelhető meg. Az örvények folyamatosan, a henger két oldalán váltakozva válnak le, ezt a jelenséget Bénard-Kármán-féle örvénysornak nevezzük. [3]

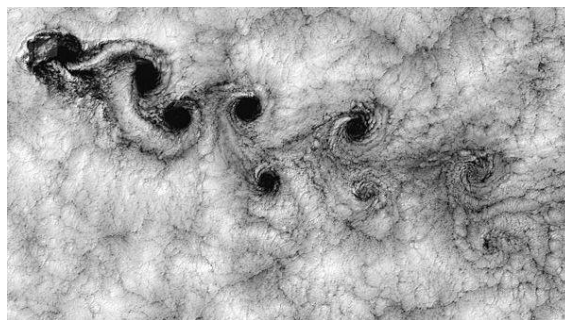
Az örvények és az ellenkező irányú örvények felváltva követik egymást az 1. ábrán látható jellegzetes képet alakítva ki. Végül a tovagyrúzó örvények energiáját a közeg belső súrlódása emészti fel és, a jellegzetes minta lassan elenyészik.



4. ábra: Kármán-féle örvénysor [4]

Amikor egy örvény leválik, aszimmetrikus áramlás alakul ki a test körül, ami ennél fogva megváltoztatja a nyomáseloszlást is. Ez más szóval azt jelenti, hogy a leváló örvények periodikus oldalirányú erőket keltenek, melyek rezgésbe hozzák a testet. Ha az örvényleválások frekvenciája megegyezik a test vagy a szerkezet szabadlengéseinek frekvenciájával, rezonancia alakul ki. Ez a gerjesztett rezgés okozza egy meghatározott frekvencián a kifeszített telefonhuzalok vagy villanyvezetékek „zenélését”, ez okozza az autó antennájának erős rezgését egy bizonyos sebességnél. A Kármán-féle örvényjelenségnek számos megnyilvánulását figyelhetjük meg meg a természetben. Nagy szélben a zászlók lobogását a széleken leszakadó örvények hozzák létre. Szélben oszlopok és rudak zúgó hangját is az okozza, hogy a mögöttük leszakadó örvények rúdon létrehozott rezgésszáma megegyezik a hallható hang rezgésszámával. [5]

A légköri jelenségek között is szerepel a Kármán-féle örvényjelenség. Ha huzamosabb ideig nagy sebességű levegő áramlik egy irányba, akkor a földrajzi képződmények (magas hegy, sziget) mögött ugyanúgy örvények keletkezhetnek, mint oszlopok vagy épületek mögött.



5. ábra: Műhold felvétele a Chile partjainál fekvő sziget felett létrejött Kármán-féle örvénysorról [5]

A nem áramvonalas testekről leváló örvények már több esetben szerkezetek meghibásodását okozták, így például 1940-ben az amerikai Tacoma Narrows függőhíd összeomlását. A híd széléről periodikusan leváló örvények lengésbe hozták a hídszerkezetet, mely lengések egy idő múlva olyan nagyok lettek, hogy a felfüggesztésre szolgáló huzalok rögzítései elengedték a hidat, tartószerkezetei a túlterhelések hatására szétszakadtak és a híd a vízbe hullott. A Monju atomerőmű 1995 évi leállítása és bezárása is ehhez köthető, ahol a folyadékáramlásba helyezett műanyag hőmérőtokról leváló örvények által keltett periodikus terhelés vezetett az egyik tok kifáradásához és megrepedéséhez, így emiatt nagy mennyiségű primer hűtőközeg került ki a rendszerből. Ezt az erőművet azóta sem indították újra. 1968-ban a Ferrybridge erőmű három hűtőtornyának összeomlását is a nagy erősségű szélhatás miatt létrejött örvény okozta. Problémát okozhat még a szerkezetek örvényleválás által keltett rezgése például kéményeknél, silóknál, magas karcsú épületeknél, stb. Ez a jelenség okozza a hőcserélőkben lévő csövek rezgését, a kifeszített telefonhuzalok vagy villanyvezetékek által keltett hanghatásokat, emiatt zajosak ezek a berendezések [6]

A vizsgálatom tárgyát képező jelenség tehát a műszaki gyakorlatban is gyakran megjelenik. Örök kérdés, hogy áramlásba helyezett fűtött rúd mögött kialakuló örvényleválásokra hogyan hatnak a rúdról leszakadó hőcsomagok, valamint a kényszer és a szabadkonvekció milyen hatással van a rúd mögötti áramlásra.

2.3. Spanwise jelenség

Jelen dolgozatban az Áramlás és Hőtechnikai Gépek Tanszékének műhelycsarnokában található szélcsatornában elhelyezett fűtött rúd körüli áramlás vizsgálatának eddigi eredményeit mutatom be. A vizsgálatomban a részecskeképen alapuló sebesség-meghatározó berendezés jellege miatt az alapáramlás $0,3 \text{ m/s}$ -ra lett beállítva a szélcsatornában. Az (2.1.1.) egyenletből kiindulva kiszámítható a hengeres fűtött rúdra vonatkoztatott Reynolds szám, mely alapján meghatározható, hogy az áramlás milyen tartományba esik. A fűthető rúd átmérőjéből ($d=10 \text{ mm}$), az alapáramlás sebességéből és a levegő környezeti hőmérsékleténél vett viszkozitásból, a rúdra vonatkoztatott Reynolds szám $Re_{\text{rúd}} \approx 200$. [7]

Megállapítható, hogy a Reynolds számból következtetve a folyadékáramlás még lamináris jellegű, de az örvények már periodikusam válnak le a rúd két oldaláról, tehát kialakul a Kármán-féle örvénysor. Mivel az áramlás még lamináris így lényegében a rúd hossz tengelye mentén minden síkban ugyanolyannak kellene lennie az áramlási profilnak.

Ha kétdimenziósnek tekintjük a jelenséget, akkor egy kör metszet körüli áramlást vizsgálunk. Amennyiben három dimenzióra kiterjesztjük ezt, akkor gyakorlatilag sok ilyen szeletből áll össze a modell, ahol a numerikus szimuláció során a program kiszámítja a henger hossz tengelye mentén és az egyes metszeteken lévő áramlási képet, ahol a különböző keresztmetszetekben más és más lehet az áramlási profil. Ez az úgynevezett spanwise jelenség, ahol a kérdés tehát az, hogy mennyire, és hogyan változik az áramlás jellege, van-e periodikusság az egyes keresztmetszetekben a rúd hossz tengelye mentén. Jelen dolgozatban egy három dimenziós modell segítségével ezt a jelenséget vizsgálom, valamint méréseink célja is ennek megjelenítése, tanulmányozása.

A jelenséget több kutató is megfigyelte. Bernd és társai (1993) a hengerről leváló örvényeket $Re=150$ és 200 Reynolds-számtartományban vizsgálták, ahol a kétdimenziós áramlásban megjelenő háromdimenziós (3D) instabilitásokat találtak $Re \approx 170$ Reynolds-számnál. Henderson és Barkley (1996) a körhenger körüli áramlás vizsgálatára a Floquet analízist használták és két 3D instabilitást azonosítottak: 'A módosú' A" $Re \approx 189$ és 'B módosú' $Re \approx 259$ Reynolds-számoknál. Eredményeik alapján kijelenthető, hogy álló henger körüli áramlás esetén $Re > 190$ esetén az áramlás pontos leírásához 3D eljárás szükséges. Ezt a

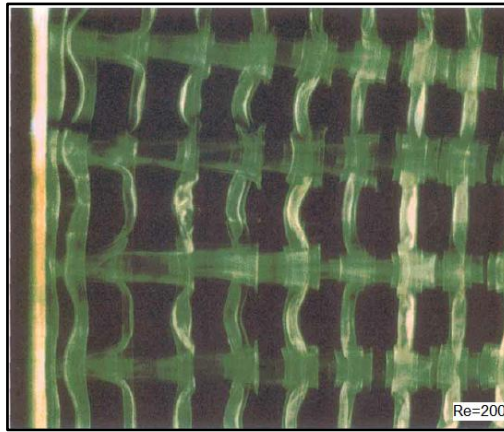
tényt később Leweke és Williamson (1998) megerősítették, akik szintén két 3D instabilitást találtak. [1]

A kétdimenziós áramlásban tehát $Re \approx 170$ értéktől (Bernd és társai) 3D instabilitások jelennek meg, ezért ennél nagyobb Reynolds számok esetén már 3D eljárás szükséges az áramlás pontos leírásához. Mivel kísérleti összeállításunkban a fűtött rúdra meghatározott Reynolds szám $Re \approx 200$, így feltételezzük, hogy már megjelennek az áramlásban a 3D instabilitások.

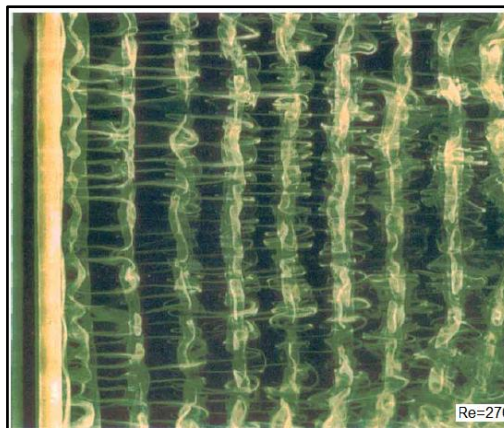
Az instabilitás egy nem lineáris probléma, amely folyadék mozgását leíró nem lineáris Navier-Stokes egyenletekből következik, ugyanis ezeknek az egyenleteknek megoldásaként néhol ugrásszerű változást kapunk. Ennek oka, hogy a nem lineáris egyenletekre az a jellemző, hogy a paraméterek kis megváltoztatása egyes esetekben az eredmények nagy megváltozását eredményezi. Az instabilitások megjelenésének pontos meghatározása azért fontos, mert ha átlépjük azt a határt ahol ezek az instabilitások jelentkeznek, akkor nem lesz már továbbá kétdimenziós az áramlás, így nem lehet 2D számítási kódot alkalmazni az áramlás leírására mert az nem lesz pontos.

Amennyiben tehát hengeres rúd körüli áramlás esetén egy bizonyos Reynolds szám érték fölé megyünk, akkor kétdimenziós áramlásban megjelennek háromdimenziós instabilitások. Ezeknek az instabilitásoknak két fajtája van. Az úgynevezett 'A modusú', $Re > 188,5$ Reynolds számok esetén, míg a 'B modusú' nagyobb $Re > 259$ Reynolds számok esetén jelenik meg. A két instabilitási mód között a lényeges különbség az örvénysorokban kialakuló instabilitások periodikusságában, a hullámhosszban van, tehát hogy az egyes instabilitások milyen távolságra helyezkednek el egymástól. Az 'A modusú' instabilitás esetén $\lambda \approx 4d$ hullámhossznyi távolságra ismétlődnek, míg 'B modusú' instabilitás esetén sűrűbben, az kialakult instabilitások közelebb helyezkednek el egymáshoz. Ebben az esetben a hullámhossz, $\lambda \approx 1d$ értékű, tehát megközelítőleg az 'A modusú' instabilitás hullámhosszának egy negyedének felel meg. A két instabilitási mód között átmenet van az $230 < Re < 260$ tartományban, ahol a $Re = 230$ tartományban még a 'A modus' dominál, míg $Re = 260$ már a 'B modus'. [8]

Mind a két 3D instabilitási formának jellegzetes alakja van, mely a 6. és a 7. ábrán jól követhető. A rúd az ábrák bal oldalán látható sárga színben, az áramlás balról jobbra tart. Az áramló közegbe a mérés során színezék, festékanyag került hozzáadásra, melynek segítségével megjelenítették a rúd mögött kialakuló instabilitásokat. A képeken látható, hogy az 'A modusú' instabilitás esetén az instabilitások $4d$ távolságra helyezkednek el egymástól, míg ez a periodikusság a 'B modusú' esetén $\lambda \approx 1d$.



6. ábra: 'A módusú' 3D instabilitás, $Re=200$ [9]



7. ábra: 'B módusú' 3D instabilitás, $Re=270$ [9]

A képeken jól megfigyelhető a vizsgálatunk tárgyát képező spanwise jelenség, ahogy a tengely hossz tengelye mentén a különböző keresztmetszetekben 3D instabilitások alakulnak ki. Kutatómunkám célja ennek a jelenségnek a vizsgálata, ahol a szélcsatornában elhelyezett fűtött rúd esetén tanulmányozom, hogy a mérési összeállításunknak megfelelő paraméterek mellett a kétdimenziós áramlásban megjelennek-e a 3D instabilitások. A következő fejezetekben bemutatom a mérési összeállításunkat, a jelenség vizsgálatára szolgáló berendezéseket, a mérés menetét, valamint a jelenlegi fejlesztési irányokat. Ezután rátérek az általam készített numerikus szimulációra, ahol bemutatom hogyan építettem fel a modellt. Ezt követően ismertetem a szimuláció eredményeit, majd összevetem a már meglévő mérési eredményekkel.

3. Mérési összeállítás

Az 2013/2014 tanév első szemeszterében, szintén egy diákköri kutatómunka keretében egy hallgatótársammal, a szélcsatornába helyezett fűtött rúd mögötti térrészben kialakuló sebesség-és hőmérsékletmező egyidejű meghatározására, PIV, valamint Z- típusú Schlieren méréstechnikai berendezéseket párhuzamosan alkalmaztunk. Vizsgálataink központjában a két technika együttes alkalmazásának megteremtése állt, melyet sikerült elérnünk, bár elért eredményeink még javításra szorulnak. Továbbá kísérleteket folytattunk a dolgozatom témáját adó spanwise jelenség vizsgálatára is, melyhez már az új mérési elrendezésből adódóan csak a PIV rendszert alkalmaztuk. Az eredmények biztatóak, ám messze nem teljesen pontosak, így jelenleg is zajlanak pontosabb eredményt nyújtó mérés kivitelezése. Az első és a leendő mérések során kapott eredmények ellenőrzésére készítettem el a mérési paramétereknek megfelelő modell numerikus szimulációját.

A következőkben röviden bemutatom a mérések során alkalmazott mérőberendezések működési elvét, melyek a magyarázatul szolgálnak a mérési összeállításunk felépülésére is. Ismertetem a már megvalósult mérések elrendezését, valamint a jelenlegi zajló vizsgálatokhoz eszközölt változtatásokat.

3.1. Részecske képen alapuló sebesség meghatározás [10]

A részecske képen alapuló sebesség meghatározás, azaz Particle Image Velocimetry (PIV) alkalmazásával a teljes sebességtér egy adott síkjában kialakult időben változó sebességmező pillanatképe meghatározható.

Az egyszerű PIV rendszerrel képesek vagyunk a kívánt mérési keresztmetszetben a sebességek az adott síkba eső két komponensét is meghatározni. A bonyolultabb mérésekhez, ahol már az adott mérési keresztmetszetben a sebességek mindhárom komponensét szeretnénk meghatározni, ott a háromdimenziós mérési rendszert kell alkalmazni.

A sebességmező valós időben történő meghatározásához szükséges egy lézersíkot előállító berendezés, egy modern digitális kamera, továbbá egy megfelelő számítógépes rendszer.

3.1.1. A rendszer sajátosságai

A PIV mérési technika nagy előnye és főbb tulajdonsága, hogy beavatkozás mentes, de a méréshez mikron nagyságú részecskék szükségesek, amelyek az adott áramlással együtt mozognak. A mérés során az egyik legfontosabb tényező a részecskék nagysága és minősége, mivel a rendszer a részecskék követésével tudja meghatározni a mérni kívánt keresztmetszetben kialakult sebességmezőt.

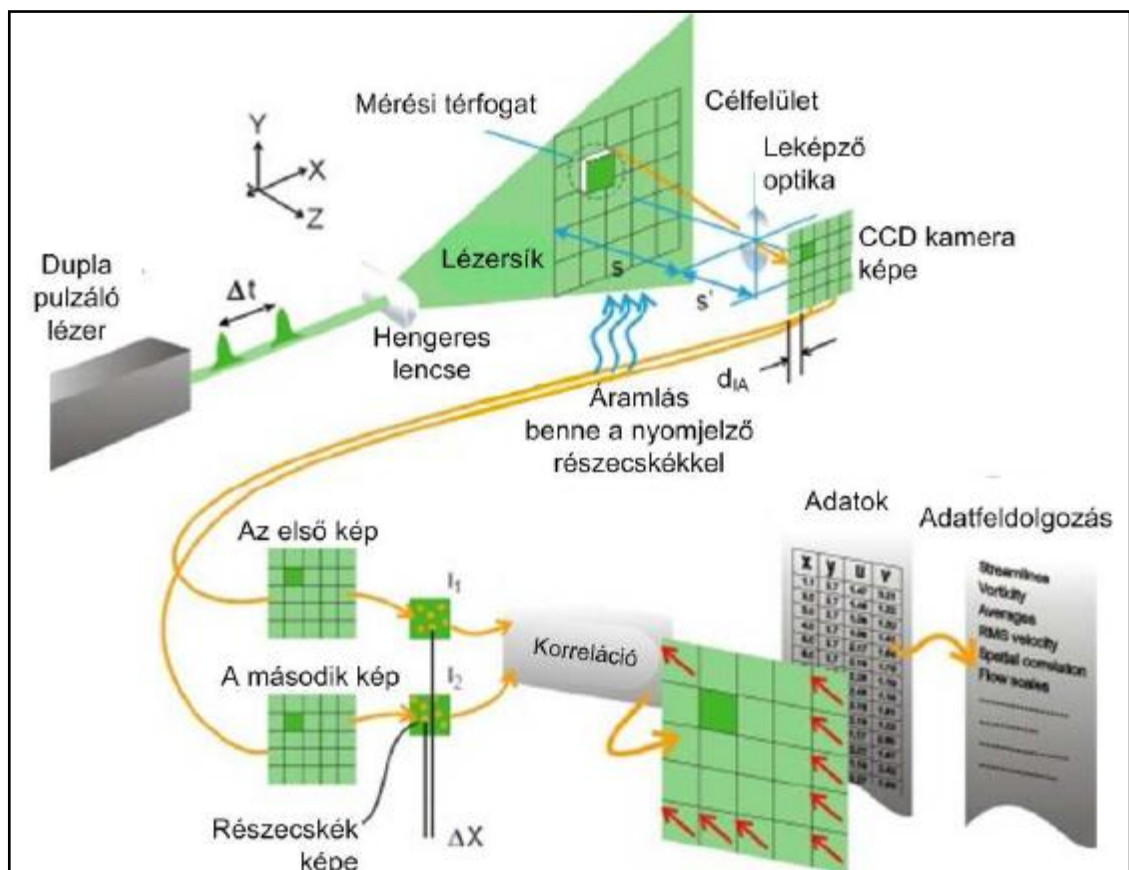
A rendszer további tulajdonságai a következők:

- Mérhető sebességtartomány: zero sebességtől egészen szuperszonikus sebességig.
- Mérési keresztmetszetben kialakult változó sebességmező meghatározása.
- Mindhárom sebességkomponens meghatározásának lehetősége a háromdimenziós rendszer alkalmazása esetén.
- Sebességmezők sorozatának elemzési lehetősége: statisztika, térbeli korreláció és egyéb más jellemző adat elérhető a mérési eredményekből.

A PIV technikával elért mérési eredmények teljesen hasonlóak azokhoz az eredményekhez, amiket a kutatók számítógépes modellekkel, numerikus szimulációval határoznak meg (például: Large Eddy Simulation). A valós idejű mérési lehetőség miatt az eredmények nagyon jó lehetőséget biztosítanak a kutatóknak az adott szimulációs eredmények ellenőrzésére.

3.1.2. A PIV rendszer mérési elve

A mérés elve az 8. ábra segítségével követhető. A PIV mérés esetén egy lézersík fényimpulzusokkal világítja meg a vizsgált $X \times Y$ [mm²] mérési területet. Az áramlásba helyezett részecskék megvilágításáról tehát e lézersík gondoskodik, amelyet egy dupla pulzáló lézer hoz létre.



8. ábra: PIV rendszer működési és mérési elve [1]

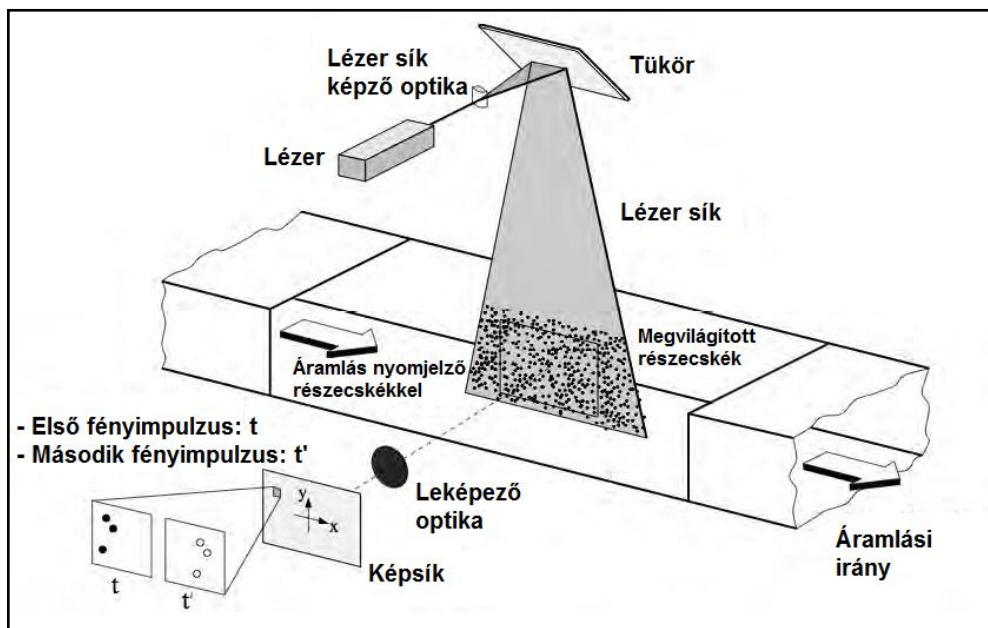
Egy gyors kamera e megvilágított síkról két felvételt készít két egymást követő fényimpulzussal egy időben, miközben Δt idő telik el. Az áramlásba helyezett,

azzal együtt mozgó egy részecske eközben Δx elmozdulást (Δx vektormennyiség) végez. A vizsgált részecske elmozdulását mérve két fénypulzus között, differenciálással megkapjuk a vonatkozó sebességvektort:

$$\vec{v} = \frac{\vec{\Delta x}}{\Delta t}$$

A mérési sorozat egy tagja a két fénypulzus által megvilágított két képet tartalmazza, amelyen az áramlásba helyezett részecskék sokasága látszik.

A 9. ábrán egy a PIV méréseknél alkalmazott standard felépítési módszer látható, mely jól szemlélteti a rendszer működési elvét.



9. ábra: A PIV rendszer egy általános (estünkben is alkalmazott) felépítési módszere [12]

A képek digitális kamerával készülnek, amely a mérési területet a kamera érzékenységének megfelelően, például $X_p \times Y_p = 1600 \times 1200$ db pixelre osztja. Egy-egy pixel a kamera fajtájától függően vagy különböző szürkeárnyalatokat, vagy különböző színeket érzékel. Ahol a részecskék éppen elhaladnak azt az árnyalat, vagy a szín megváltozása jelzi. A kamera által készített képeket a hozzá kapcsolt számítógépre telepített szoftver felnagyítja az eredeti $X \times Y$ [mm^2] méretre és kis elemzési ablakokra, úgynevezett IA iterációs területekre osztja. Egy iterációs terület nagysága úgy választható meg, hogy azon belül $p \times p$ darab pixel (18×18 , 32×32 , 64×64 , vagy 128×128 db.) legyen. Így az iterációs területek száma $X_i \times Y_i$, ahol

$$X_i = \frac{X_p}{p}, \quad Y_i = \frac{Y_p}{p}$$

Az iterációs területek felvehetők úgy, hogy teljesen, de átfedés nélkül fedik le a területet. A képfeldolgozás minősége javítható, ha az iterációs területeket némi átfedéssel vesszük fel.

Egy iterációs ablakról készült fényképpáron lévő azonos részecskéket kereszt korrelációval azonosítják és kapcsolják egymáshoz. A kereszt korrelációs eljárás során az iterációs terület két képe tekintetében minden pixel intenzitása (vagy színe) összehasonlítódik a másik kép minden pixeléével. Ennek a statisztikai összehasonlításnak (párosításnak) az eredményeképpen adódik az elmozdulás legvalószínűbb iránya és nagysága.

A korrelációs matematikai eljárás egy $R(\Delta x)$ csúcsjelet képez, ami meghatározza a két képen található azonos részecskék legvalószínűbb Δx elmozdulását. Ezt a szoftver megismétli minden iterációs területre. Az elmozdulás pontos méréséhez illetve azt követően a sebesség pontos meghatározáshoz a szoftver alkalmaz egy interpolációs eljárást a pixelek között. Ez az úgynevezett szubpixel interpoláció azt jelenti, hogy a pixeleken, mint diszkrét helyeken érzékelt intenzitás jelsorozatra interpolációs polinomot fektet, s a pixelek közötti értékeket is figyelembe veszi a keresztkorrelációnál. Ezzel javítja az eljárás pontosságát. Az eljárás pontos matematikai leírása fellelhető a szakirodalomban [11].

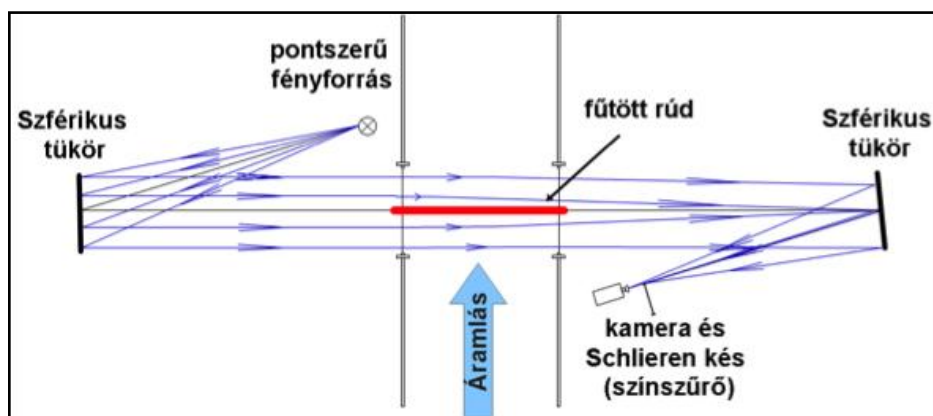
Az elemzéshez tehát két kép kell, melyből számítható az elmozdulás, azonban a felvételek jól megjelenítik az áramlás struktúráját is.

3.2. A Schlieren technika

„Schlieren” jelenség alatt optikai inhomogenitásokon áthaladó fénysugarak irányváltozását értjük. Az optikai inhomogenitás kialakulhat gáznemű közegeknél a sűrűség rohamos változása esetén, így az ezeken való áthaladás során az eltérülő fénysugarak miatt képtorzulás alakul ki. A jelenség összetett, de némely esetben jól leírható törvényszerűségek szerint megy végbe, ezért a Schlieren módszerek fizikai jelenségek megmutatására és számszerűsítésére is alkalmasak. A Schlieren mérési technikák tehát a sűrűségváltozás okozta fénytörési jelenségeken alapulnak.

Ezen mérőrendszerek elsődlegesen kétdimenziós méréseknél használatosak, amikor a rúd hossztengelyére merőleges síkokban az áramlás azonos. A háromdimenziós alkalmazások során problémák adódnak, ezért esetünkben kérdéses, hogy mag a fűtött rúd esetén megjelennek-e 3D instabilitások. Amennyiben igen, úgy a Schlieren mérőberendezéssel megjelenített hőmérsékletmező pontatlan lehet.

Többféle Schlieren mérő technológia használatos napjainkban (Background Oriented Schlieren, Z- típusú). Ezek közül esetünkben az úgynevezett Z-típusú technológiát alkalmaztuk, mely mérőrendszer alap felépítése a 3. ábrán látható.



10. ábra Z-típusú Schlieren rendszer [13]

Az Z- típusú Schlieren rendszer- a megfelelő minőségű felvételek érdekében pontbéli forrást alkalmaz. A fényforrásból induló fénysugár különböző eltérülését a különböző sűrűségű közegben történő áthaladás során a sűrűségváltozás miatt fellépő fénytörés index-változása okozza. A pontbéli fényforrás lencsékkel/tükrökkel fókuszálható egy úgynevezett késélre vagy színszűrőre. A különböző sűrűségű közegeken áthaladó sugarak különböző eltérülése miatt, késél esetén eltérő fényerősséggel világítják meg a késél mögött elhelyezett kamera CCD chipjét, míg színszűrő esetén az eltérülés mértékétől függően más színek érkeznek be a chipbe. Megfelelő kalibrálási eljárást alkalmazva a hőmérsékletmező színárnyalataihoz számszerű értékek is rendelhetők. [13]

Az Áramlás és- Hőtechnikai Gépek Tanszékének műhelycsarnokában megtalálható z- típusú Schlieren mérőrendszer a 11. ábrán látható.

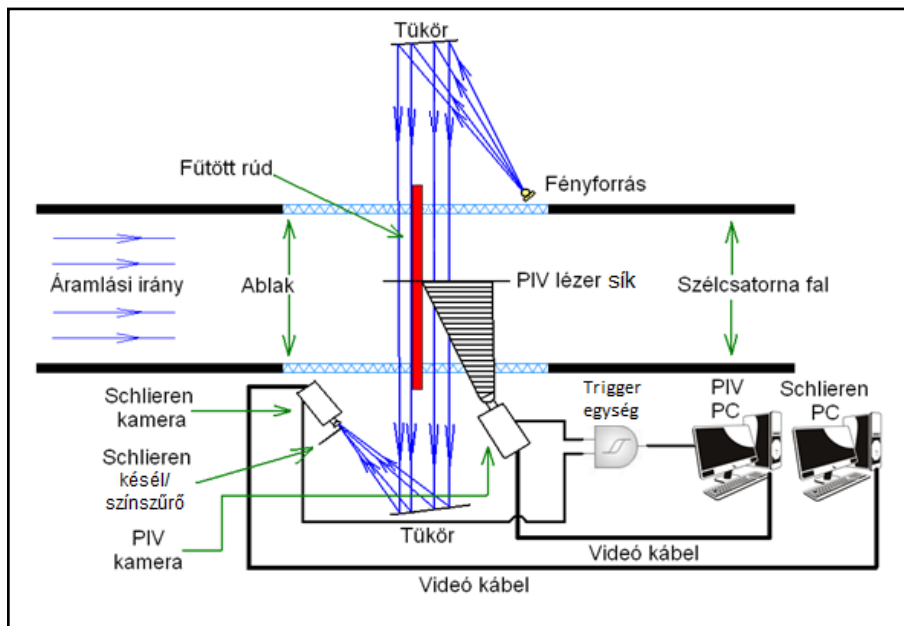


11. ábra : Z- típusú Schlieren mérőrendszer [14]

Esetünkben nem késélt, hanem színszűrőt használtunk, mely az úgynevezett rainbow , azaz „szivárvány” Schlieren technológia.

3.3. PIV és Schlieren rendszerek párhuzamos alkalmazása

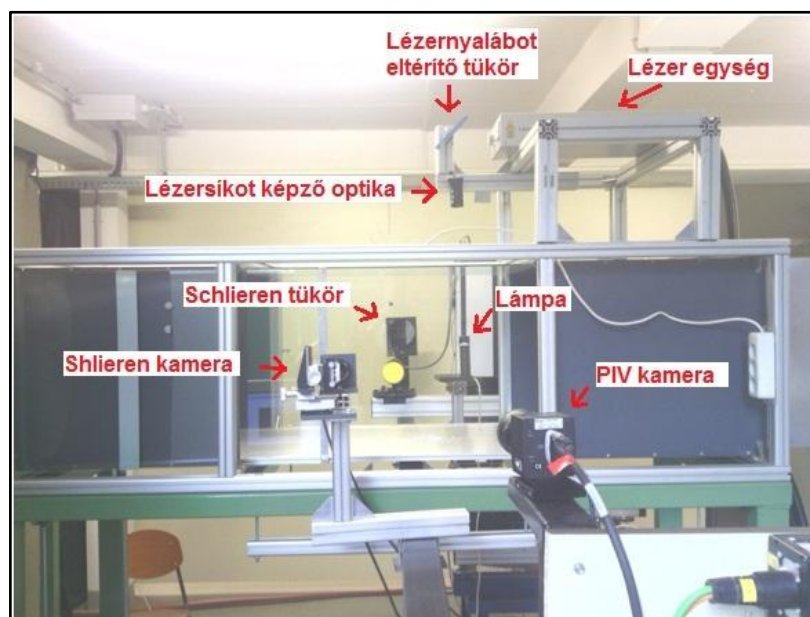
Első mérésünk során a PIV, valamint Z- típusú Schlieren mérés technika párhuzamosan került alkalmazásra. Vizsgálataink központjában a két technika együttes alkalmazásának megteremtése állt. A vizsgálat egy zárt rendszerű Göttingen-típusú szélcsatornában történt. Feladatunk részét képezte a rendszer összeállítása konzulensünk segítségével. A 12. ábrán látható a megvalósított mérési elrendezés sematikus ábrája.



12. ábra: A mérési rendszer sematikus elrendezése felülnézetből [12]

A mérési elrendezés ábráján látható, hogy a fűtött henger az áramlásra merőlegesen van rögzítve vízszintes síkban a szélcsonna 500x500 mm keresztmetszetű mérőszakaszában. A szélcsonna két oldalán, a mérőszakaszon, átlátszó üvegfelület van elhelyezve (13. ábra), melyeknek a közepén furatok találhatók a fűtött rúd rögzítésére. A rúd átmérője $d=10\text{ mm}$, hossza 500 mm. A rúd villamos fűtését toroid transzformátor közbeiktatásával valósítottuk meg, ahol a rúd átlaghőmérsékletét a mérés során 300 °C-ra választottuk, mert ekkor már a környezettől jelentős mértékben eltérő hőmérséklet miatt a vizsgált jelenség kellő intenzitással jelentkezik.

A 13. ábrán a megvalósított mérési összeállítás fényképe látható.



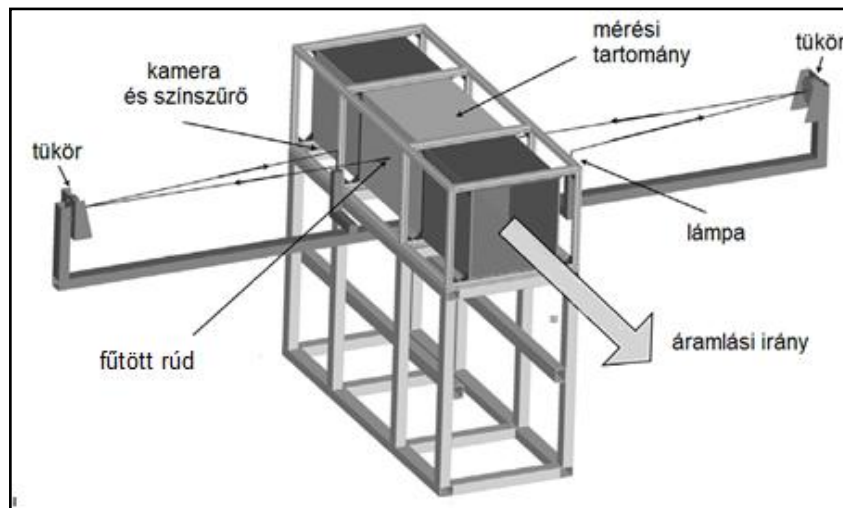
13. ábra: A megvalósított mérési elrendezés [saját fénykép]

A sebességmező meghatározása tehát PIV technikával történt, szinte a 9. ábrán bemutatott elrendezésnek megfelelően. Ehhez a hengerre merőleges lézersíkot egy dupla pulzáló lézer-egység állítja elő, amely a 13. ábrán a szélcsatorna felett látható. A lézer egység által előállított sugarat egy tükör segítségével 90°-kal eltérítettük, majd síkoptikák segítségével létrehoztuk a lézer síkot. A lézersíkkal megvilágított felületen kialakuló áramlás mozgásjellemzőit a síkra merőlegesen elhelyezett kamera felvételeinek kiértékelésével nyertük.

Az alapáramlás átlagsebességét, egy frekvencia szabályozott axiális ventilátor segítségével $v = 0,3 \text{ m/s}$ -ra állítottuk be, ami a szélcsatornában minimálisan előállítható stabil alapáramlás. A sebesség ilyen alacsonyra állításra azért volt szükség, mert a sebességmező mennyiségi vizsgálatát lehetővé tevő mérési módszer (PIV) egy jól meghatározott kétdimenziós áramlást igényel. Ezért egy alacsony Reynolds számú áramlást kellett létrehozni, ahol az áramlás közelítőleg kétdimenziós. Ahogyan azt a 2.3. fejezetben említettem a szélcsatornában elhelyezett rúd esetén a Reynolds szám $Re \approx 200$. A részecske képen alapuló méréstechnika kétdimenziós áramlások során megbízhatóan alkalmazható, ám ahogyan azt már korábban felvettem 3D instabilitások jelenhetnek meg az áramlásban. Kísérletünkben a Reynolds szám értéke alacsony, az áramlás laminárisnak tekinthető, így feltételeztük, hogy a fűtött rúdra merőleges síkokban az áramlás közel azonos, vagyis az áramlás nem változik számottevően a rúd tengelye mentén. Ez a Schlieren technikánál szintén alapkövetelmény.

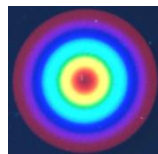
A mérés, egy zárt Göttingen típusú szélcsatornában zajlott, ahova ködgenerátor segítségével porlasztott olívaolajat juttatunk be nyomjelzőanyagként. Levegő vizsgálata esetén az alkalmazott részecske általában 0,3 mikron átmérőjű olaj csepp. A részecskék száma az áramlásban fontos tényező a mérések kiértékelése közben, mivel megfelelő mennyiségű részecske szükséges a kereszt korreláció esetén a csúcs jel megtalálásához. Az alapszabály, hogy minden iterációs területben 10 és 25 db között kell lennie részecskéknek. Az iterációs terület nagyságát (hány pixelt tartalmazzon) és a részecskék mennyiségét ezen alapszabály alapján kell megválasztani. Így tehát ügyelnünk kellett a bejuttatott porlasztott olaj mennyiségére, ugyanis ha túl keveset juttatunk volna a rendszerbe, akkor a PIV mérésnél nem kapunk megfelelő képet, viszont ha túl sűrű lett volna a köd, akkor a Schlieren képpel lettek volna gondok.

A Z- típusú Schlieren rendszer esetünkben megvalósított elrendezése a 14. ábrán látható.



14. ábra: A Z- típusú Schlieren mérőrendszer elrendezése [12]

A Schlieren mérésnél a mérési tér megvilágítása egy hagyományos izzóval nyert pont fényforrással valósítottuk meg, mely a 14. ábrán láthatóan a szélcsatorna egyik oldalán található, míg a Schlieren kamera értelemszerűen a túloldalán helyezkedik el. A Z- típusúhoz szükséges két tükör, egy zárt szelvényen lett rögzítve, ahol a köztük lévő távolság 4500 mm . A második tükörről a színszűrőn (15. ábra) keresztül érkezik a fény a Schlieren optikába. Mivel a méréshez esetünkben egy direkt erre a célra készített színszűrőt használtunk, mely megfelel a HUE színskálának, így a mérés előtt nem igényel a rendszer olyan jellegű kalibrációt, mint késél esetében. Ellenben egy más jellegű kalibráció szüksége, mely a későbbiekben a kiértékelés folyamán történt meg. A Schlieren rendszer pontossága elsősorban a háttér fényzajától függ, ezért a méréseket sötét szobában végeztük.



15. ábra: Alkalmazott színszűrő

A PIV és Schlieren mérések során, ahogyan az 12. és 13. ábrán is látható két különböző kamera került alkalmazásra. A trigger egység (TSI® szinkronizációs egység) végzi a szinkronizálását a PIV lézernek, a PIV kamerának és a Schlieren kamerának, hogy a mérések egy időben történjenek.

A PIV kamera pixel/mm tényező beállítása és a torzítás beállítása egy kalibráló tábla segítségével történt. A kalibrációs tábla a mérési síkba került beállításra a vizsgálati térben. A kamera optikáját a kalibrációs lemezre kellett fókuszálni, majd a rekeszértéket, mely meghatározza az érzékelőre jutó fény mennyiségét, F4-es értékre állítottuk be.

Az adatgyűjtésre és feldolgozásra alkalmazott szoftver a kereskedelmi INSIGHT3G™ PIV szoftver volt a TSI cégtől. A PIV által kapott adatok

feldolgozásával megtörténik a sebességmező kiszámítása, valamint az átméretezett képeken kereszt korreláció alkalmazása 32x32 pixeles területen, 50%-os átfedéssel. Végül tartomány validáció kerül alkalmazásra a vektor mezőre a vektorhibák kiküszöbölésének érdekében. Az eredményül kapott vektoros térkép exportálása ezután ASCII fájlba történt a későbbi Matlab® programmal történő megjelenítéshez. Mindkét módszer által rögzített képek feldolgozhatók a TSI® és a Matlab® kereskedelmi szoftverekkel.

A mérés során kapott Schlieren adatokat, képeket, amelyekből kiindulva a fűtött rúd mögötti hőmérsékletmezőt határoztuk meg, a Matlab kereskedelmi szoftver segítségével egy általunk fejlesztett programkód segítségével értékeltük ki. Ebben, első lépésben a színszűrő miatt a HUE színskála segítségével egy kalibrációs görbét hoztunk létre, melyből megkaptuk egy-egy pontban az fény eltérülésének mértékét, majd ebből számolta tovább a megírt program a hőmérséklet-eloszlást.

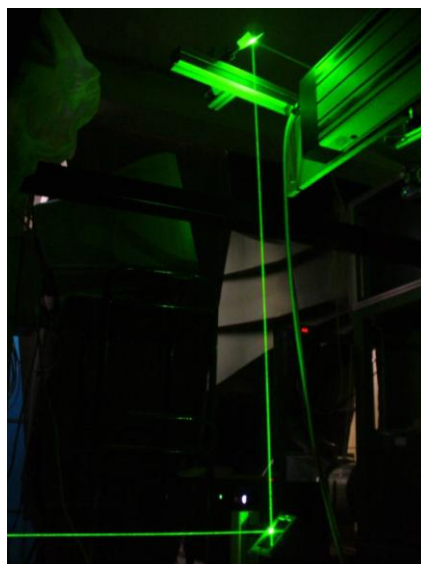
A PIV mérés eredményeként nyert képeket, amelyek segítségével a sebességmezőt határoztuk meg, először a PIV rendszer saját szoftvere az INSIGHT3G™ értékelte ki, majd az így kapott adatokat ugyancsak a Matlab szoftverben írt kód segítségével elemeztük ki. Ezt követően a két eredményt egy képen ábrázolva kaptuk meg a fűtött rúd mögött kialakult hőmérséklet- és sebességmezőt. A kiértékelés eredményeképp megjelenített sebesség- és hőmérsékletmező képet a numerikus szimuláció eredményeiként nyert összevetésnél mutatom be.

A célunkat elértük, hiszen a rendszer összeállítása után annak működőképességét bizonyítottuk. A PIV és a Schlieren rendszerek párhuzamos alkalmazása eredményes volt. A két mérési rendszert tehát alkalmas a hőmérséklet- és sebességmező egyidejű meghatározására, azonban, ahhoz, hogy jobban kiértékelhető, pontosabb eredményeket kapjunk a rendszer fejlesztésére, további kísérletekre van szükség.

3.4. Spanwise jelenség vizsgálata PIV mérőberendezéssel

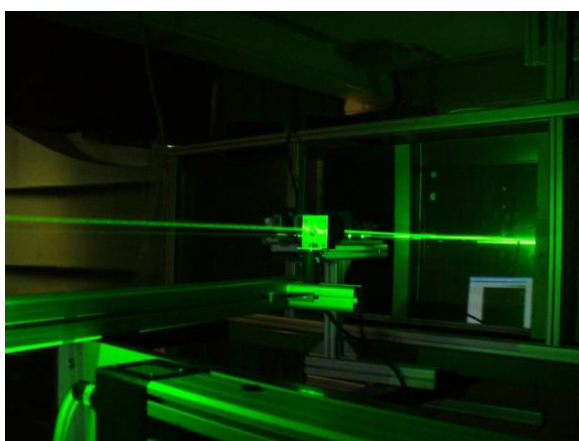
Az első mérés során nyert eredmények ugyan biztatóak voltak, ám messze nem elég pontosak, így felmerült a kérdés, hogy a rúd hossz tengelye mentén mennyire 2D az áramlás, nem jelennek e meg 3D instabilitások. Ezért kezdtük el vizsgálni a spanwise jelenséget, amelynek vizsgálatához új mérési elrendezést kellett összeállítanunk.

Az új mérési összeállításban a lézersíkot a rúd vízszintes középvonalában, az xz síkban, $y=0$ értéknél hoztuk létre. A lézeregység kb. 30 cm-re, míg a mérés során használt rúd középvonala kb. 170 cm-re helyezkedett el a műhelycsarnok padlózatától, így a lézersugarat két tükör segítségével, tükrönként 90°-kal eltérítve a lézernyaláb irányát egy síkoptikába vezettük (16. ábra).



16. ábra: A lézernyaláb lézersíkképző optikába történő vezetése [saját fotó]

A lézersíkképző optika több lencséből áll. Az egyik (1000mm -es lencse) a síkot képző optika fókuszpontját állítja be, így optikától mérve a lézersík 1000mm -re lett a legvékonyabb. Ezt úgy kellett beállítanunk, hogy pont a mérési térbe essen, ami azért fontos, mert ha túl vastag a lézersík, akkor az olyan hatást eredményez a PIV szoftverében, mintha több sík egymás alatt lenne megvilágítva, így nem tudna megfelelő mérést készíteni. A síkot képző optikában lévő másik lencse egy 25mm -es lencse. Ennek az optikának a feladata a képzett sík szélességének meghatározása. Minél kiterjedtebb síkon akarjuk a mérést elvégezni, az egységnyi felületre eső lézerfény ereje annál kisebb lesz. A túl széles sík hatására nem jut elég fény a kamerába, a mérés nem lesz sikeres. Ezáltal törekedni kell a minél keskenyebb lézersík kialakítására, ám megahagyva azt a mérési terület szélességet, ahol az általunk tanulmányozni kívánt jelenségek lejátszódnak. A 17. ábrán a lézersíkot képző optika látható.



17. ábra: Lézersík képző optika [saját fotó]

A lézersíkról a fényimpulzusokkal egy időben felvételt készítő optika a szélcsatorna felett a síkra merőlegesen volt elhelyezve.

A mérést több síkban is elkészítettük a rúd középvonalához képest. Pozitív irányban, $y = 5; 10; 40; 50; 70 \text{ mm}$ a rúd középvonala feletti síkokban. Negatív irányban $y = -5; -10 \text{ mm}$ -el a rúd középvonala alatt.

A mérés kiértékelése által nyert eredményeket egy későbbi fejezetben a numerikus szimuláció eredményeinek összehasonlításánál mutatom be.

Jelenleg a spanwise jelenség vizsgálatára irányuló mérések tovább javításán dolgozom. Konzulensemmel összeállítottunk egy stabilabb mérési összeállítást, ahol kisebb az egyes berendezések elmozdulási esélye, így csökkentve ezzel is a mérési hibát. Továbbá beépítettük az új jobb tulajdonságokkal bíró lézernyalábot eltérítő tükröket, valamint egy nagyobb látószögű optikát, amivel nagyobb térrész vizsgálatára van lehetőség a rúd mögött.

Munkám jelentős részét azonban a fűtött rúd vizsgálatára szolgáló háromdimenziós numerikus szimuláció elkészítése tette ki, melynek folyamatát a következő fejezetben ismertetem.

4. Numerikus szimuláció

A numerikus módszerek az áramlás leírására használt differenciál egyenletek megoldásának megkönnyítésére használt közelítő számítások. Ezek közül a véges térfogatok módszere a CFD (Computational of Fluid Dynamics), vagyis az áramlások numerikus szimulációjának az alapja. A véges térfogatok (a továbbiakban VT) módszere (hasonlóan a véges elem módszerhez) a számítási tartományt kisebb térfogati egységekre - ellenőrző-térfogatokra (ET) és ellenőrzőfelületekre (EF) - bontja, amelyeken belül a keresett áramlástan mezőváltozók egyszerűbb (pl. lineáris) függvényekkel közelíthetők. Ez a geometriai diszkretizáció, amelynek eredményeként egy a számítási tartományt kitöltő numerikus hálót kapunk. A számítások alapja a megmaradási egyenletek integrál alakja. Minden ET súlypontjában van egy számítási pont, amiben a változó értékeket számítjuk. A megoldás során mérlegegyenletek írhatók fel az egyes cellákba be-, illetve kilépő mennyiségek fluxusára. Az elemi cellák falán átlépő fluxusokat a környező cellák értékeiből interpolálják, amelyekre a megoldási módszertől függően több típus is létezik. Minden ET-ra egy algebrai egyenletet kapunk, amelyben számos szomszédos csomóponti érték jelenik meg. Ezután történik a diszkretizált egyenletrendszer linearizációja és a linearizált egyenletrendszer megoldása. Az egyenletrendszer megoldására két módszer lehetséges: az implicit és az explicit módszer. Az implicit módszernél az ismeretlent meghatározó függvényben szerepel maga az ismeretlen is, míg az explicitnél nem. A VT módszere mindenféle típusú rácsra alkalmazható, így komplex geometriákhoz is megfelel. A rács csak az ellenőrző térfogat határait definiálja és nem szükséges egy koordináta rendszerhez kapcsolni. Az ET megközelítés talán a legegyszerűbb a megértéshez és a programozáshoz. Ez

azért népszerű a mérnökök körében, mert minden tagnak, amit közelíteni kell, van fizikai jelentése. [15].

A szélcsatornába helyezett fűtött rúd körüli áramlás vizsgálatát a kereskedelmi forgalomban is kapható Ansys programcsomag Fluent moduljában végzetem el, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza.

4.1. Előfeldolgozás

A szimulációs modell elkészítésének több fázisa van, melynek első lépései a geometria modell és a numerikus háló elkészítése. Ezeket a lépéseket hívják együttesen a feladat előfeldolgozásának, amikor a valóságos vizsgálati tér a lehető legjobb közelítéssel megalkotásra és leképezésre kerül.

4.1.1. Geometria modell

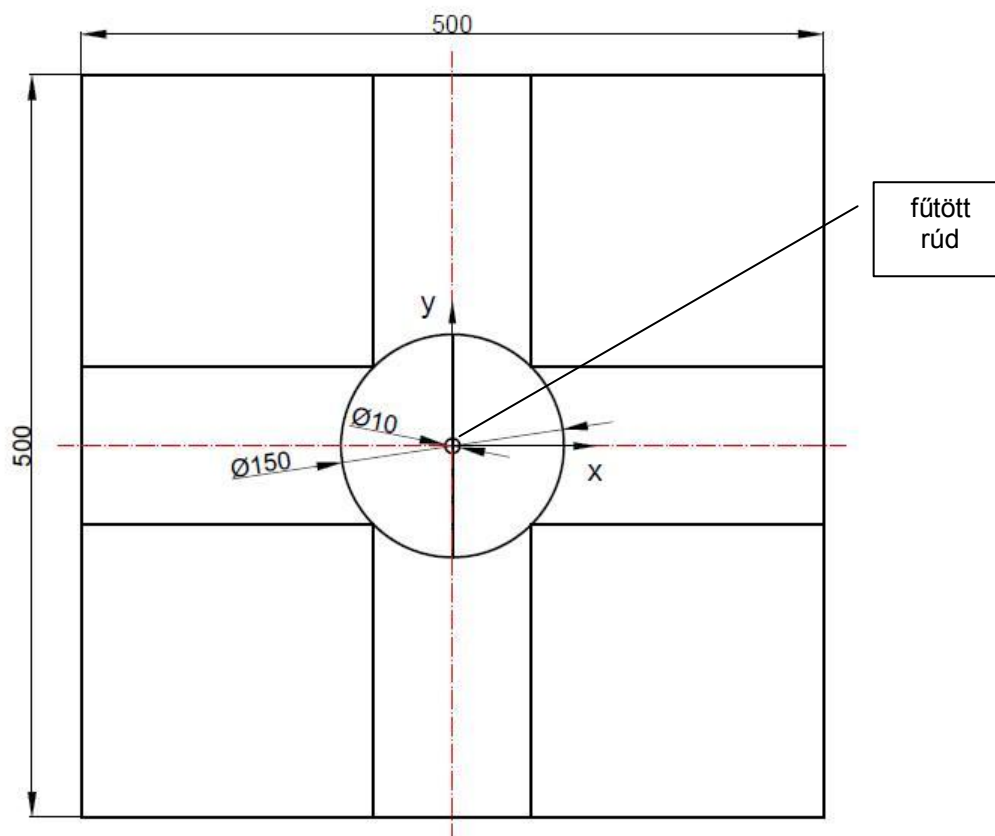
A geometria modell elkészítése egy arra alkalmas programban (pl. Ansys, Gambit, Inventor, Catia stb.) történő megrajzolása az első feladat, melyre ezután ráillesztésre kerül a megfelelően struktúrált numerikus háló, melynek segítségével a véges térfogatokkal dolgozó szoftver kiszámítja a kívánt áramlásképet és az áramlási jellemzőket.

Esetemben a geometriai modell elkészítésére több kísérletet is tettem. A rúd körüli vizsgálati tér alakjának és milyenségének megválasztása egy fontos feladat. Egy nem megfelelően megválasztott számítási tér befolyással lehet a rúd körüli áramlásra és nem ad reális eredményt a szimuláció. A valóságnak megfelelő mérési tér, egy a rúd méreteihez képest nagyon nagy vizsgálati teret eredményez, ahol háromdimenziós modellben a háló elemszáma olyan magas, hogy a számítások nagyon hosszú ideig tartanak.

Első lépésben kísérletet tettem az Ansys programcsomag geometriai modellezőjében valamint a hálókészítő moduljában elkészíteni a modellt. Itt létrehoztam a valós mérési tartományt ahol próbáltam minél jobb minőségű és minél kisebb elemszámú számítási hálót megalkotni. Igyekezeteim ellenére ez téves vonalnak bizonyult, ugyanis annak az alacsonyabb elemszámú számítási hálónak, mely még számítási időben ésszerű határokon belül megvalósítható, a minősége olyan gyenge volt, hogy a próbafuttatások folyamán láthatóvá vált, hogy nem ad reális eredményt.

Ezért úgy döntöttem, hogy a Gambit nevű szoftverre váltok, ahol először elkészítem a modell kétdimenziós jó eredményeket adó változatát, majd a program segítségével kihúzom a kétdimenziós geometriát és hálót, háromdimenziós modellé. A Gambit szoftverben tehát lehetőség van mind a szükséges geometria elkészítésére, mind a számítási háló létrehozására.

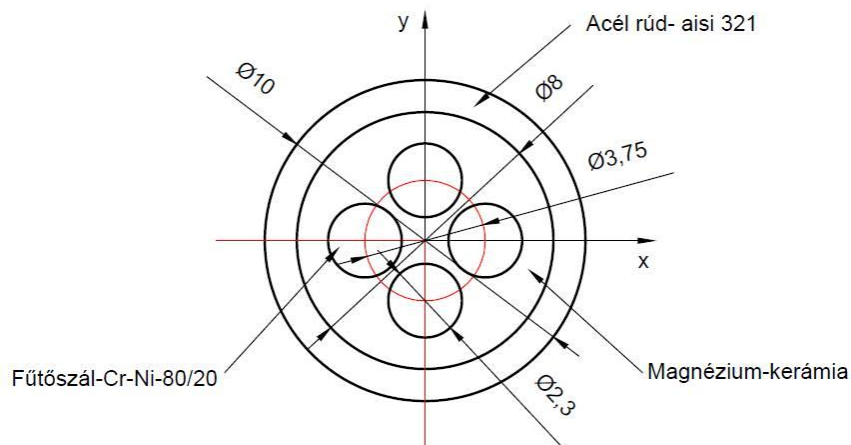
A 2D modell elkészítése során is, első megközelítésben a valós vizsgálati térhez egy igen közelálló geometriát készítettem el, amelyet a Fluent modulba importálva megvizsgáltam, hogy mekkora mértékű vizsgálati tér csökkentés lehetséges, anélkül, hogy az befolyással lenne a kialakuló jelenségekre. Az elkészített geometria a 18. ábrán látható.



18. ábra: Valóságos vizsgálati tér geometriája 2D-ben

A szélcsatornában vizsgálati tartomány üvegfallal van körbevéve, ahol a csatornába helyezett áramlásrendező elemekkel, minél egyenletesebb, lamináris áramlás létrehozására van kiképezve. A tartomány $500 \times 500 \text{ mm}$, melynek a közepén helyezkedik el a furatokban a fűtött rúd. A vizsgálati tartományt különböző térrészekre bontottam a jobb hálózhatóság érdekében. Abban az esetben ugyanis, ha csak a körhenger körüli négyzet alakú térrészt kellene behálózni, a program nem lenne képes jó minőségű hálót generálni, nagyok lennének az egyes cellák között a torzultságok, így a számítás pontatlan lenne. A 18. ábrán vázolt felosztással azonban különböző háló méret és növekedési faktorok beállításával egy jól strukturált hálót eredményez.

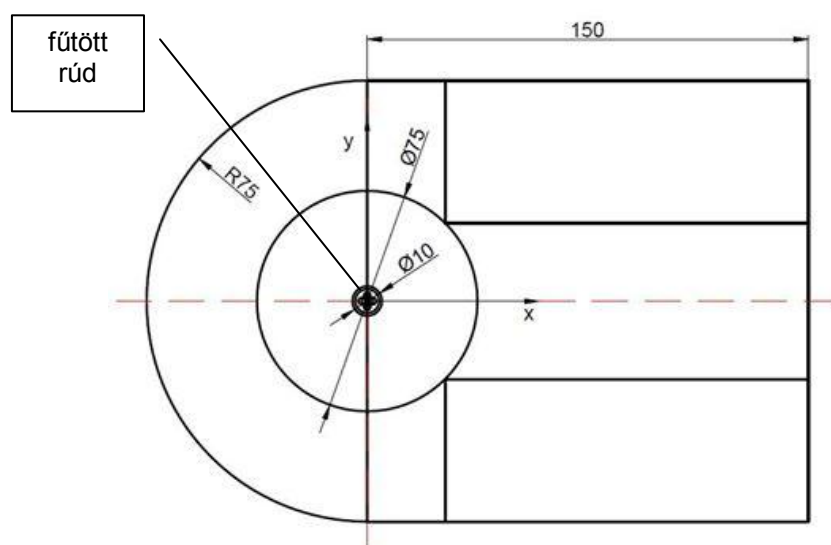
A fűtőszál modellezése annak katalógusbeli adatai alapján történt, melynek geometriai méretei a 19. ábrán láthatóak.



19. ábra: A fűtött rúd felépítése

A későbbiekben a futtatási eredményeknél bemutatom, hogy a numerikus szimulációhoz nincs szükség, ekkora vizsgálati térre, hiszen a rúd előtti térrészben illetve a rúdtól egy bizonyos távolságban már nem zajlanak a vizsgálat szempontjából fontos jelenségek, valamint a fal hatása nem jelentős az örvények kialakulásának szempontjából. Továbbá a kétdimenziós hálót háromdimenziósa kiterjesztve nagyon nagy elemszámot eredményezett, mellyel a számítási idő nagyon hosszú lett volna.

A modellt ennek okán kisebbre választottam, ahol a koordinátarendszer középpontja a henger közepén van, innen a felső és az alsó térrész, valamint a bemenet $7,5d$ távolságra van, míg a tartomány vége, a kimenet $15d$ távolságra. A geometriai kialakításnál három koncentrikus körből álló tartományt készítettem, ahol, ahol a belső kör a fűtött rúd, a középső és a külső félkör a környezetet írja le. A középső kör, illetve a félkör alakú bement kialakítása a jobb hálózhatóság miatt került ily módon kialakításra, míg a mögöttes térrész méretét azért választottam 150 mm -nek, mert a mérések során is csak ekkora térrészt van lehetőség vizsgálni. A kialakított számítási tartomány geometriája a 20. ábrán látható.



20. ábra: A számítási tér geometriája 2D-ben

4.1.2. A numerikus háló

A következő lépés a megrajzolt geometria véges térfogatokra bontása, amelyekből a numerikus háló épül fel. A térfogatokat alkotó felületelemek cellacsomópontokból, vonalakból és felületközéppontokból állnak.

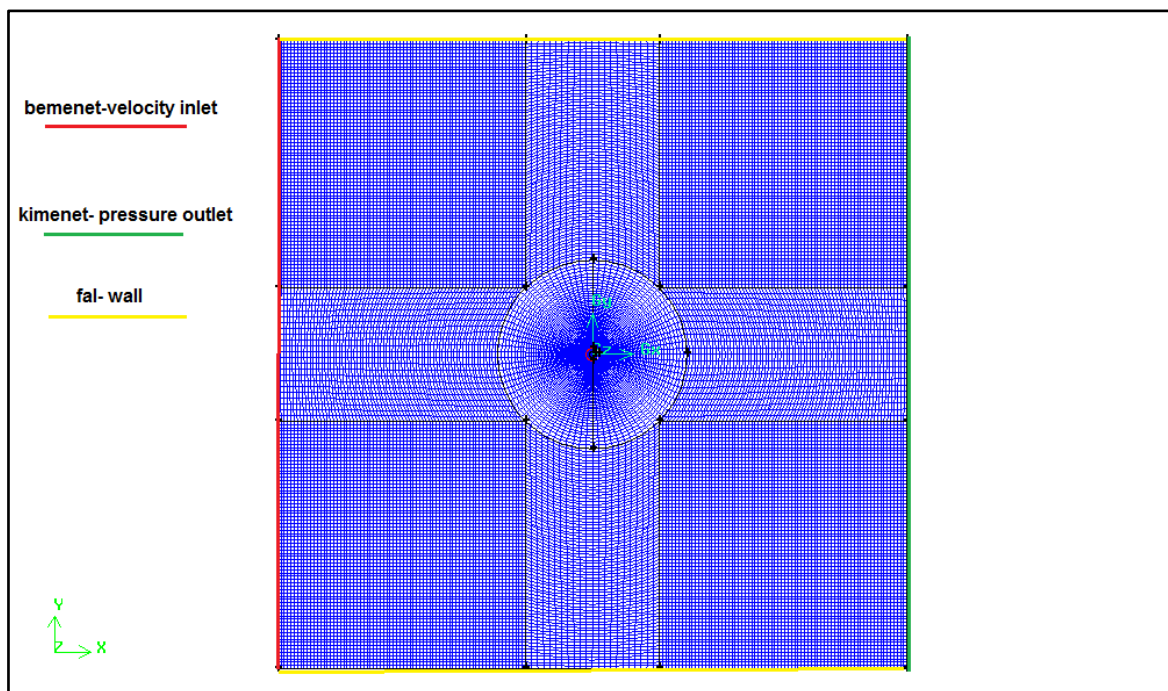
A numerikus háló elkészítése során arra törekedtem, hogy a számítások tárgyát képező körhenger körüli tér hálója minél egyszerűbb elemekből legyen felépítve, egyrészt a számítási pontosság, másrészt a számítási igény csökkentése érdekében.

A háló kialakítása során arra törekedtem, hogy ahol nagy gradiensekre lehet számítani, a hőmérséklet és sebességmező minél részletesebb meghatározására kell törekedni ott a hálót sűrűbbre készítettem, illetve kerültem, az egymást követő cellák mérete közötti hirtelen méretváltozást, mert ez hibát okozhat a számításban. Ugyanakkor nem célszerű mindenhol sűrű rácsot alkalmazni, mert az csak fölöslegesen megnövelné a számítási folyamat idejét, miközben feltételezhetően nem lenne nagy hatással a végeredményre. Ezért a háromdimenziós modell elkészítése előtt a kétdimenziós modellen, szimulációk lefuttatásával háló sűrűség vizsgálatot végeztem, hogy megtudjam, mekkora az a legkisebb elemszám, amelynél még a szimuláció még reális eredményt ad.

A hálózás sűrűsége a henger közvetlen közelében és a nyomdokában magas, majd a hengertől távolodva a tartomány határai felé egyre ritkább. A számítási tartományt több résztartományra, osztottam, hogy szabályosabb hálót tudjak készíteni. A henger körül O gyűrűs hálózási módszert alkalmaztam, ahol a körök éleire előírtam elemszámot. A rudat körülvevő gyűrű átmérője $7,5d$ nagyságú, míg a számítási tartomány széleként szolgáló nagyobb fél gyűrű $7,5d$ sugarú. A felezővonalakra növekedési függvényt írtam elő. Ezt követően tartomány többi részét ehhez igazítottam. Mindezt a korábban bemutatott geometriai tartományokra alkalmaztam.

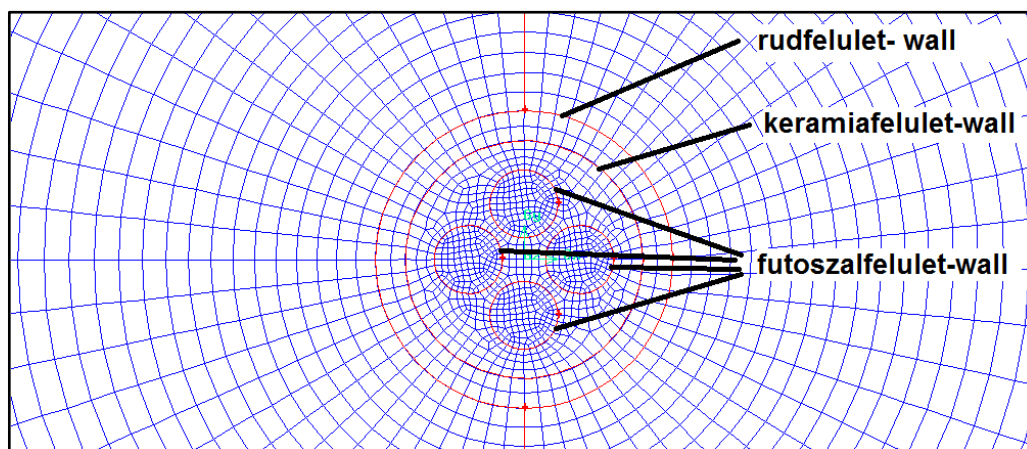
A számítások megkezdése előtt bizonyos kikötéseket kellett tenni, melyek a tartomány határfelületein biztosítják a differenciálegyenletek egyértelmű megoldását. A Fluent-ben a különböző peremfeltételi zónákra rendelkezésre állnak peremfeltételi csomagok.

A valóságos mérési térnek megfelelő geometria számítási hálója a 21. ábrán látható, ahol bejelöltem az egyes peremfeltételek beállításához létrehozott peremfelülteket (2D-ben élek), melyekre a Fluent programban beállításra kerülnek a peremfeltételi csomagok, és beállításra kerülnek a kezdeti értékek.



21. ábra: Valóságos mérési tartomány- Számítási háló

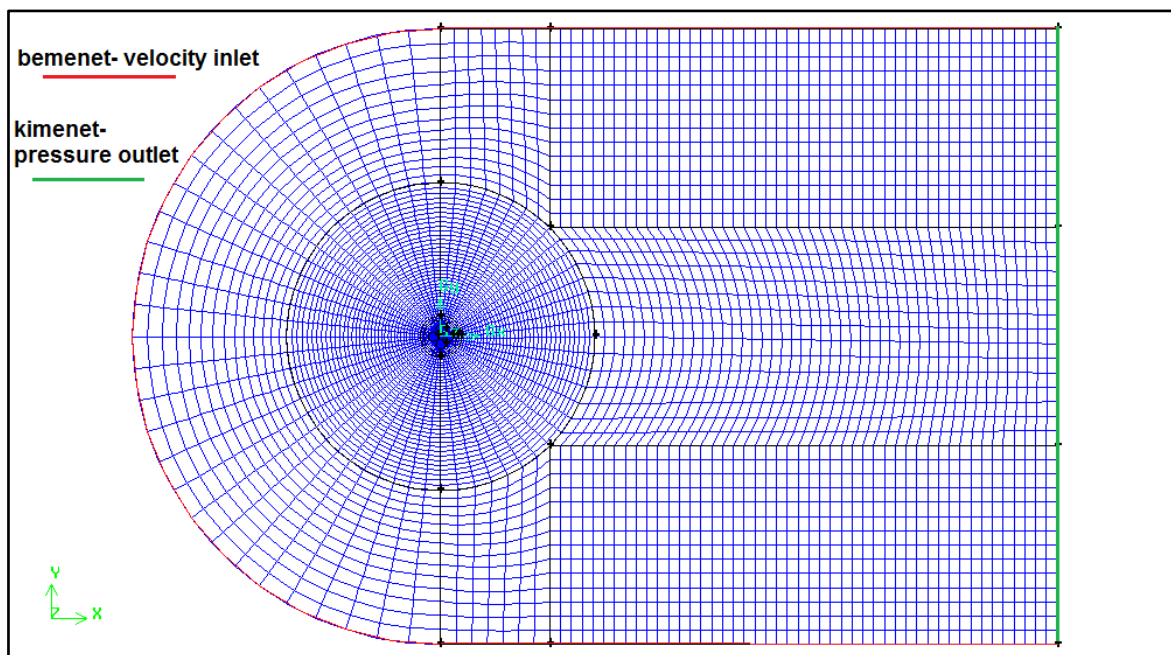
A koordinátarendszer középpontja a kör középpontjában van, a leáramlás az x irányában történik. A henger közelében sűrűbb a hálózás, mint a hengertől távol. A 22. ábrán a hengerhez közeli rész hálózása látható, valamint az itt beállított peremfelületeket.



22. ábra: A fűtött rúd számítási hálója és a beállított peremfelületei

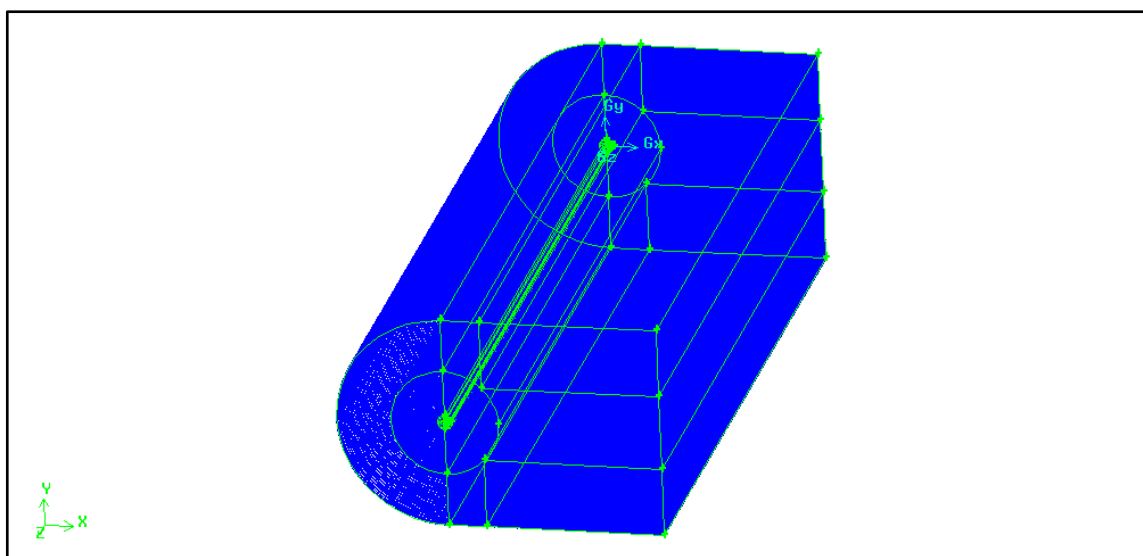
A háló hexa típusú, a rúdon belül pave típusú, míg a körülötte lévő térrészben négyzetes map típusú. A számítási tartomány 39.034 elemet tartalmaz.

A háromdimenziós modell alapjául szolgáló kétdimenziós számítási tartományon alkalmazott numerikus háló és a beállított peremfeltételek a 23. ábrán látható.



23. ábra: A számítási háló 2D-ban

A rúd mögöttes téglalap alapú térrész alsó és felső felületét velocity inlet típusúnak állítottam be, elkerülve azt, hogy befolyással legyen a rúd mögött kialakuló örvényekre, hiszen itt a valóságban nincs fal. A rúd környezetében ebben az esetben is sűrűbb hálót alkalmaztam, mely a számítási tartomány szélei felé növekszik. A háló típusai megfelelőek az előző modellben vázoltakhoz. A számítási tartomány 5.740 elemet tartalmaz. A hálót 500 mm hosszan kiextrudálva három dimenzióba a 24. ábrán látható numerikus számítási hálót kaptam.



24. ábra: A 3D modell számítási hálója

A véges térfogatelemek száma 2.870.000 a hálómínőséget jellemző paraméter: 0,478. A peremfelületeknek értelemszerűen a 22, 23-ik ábrákon bejelölt élnek megfelelő felületek kerültek megjelölésre. A nem megjelölt felületeket a program az azonos anyagú térrészek között automatikusan 'interface'-ként kezeli, ezzel

gyakorlatilag összekapcsolva a két térfogatot, ahol a megoldás során képes a program gond nélkül átszámolni a térfogatok között. A peremfelületeken túlmenően beállítottam az egyes térfogatok típusát is, így a rúd és azon belül a kerámia és a fűtőszálak anyagát solid, míg a környező térrészek típusát fluid típusúnak állítottam be, hiszen a henger körül levegő áramlik a szélcsatornában.

A végleges 3D modell kiválasztását 2D-ban hálózékonyság vizsgálat előzte meg. A három dimenzióban 1,5 millió elemszámú hálót eredményező kétdimenziós hálón elvégzett futtatások még nem mutattak reális eredményeket. Ellenben az alkalmazott 2,8 millió elemszámú háló kétdimenziós változata közel olyan jó eredményeket mutatott, mint a három dimenzióban 6 millió elemszámot eredményező kétdimenziós változat. Ezért a számítási idő csökkentése érdekében a 23. és 24. ábrákon bemutatott háló került alkalmazásra.

4.2. A szimuláció

A vonatkozó alapegyenleteket számítására Ansys programcsomag Fluent modulját használtam, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza.

Az áramlás alapegyenletei a következők:

- A folyékony kontinuum mozgását leíró Navier-Stokes mozgásegyenlet összenyomhatatlan newtoni közeg esetén:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tilde{t}} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v}, \quad (4.2.1.)$$

ahol a $\vec{v}$ a sebességvektor, $\tilde{t}$ az idő, az $\vec{f}$ a nehézségi erőter tömegegységre vonatkoztatott intenzitása, ρ a folyadék sűrűsége, p a nyomás.

- A tömegmegmaradást kifejező kontinuitási egyenlet differenciális alakja összenyomhatatlan közeget feltételezve:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0. \quad (4.2.2.)$$

- A fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálatánál a termikus jelenségekkel is foglalkozunk, ezért szükséges az energiaegyenlet differenciális alakja is:

$$\rho \frac{de_B}{d\tilde{t}} + p(\nabla \cdot \vec{v}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \phi_Q + \phi_D, \quad (4.2.3.)$$

az egyenletben e_B az áramló folyadék tömegegységére vonatkoztatott fajlagos belső energiáját, λ a hővezetési tényezőt, ϕ_D a hővé disszipált fajlagos mechanikai energiát, a ϕ_Q pedig a termodinamikai rendszerrel időegység alatt közölt (vagy elvont) hőt jelöli (Czibere,1998). [1]

A háló generálását követően beolvasásra került a Fluentbe, ahol első lépésben egy skálázást kellett végrehajtani, melynek során a háló méretei milliméter

nagyságrendűre lettek beállítva, ugyanis a Gambit program egységekben dolgozik.

A Fluent programban a szimuláció beállítása során, megadásra kerültek a számítások alapját képező egyenletek megoldó modelljei, továbbá a Gambit szoftverben beállított térfogatok anyagjellemzői, valamint a megjelölt peremfelületekre a peremfeltételek, majd az inicializálás során az egyes térfogatokat feltöltötte a program a kezdeti értékekkel. Végül az iteráció során a program megoldja a vonatkozó egyenleteket.

A megoldó modelleknél minden esetben lamináris áramlásra időfüggő számítást alkalmaztam másodrendű implicit formulával. A mozgás és energiaegyenletek számításához másodrendű eljárást alkalmaztam. A gravitációs erőhatás minden esetben beállításra került.

Az fűtött rudat felépítő anyagok esetén a következő anyagjellemzők kerültek beállításra, melyek a katalógus adatai alapján lettek megadva:

- acél köpeny-aisi321:
 - sűrűség: 7900 kg/m^3
 - fajhő: 500 J/kg
 - hővezetési képesség: $16,3 \text{ W/(mK)}$
- magnézium-kerámia:
 - sűrűség: 3400 kg/m^3
 - fajhő: 880 J/kg
 - hővezetési képesség: 9 W/(mK)
- fűtőszál- CrNi-80/20:
 - sűrűség: 8300 kg/m^3
 - fajhő: 500 J/kg
 - hővezetési képesség: 15 W/(mK)

A fűtőszálak hőforrásnak lettek beállítva, ahol első megközelítésben a rúd térfogatára vetítve 600 W -nak megfelelő hő teljesítmény került beállításra W/m^3 dimenzióban, amely 10^7 nagyságrendű. A próbafuttatások tapasztalatai alapján azonban annak érdekében, hogy a számítási időt csökkentsem és a rúd hamarabb felmelegedjen a kívánt hőfokra a nagyságrendet eggyel növeltem 10^8 -ra. Ez nem befolyásolta az eredmények pontosságát, hiszen a cél az volt, hogy a rúd felületi hőmérséklete átlagban 300 °C -os legyen, és azzal, hogy ezt a futtatás során hamarabb eléri, nem befolyásolja a mögöttes tartományban kialakuló jelenségeket.

A legtöbb kutatásban a fűtött körhenger vizsgálatánál az áramló közeg viszkozitásának és sűrűségének hőmérséklettől való függését általában

elhanyagolja. A fűtött körhengernél, ahol a környezet és a hengerfelület átlagos hőmérséklete közötti különbség kicsi, a közeg állapotjelzőinek hőmérsékletfüggősége általában elhanyagolható, de nagyobb különbségek esetén figyelembe kell venni, hogy a közeg tulajdonságai a hőmérséklet hatására megváltoznak. Ez jelentős hatással van a közeg jellemzőire és az áramlás jelensége sokkal bonyolultabbá válik. Mérésekkel bizonyították, hogy a henger hőmérsékletének növelésével a folyadék kinematikai viszkozitása megváltozik és jelentősen befolyásolja a helyi Reynolds-szám értékét az áramlási térben, különösen a fűtött henger közelében. Fűtött henger esetén fontos kérdés az áramló közeg állapotjelzőinek hőmérsékletfüggése. Számos kutató arra a következtetésre jutott, hogy a sűrűség változása a fűtött henger körüli áramlásnál fontos szerepet játszik az örvényleválás jelenségénél, míg más kísérleti tanulmányok azonban azt találják, hogy a folyadék kinematikai viszkozitásának változása a legfontosabb befolyásoló tényező. [16]

A közeget egyes kutatásokban összenyomhatónak tekintik, míg másokban összenyomhatatlannak, vagyis a közeg sűrűsége nem függ a nyomástól, és elhanyagolják a helyi sűrűségváltozást is a kontinuitási egyenletben ($\partial \rho / \partial t$), miközben a számításaikban a folyadék többi tulajdonsága a hőmérséklettől függ. Az általam vizsgált levegőáramlásnál kicsi a Mach-szám ($Ma = u_\infty / a < 0,015$, ahol a a hangsebesség levegőben), ebből következik, hogy a nyomásból származó összenyomhatóság elhanyagolható. [16]

A számításoknál a kis Mach szám miatt a közeget összenyomhatatlannak tekintettem, ám kísérleteztem többféle beállítással két dimenzióban, keresve ezzel a legideálisabb, a valóságos jelenségeket legjobban visszaadó megoldó sémát. Fontos volt, hogy a háromdimenziós modellre már a megfelelő beállításokat ültessem át, hiszen 3D-ben a számítási idő igen nagy.

Két dimenzióban lefuttattam a modellt 'density based' módban, ahol a levegőt összenyomható ideális gáznak állítottam be, valamint a 'pressure based' módban, ahol az áramló közeget összenyomhatatlan ideális gáznak definiáltam. A levegő viszkozitásának változását minden esetben 'Sutherland' törvény szerint számításra állítottam be egy tanárom javaslatára. A két eredmény között lényeges eltérés nem jelentkezett, így a 3D modellben a 'pressure based' módot, összenyomhatatlan ideálisgáz beállítást alkalmaztam.

A peremfeltételek megadásánál a Gambit szoftverben beállított bementre a 'velocity inlet' felületre 0,3 m/s belépő sebességet adtam meg, ami a mérések során a szélcsatornában beállított szélesebesség.

A sebesség nyomás kapcsolat számítására a 'simple' módszert, a nyomás interpolációjára pedig a 'Second order' módszert alkalmaztam.

A számítás során monitoroztam a reziduálokat, ahol a konvergencia kritériumokat kikapcsoltam, hogy egy időlépésen belül a beállított iteráció számot végig futtassa a program. Továbbá monitort tettem a rúd felületére, ahol a helyi átlaghőmérséklet növekedését követtem nyomon, valamint felhajtóerő és ellenállás tényezőre is, ahol ezek változásából láthattam, hogy mikor alakult ki a szélcsatornában a stabil áramlás. Ezeknek értékeit fájlba is kiíratam a későbbi megjelenítés céljából, ahol ellenőrizhettem, hogy a beállított időlépcső megfelelő volt e, hiszen ezek grafikonjain az örvényleválás frekvenciáját le lehet olvasni. Lényeges volt a referencia értékek pontos beállítása, mert ezek alapján számítja a program az előbb említett tényezőket.

Az inicializáció során a program feltöltötte a modellt kezdeti értékekkel. Itt az inicializáció után 'patch'-elést alkalmaztam a fűtőszálak térfogatára, ahova 300 °C írtam elő kezdeti értéknek, ezzel is gyorsítva a szimulációt.

A szimuláció időlépcsőjét az rúdra számított örvényleválási frekvenciára alapozva választottam meg. Egy korábbi kutatás szerint (Baranyi és társai, 2009), az örvényleválási frekvencia jelen esetben $fr \cong 4,85 \text{ Hz}$ figyelembe véve mindkét oldalon periodikusan leváló örvénykötegeket. A PIV kamera rögzítési frekvenciája 15 Hz, ami háromszor nagyobb, mint az örvényleválás frekvenciája egy örvényköteg esetén, így alkalmas arra, hogy minden egyes örvényről képet készítsen. [7]

A szimulációhoz, tehát a PIV kamera rögzítési frekvenciáját, 15 Hz-et vettem alapul, ahol 1 periódus $\approx 0,06 \text{ s}$, így egy perióduson belül 10 pontot számítva, az időlépcsőnek 0,006 s-ot választottam. Egy 'time step'-en belül a 2D próbafuttatásokra támaszkodva 150 iterációt választottam.

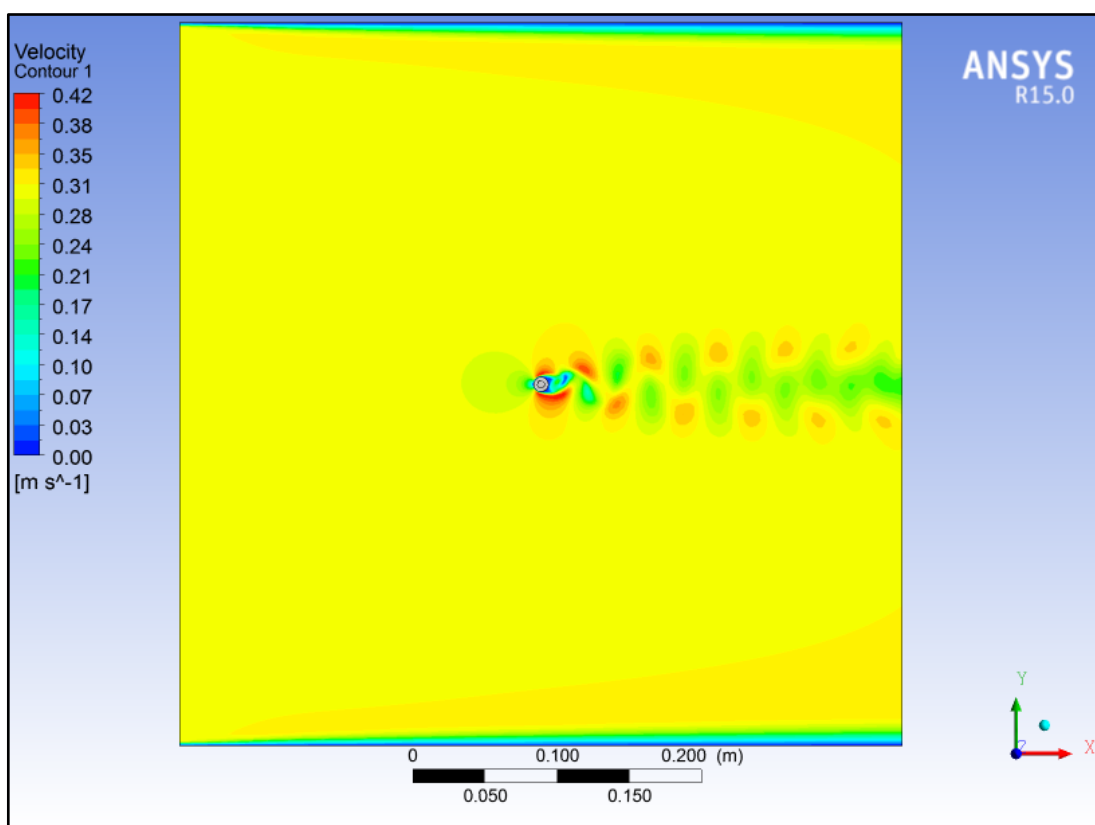
5. Eredmények

A kétdimenziós szimulációk az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékének műhelycsarnokában található számítógépes laborban készültek el. A háromdimenziós modell nagy számítási igénye miatt a Tanszék egy nagyteljesítményű számítógépén került lefuttatásra, mely egy TYAN TX46 típusú négyprocesszoros munkaállomás processzoronként 2 maggal (8 core, 32 GB memória). Az Ansys program Akadémiai változatában egy licenszhez 4 magot voltam jogosult használni, így a szimuláció során párhozamosan 4 processzor dolgozott, 12 Gb memóriát felhasználva az egyenletek kiszámításán. A számítás időigénye 7 nap volt.

A következőkben bemutatom a kétdimenziós szimulációk során kapott eredményeket, valamint összevetem a háromdimenziós szimuláció eredményeit a már meglévő mérési eredményekkel.

5.1. 2D szimuláció-valóságos mérési tér

A valóságos mérési tér szimulációjával az volt a célom, hogy megfigyeljem, hogy kialakulnak a beállítások megfelelőek e, kialakul a várt eredmény a rúd mögötti térrészben, valamint, hogy megfigyeljem, hogy a szélcsatorna alsó és felső falának hatása meddig van hatással az örvények kialakulására a csatornában. A 25. ábrán a kialakult sebességmező látható. A skálán feltüntetett értékek m/s mértékegységben értendők. Az ábrán az áramlás balról jobbra irányú.

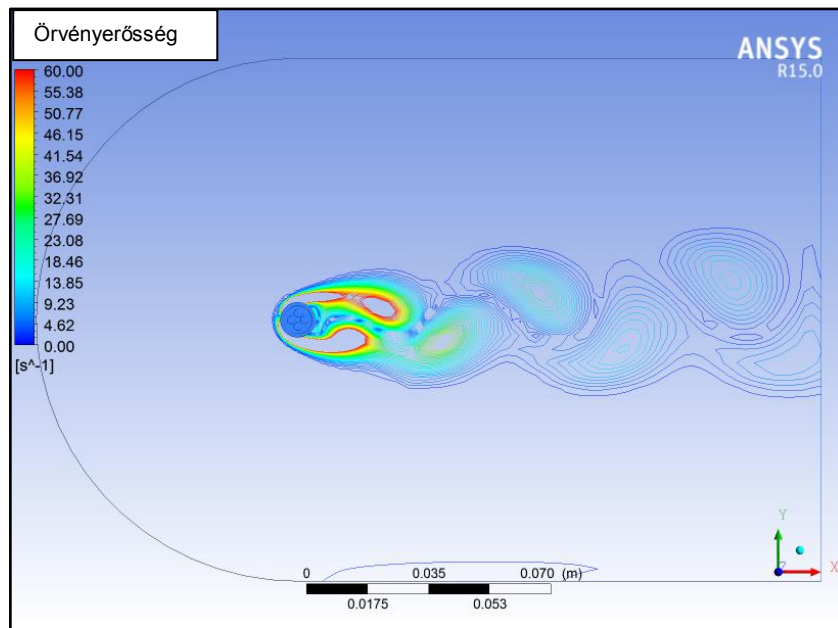


25. ábra: 2D- a valóságos mérési térnek megfelelő modellen kialakuló sebességmező

A sebességeloszlásból látható, hogy a szélcsatorna falán kialakuló határréteg nincs befolyással a rúd mögött kialakuló örvénysorra, így a tartomány csökkentése nem okoz hibát az eredményekben.

5.2. 2D szimuláció csökkentett számítási tartomány

A háromdimenziós modellé kihúzott kétdimenziós számítási tartomány az előző modellhez képest kisebb méretekkel ezáltal kisebb háló elemszámmal rendelkezik, így rövidebb számítási idővel zajlott le. A kapott eredmények jónak bizonyultak, hiszen a 26. ábrán jól látható módon a fűtött rúd mögött kialakult a Kármán-féle örvénysor, az örvényeloszlással szemlélítve. Az ábrán az áramlás balról jobbra irányú.

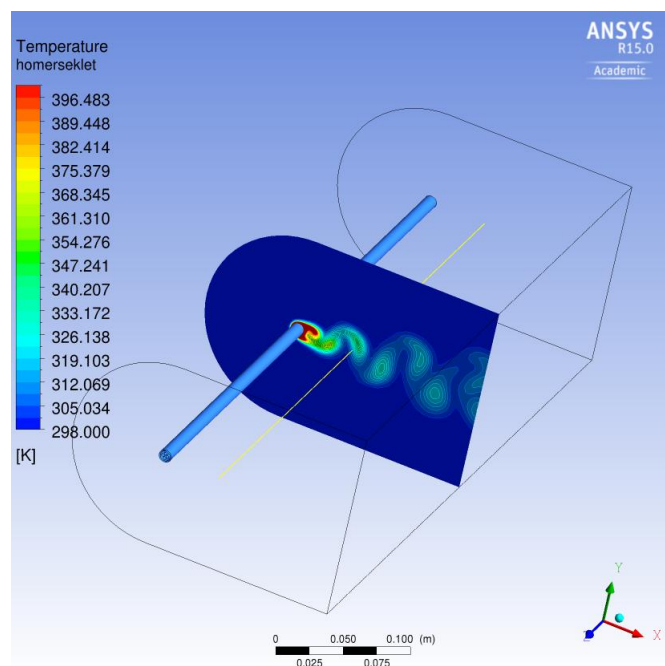


26. ábra: A fűtött rúd mögött kialakuló Kármán-féle örvénysor

A kapott eredmények, ezáltal az alkalmazott beállítások két dimenzióban jónak bizonyultak, így a modellt extrudáltam és azonos megoldókkal futtattam három dimenzióban is.

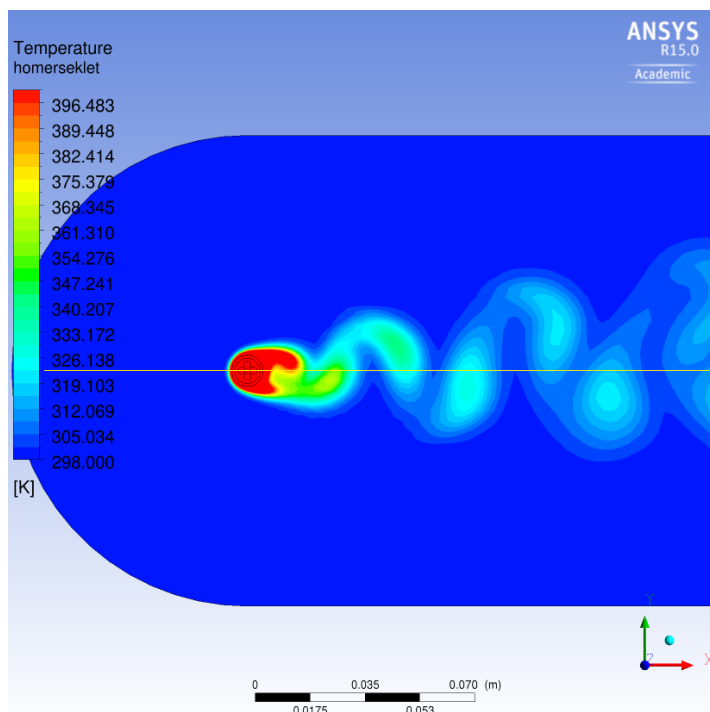
5.3. A 3D modell eredményeinek kiértékelése

A háromdimenziós modellben nyert eredményeket az Ansys programcsomag CFD-Post moduljában értékeltem ki. Első lépésben a rúd közepénél ($z=0,25$ m) létrehoztam egy síkot, melyen megjelenítettem hőmérséklet, valamint az örvényeloszlást. A 27. ábra a létrehozott sík helyzetét szemléletesen mutatja, ahol az adott sík hőmérséklet eloszlása van megjelenítve.



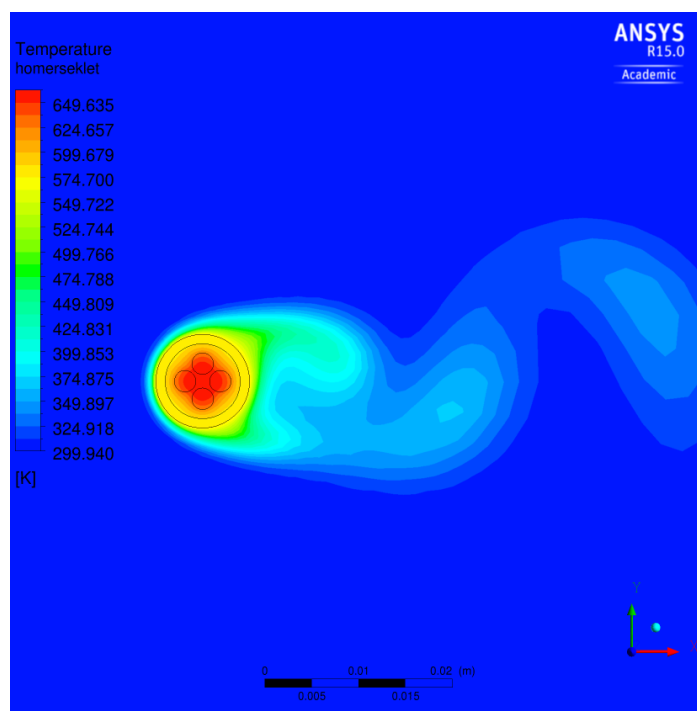
27. ábra: A hőmérséklet eloszlás $z=0,25$ m síkban

A hőmérséklet eloszlás a z tengely irányából nézve a 28. ábrán látható módon alakul, ahol a hőcsomagok helyzetének jobb láthatósága miatt a maximális hőmérsékletet a skálán alacsonyabbra, 400 K-re állítottam. A számítási tartomány közepén látható vonal mentén az egyes pontokban a lokális hőmérsékletek kiíratásra kerültek a diagramon történő megjelenítés céljából.



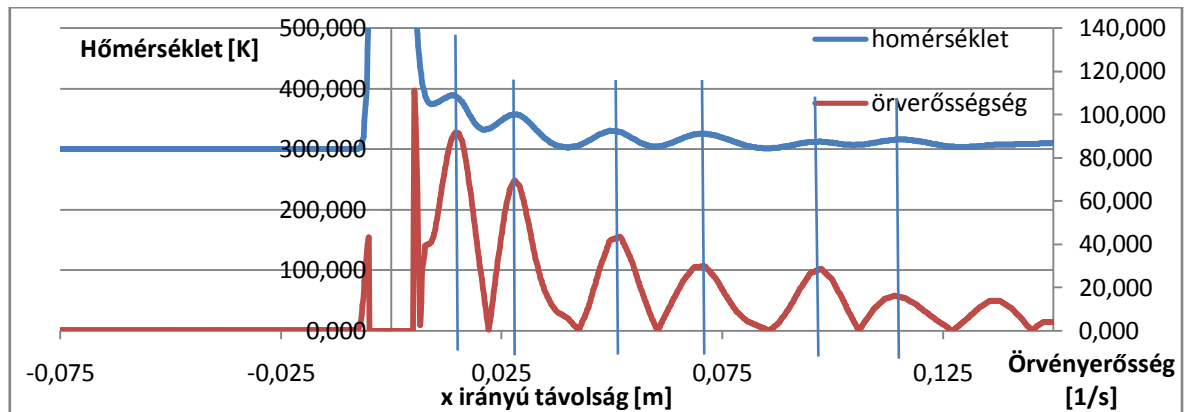
28. ábra: A hőmérséklet eloszlás a $z=0,25\text{m}$ síkban a Z-tengely irányából nézve

A fűtött rúdon belüli hőterjedés a 29. ábrán követhető nyomon. A rúd felületének átlaghőmérséklete megközelítőleg 573 K.



29. ábra: A fűtött rúdon belüli hőterjedés

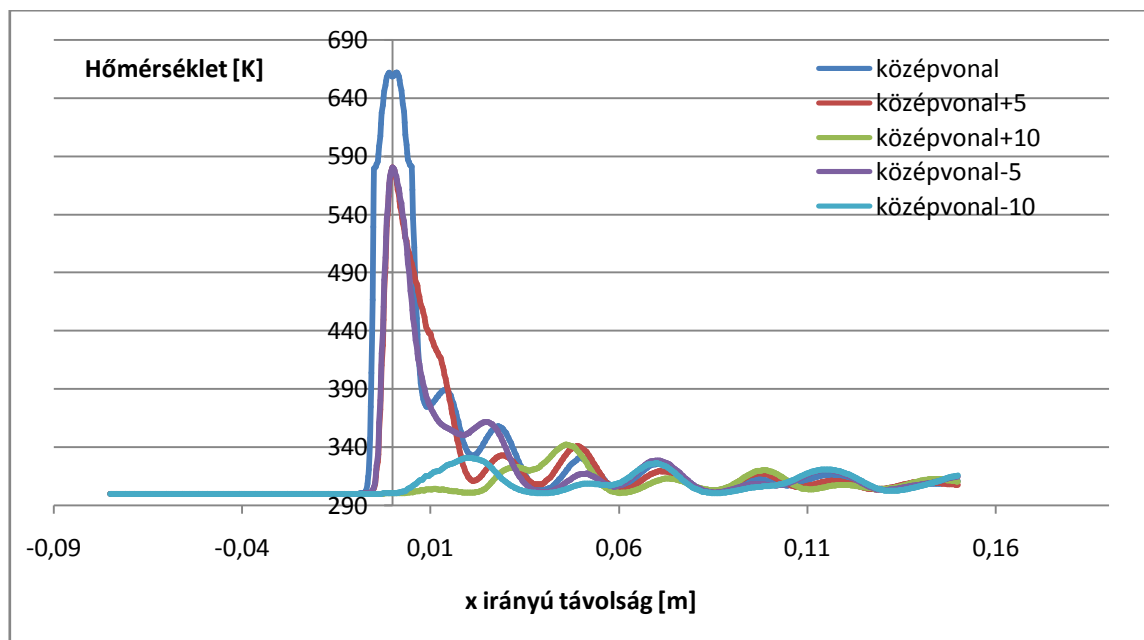
Az 1. diagramon, ahol a rúd hossz tengelyére merőlegesen a $z=0,25\text{m}$, $y=0$, x irányban a teljes számítási tartomány hosszán keresztül kirajzolásra kerültek a lokális hőmérsékletértékek.. A vonal melynek mentén a hőmérsékleteket kirajzoltam a 28. ábrán be lett jelölve. Továbbá ugyanennek a vonalnak a mentén kirajzoltam az egyes pontokban az örvényerősség értékeit is, így láthatóvá téve , hogy az örvények magjai egybeesnek a hőcsomagok legmagasabb hőmérsékletű pontjaival.



1. diagram: A hőcsomagok és örvénymagok egybeesése

A jobb láthatóság érdekében a csúcsok egybeesésének jelölésre függőleges vonalakat húztam be.

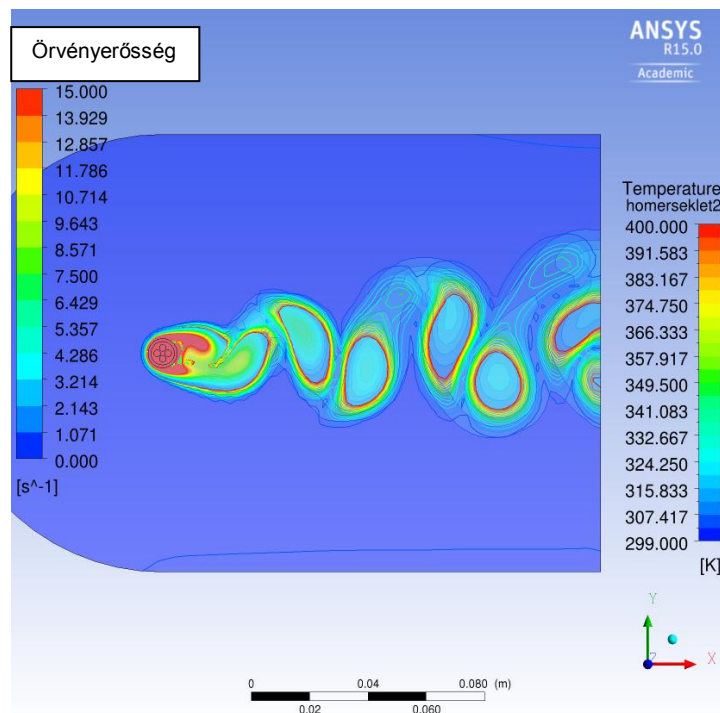
A középvonallal párhuzamosan $y=+5$; $+10$, -5 , -10 mm távolságra lévő vonalak mentén is személtetem a hőmérséklet eloszlást.. A 2. diagramon e vonalak mentén láthatók a henger mögötti tartományon a hőmérséklet értékek [K].



2. diagram: Hőmérséklet eloszlás a középvonalon és tőle $+5$; $+10$; -5 ; -10 mm -re

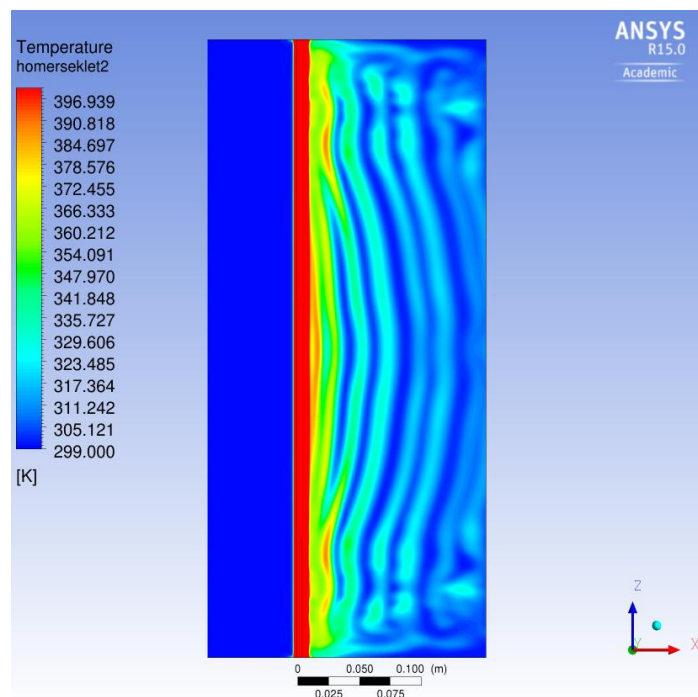
A hőmérséklet eloszlás képet és az örvényeloszlást egy ábrára helyezve jól látható (30. ábra), hogy a rúdról leszakadó hőcsomagok hogyan mozognak együtt

a rúdról leváló örvényekkel. Az örvényeloszlást szintvonalak jelzik. A következő ábrákon az áramlás balról jobbra irányú.



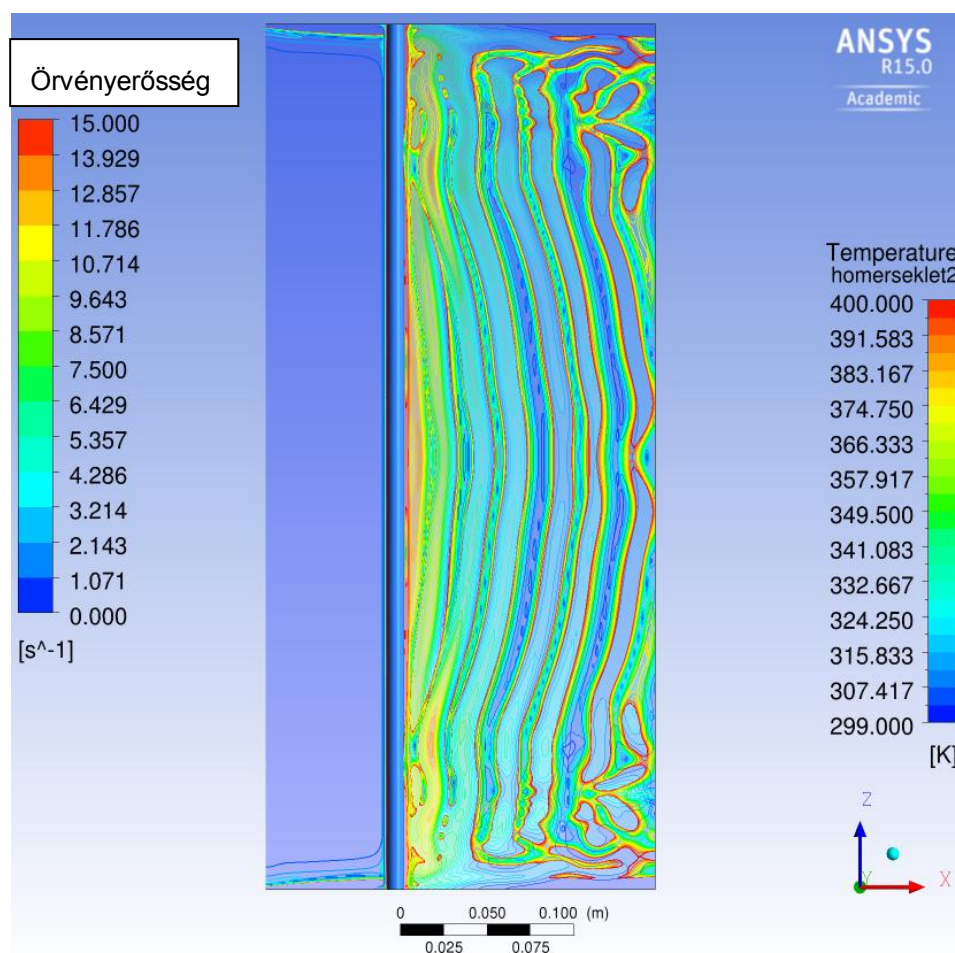
30. ábra: A $z=0,25\text{m}$ síkban a hőmérséklet eloszlás és az örvények kialakulása a fűtött rúd mögött

Ugyanez a jelenség figyelhető meg a rudat hossz tengelye mentén a $z=0$ síkkal elmetszve, ahol már látható a spanwise jelenség is. A 31. ábrán a y tengely irányából látjuk felülnézetből a síkot, ahol a hőmérsékletmező került megjelenésre. A skálán a maximális hőmérsékletértéket 400 K -re állítottam, hogy a rúdról leváló hőcsomagok jobban követhetőek legyenek.



31. ábra: Hőmérséklet eloszlás a $z=0$ síkban

A 32. ábrán hőmérsékletmező kontúrosan kitöltve, míg az örvényesség vonalkontúrral van egy képen jelölve.



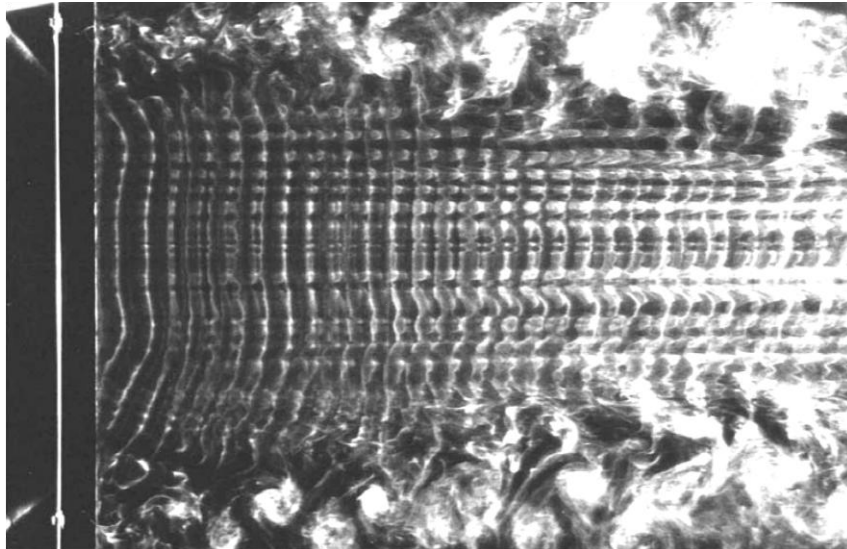
32. ábra: Az örvények helyzete és a hőmérséklet eloszlás felülnézetből

A 32. ábrán is jól nyomon követhető, hogy a hőcsomagok hogyan mozognak együtt az örvényekkel. Továbbá egyértelműen látható a spanwise jelenség, ahol a rúd hossz tengelye mentén az egyes síkokban nem azonos az áramkép. Megállapítható tehát, hogy a beállított alapáramlási sebességnél, valamint az ebből adódó Reynolds-szám esetén megjelennek az áramlásban 3D instabilitások. Amennyiben megfigyeljük az ábrán az instabilitás jellegét hasonlóságot vélhetünk fel 6. ábrán bemutatott 'A módusú' instabilitási képpel. A számított Reynolds-szám értékből az irodalomban fellelhető adatok alapján ez várható is volt.

Azonban a fűtés a kinematikai viszkozitás hőmérsékletfüggésén keresztül befolyással van a kritikus értékre, ahol az instabilitások kialakulnak. A kísérletek a legtöbb esetben fűtetlen rúdra zajlottak, ezért létrehoztak egy olyan transzformációt, melynek segítségével a különböző hőmérsékleten mért eredményeket kapcsolható lehet hozni a fűtetlen hengerek jellemzőivel. Erre több kutatás is született, melyek közül An-Bang Wang és Zdeněk Trávníček munkájukban bevezetnek egy effektív hőmérsékleti konstans szorzó tényezőt, mely a fűtött henger közvetlen közelében a hőmérsékletet a falhőmérséklet és a

távoli hőmérsékletek lineáris kombinációjából adódik, és ennek segítségével bevezetnek egy effektív Reynolds számot is, ami ezen a hőmérsékleten alapul. Ennek segítségével lehetőségük volt összehasonlítani a fűtött és fűtetlen rúd esetén mért adatokat. [17]

Széleskörű szakirodalma van a fűtetlen rúd esetén az instabilitások vizsgálatának, azonban fűtött rúd esetén nem nagy számú ezen munkák száma. A 33. ábrán An-Bang Wang, Zdeněk Trávníček kutatásából egy 300 °C falhőmérsékletű rúd mögött kialakuló instabilitások megjelenítése látható füst segítségével.



33. ábra: An-Bang Wang, Zdeněk Trávníček által megjelenített áramlás 300 °C rúd hőmérséklet esetén [17]

Az általuk megjelenített áramkép ($Re_{eff} = 73$), $Re = 108$ Reynolds-szám esetén látható, ám a hasonlóság az általam készített szimuláció és a szakirodalomban fellelhető áramkép között némileg látható. Az áramlás balról jobbra irányú.

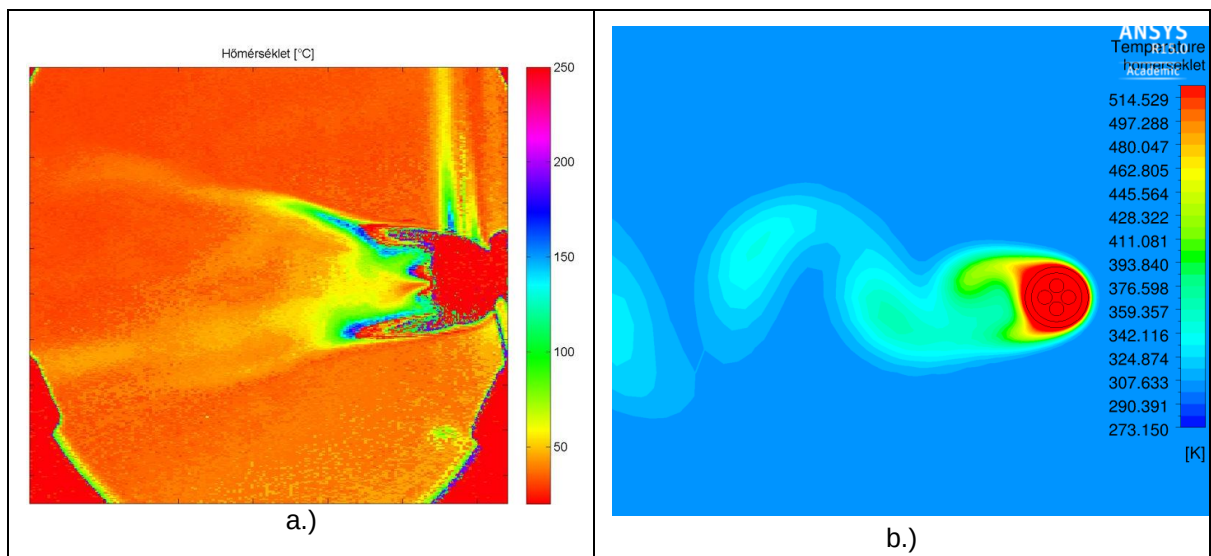
Az ábrákon látható, hogy úgynevezett elliptikus instabilitások jönnek létre az egymáshoz közel lévő örvénymagokban. A örvényhurkok nem lineáris növekedése annak következtében jön létre, hogy az egymást követő örvénymagokon kialakuló deformációk hatással vannak a következő örvénymag kialakulására. Ez az örvények kialakulásnak periodikussága miatt egy jellegzetes mintázatot eredményez. [9]

6. A numerikus szimuláció és a mérési eredmények összevetése

A következőkben összevetem a már eddig lezajlott mérések eredményeit a numerikus szimulációk eredményeivel.

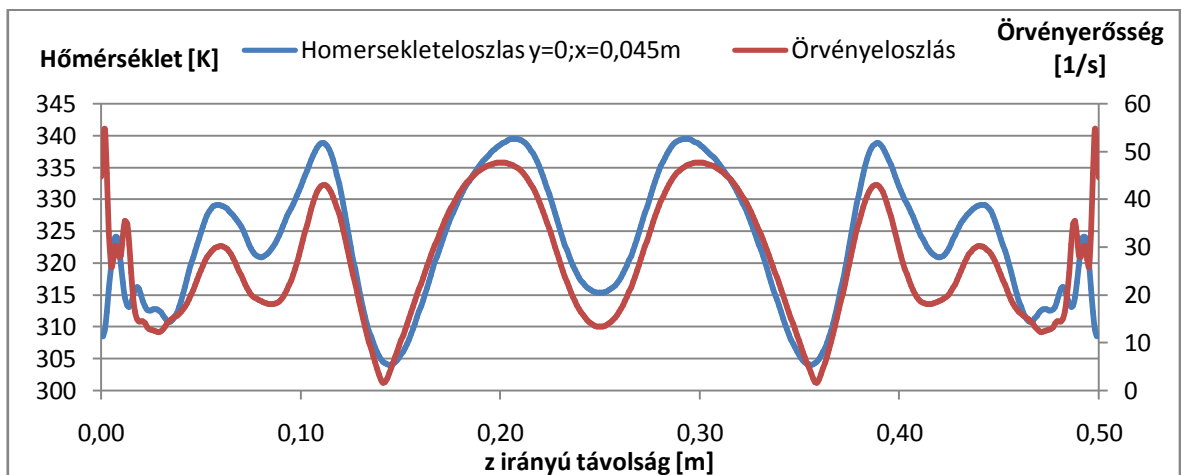
A 3.3. fejezetben ismertetett mérés eredményeképp, a Schlieren mérőberendezéssel készült képeket kiértékelve sikerült megjelenítenünk a rúd mögötti térrészben kialakult hőmérsékletmezőt. A 34. ábrán a bal oldali a.) képen

a Schlieren, még a jobb oldali b.) képen a numerikus szimuláció által nyert hőmérséklet eloszlás látható. Az áramlás az ábrákon jobbról balra irányú.



34. ábra: A Schlieren mérés és a numerikus szimuláció által nyert hőmérséklet eloszlás

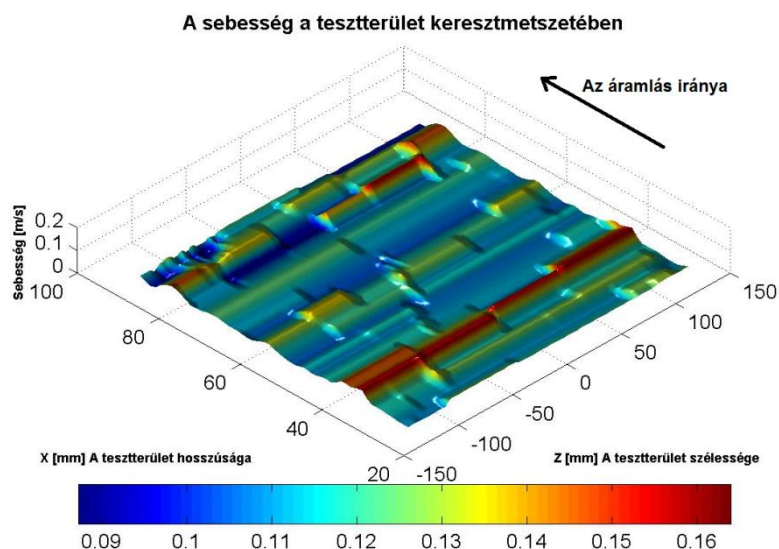
A fűtött rúd mögött kialakuló hőmérsékletmező mutat némi hasonlóságot, ám megállapítható, hogy a Schlieren mérési eljárásnál még javítani kell. Továbbá a spanwise jelenség feltűnésével az áramlásban keletkező 3D instabilitások megzavarhatják a mérést, és ennek következtében nem biztos, hogy pontos eredményt ad. A rúd hossz tengelyének irányában a hőmérséklet változás szemléltetésére egy a rúddal párhuzamos vonalban (27. ábra) egy örvénymagon keresztül kiíratam a hőmérsékletértékeket és az örvényleválási frekvencia értékeket. Ezt szemlélteti a 3. diagram.



3. diagram: Hőmérséklet és örvényleválási frekvencia értékek az $y=0$, $x=0,045m$ vonalon

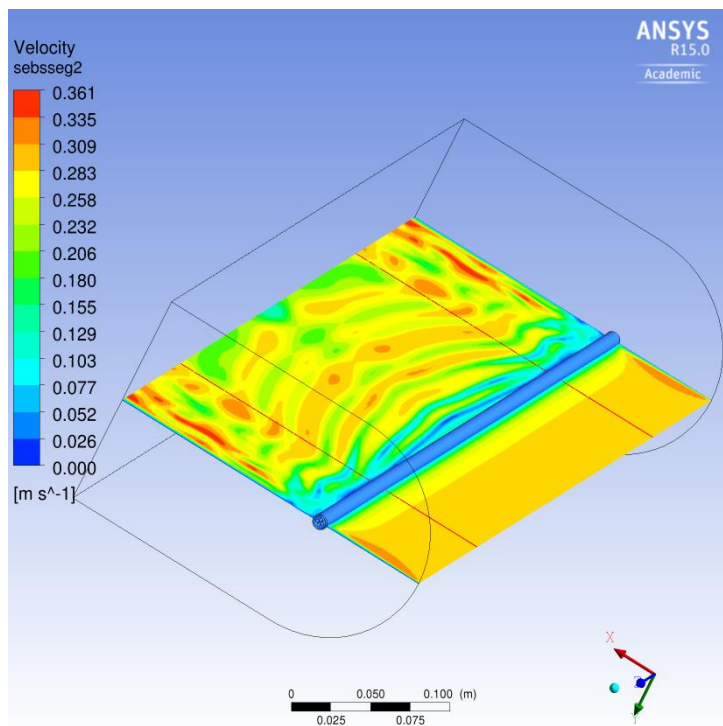
A diagramból látható, hogy a mérési tartományban, az áramlás irányára merőlegesen egy vonalban kiíratott értékekből kitűnik, hogy a rúd hossz tengelyére merőleges síkokban nem egyenletes a hőmérséklet eloszlás. Ennek következtében a Schlieren mérés során kapott adatokban lehetnek hibás értékek, a mérés nem teljesen pontos.

A spanwise jelenség vizsgálatára végzett PIV mérések több síkban történtek, melyek közül a rúd középvonala mentén az xz síkban $y=0$ értéknél, a kiértékelt adatokból megjelenített sebességmező látható a 300 °C-ra fűtött rúd esetén a 35. ábrán.



35. ábra: PIV mérés kiértékelése után nyert sebességkép a 300°C-os rúd mögötti tartományban

A rúd az ábrán nem került bejelölésre, csak a mögöttes térrész látható. Az ábrán nem látható a teljes keresztmetszet, mert az szélcsatorna felé helyezett optika csak ekkora felvételt volt képes készíteni az adott távolságból. A 36. ábrán a numerikus szimuláció által nyert sebességeloszlás látható a mérési tartomány teljes keresztmetszetében. Az áramlási irány a 35. ábrán megjelölttel azonos.



36. ábra: A numerikus szimulációból nyers sebességkép 300 °C-os rúdhőmérséklet esetén

Az áramlás az ábrán balról jobbra irányú. A PIV mérések eredményeiből megjelenített tartomány a numerikus szimuláció által nyert sebességeloszlás képen piros vonallakkal került bejelölésre.

A két sebességeloszlás kép között felismerhető némi hasonlóság. A mért eredmények azonban még nem elég pontosak, a mérési eljárásen még fejleszteni kell, melyen jelenleg is dolgozunk.

7. Köszönetnyilvánítás

A Tudományos Diákköri munkám során és a dolgozat megírásához nyújtott segítséget ezúton is hálásan köszönöm konzulensemnek, Bencs Péternek. Továbbá köszönöm a munkám során és a dolgozat elkészítéséhez adott hasznos tanácsokat Prof. Dr. Szabó Szilárd Tanszékvezető Úrnak, Dr. Baranyi László Tanár Úrnak, Dr. Bolló Bettinek, Fodor Bélának. Valamint Tatár Dávidnak és Laci Gábor barátomnak.

A kutató munka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák Kiválósági Központban, annak támogatásával készült.

8. Irodalomjegyzék

- [1] Bolló Betti:
Fűtött körhenger körüli áramlás és hőátvitel numerikus vizsgálata;
PhD értekezés, Miskolc, 2013
- [2] Ferziger, J. H., Peric, M.:
Computational Methods for Fluid Dynamics;
Springer, 2002
- [3] Bolló B, Janiga G, Baranyi L:
Homogén folyadékáramlásba helyezett rezgő körhenger körüli áramlás vizsgálata;
Elektronikus műszaki füzetek 2012:(11) pp. 483-489. (2012)
- [4] Van Dyke, M.:
An Album of Fluid Motion; The Parabolic Press;
Stanford, 1982
- [5] Wikipédia:
Kármán-féle örvénysor;
http://hu.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1nf%C3%A9le_%C3%B6rv%C3%A9nysor;
- [6] Baranyi László:
Mozgó henger körüli lamináris áramlás vizsgálata;
Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetek, Miskolc, 2007
- [7] Bencs Péter, Szabó Szilárd, Bordás Róbert, Zähringer Katharina, Thévenin Dominique:
Simultaneous Measurement of Velocity and Temperature Downstream of a Heated Cylinder;
In: ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP 2011)
- [8] Barkley, D., Henderson, R.D.:
Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder;
Journal of Fluid Mechanics, 1996, Volume 322, p. 215-241.
- [9] C.H.K Williamson,
Three-dimensional wake transition;
Cambridge University Press, J.Fluid Mech. 1996, vol 328, pp 345-407.

- [10] Prof. Dr. Paripás Béla, Prof. Dr. Szabó Szilárd, Kocsisné Dr. Baán Mária, Dr. Tolvaj Béláné, Bencs Péter:
Lézeres mérési- és megmunkálási eljárások a gépészetben,
- [12] P. Bencs, Sz. Szabó, D. Oertel:
Simultaneous measurement of velocity and temperature field downstream of a heated cylinder;
Proc. International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2012, Rijeka, Croatia (2012), pp. 205-209. (ISBN:978-953-6326-77-8)
- [13] Bencs Péter, dr. Szabó Szilárd:
Instacionárius léghőmérsékletmező mérési lehetőségeinek fejlesztése,
GÉP (ISSN: 0016-8572) LXIII.: (1.) pp. 27-30. (2012)
- [14] <http://www.aht.uni-miskolc.hu/a-tanszek-bemutatasa/a-tanszek-oktato-kutato-berendezesei-eszkozei/>
- [15] FLUENT 6
Theory Guide;
Fluent Inc. 2001
- [16] Bolló Betti:
Fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálata
GÉP 63:(1) pp. 31-34. (2012)
- [17] An-Bang Wang, Zdeněk Trávníček:
On the linear heat transfer correlation of a heated circular cylinder in laminar crossflow using a new representative temperature concept;
International Journal of Heat and Mass Transfer - INT J HEAT MASS TRANSFER 01/2001