



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Önálló laboratórium NT2 beszámoló

**CFD MODELLFEJLESZTÉS ÉS VALIDÁCIÓ EGY SMR
PÁLCAKÖTEG PIV KÍSÉRLETI EREDMÉNYEIVEL**

Székely Norbert

2024 őszi félév

Fizikus Msc. II. évfolyam

Témavezető: dr. Orosz Gergely Imre, BME NTI

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. A kutatás célkitűzései	4
1.2. CFD módszerek alkalmazása	4
1.3. Hálózási módszerek	7
1.4. 3x3-as pálcaköteg szubcsatornái	9
1.5. Távtartórács geometriák	9
2. PIV kísérlet rövid bemutatása	12
3. CFD modellek bemutatása	16
3.1. Végtelen hosszú pálcaköteg – VHP	16
3.1.1. Geometria	16
3.1.2. Diszkretizálás	17
3.1.3. VHP – CFD számítás eredményei	19
3.2. Non Vane Grid – NVG	24
3.2.1. Geometria	24
3.2.2. Single Spacer diszkretizálás	24
3.2.3. Single Spacer - CFD számítás eredményei	25
3.2.4. Two Spacer diszkretizálása	30
3.2.5. Two Spcaer - CFD számítás eredményei	31
3.2.6. Full Bundle diszkretizálása	33
3.2.7. Full Bundle - CFD számítás eredményei	35
3.3. Mixing Vane Grid – MVG	37
3.3.1. Geometria	37
3.3.2. Diszkretizálás	38
3.3.3. CFD számítások eredményei	38
4. NVG és MVG CFD számításainak összehasonlítása	38
5. CFD és PIV eredmények összevetése	44
6. Következtetések és továbbfejlesztési lehetőségek	48

Nomenklatúra

1. SMR – Small Modular Reactor
2. CFD – Computational Fluid Dynamics
3. PIV – Particle Image Velocimetry
4. BME – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
5. NTI – Nukleáris Technikai Intézet
6. PIROUETTE – (PIv ROd bUndlE Test faciliTy at bmE)
7. MIR – Matching of Index of Refractory
8. LES – Large Eddy Simulation
9. DNS – Direct Numerical Solution
10. RANS – Reynolds Averaged Numerical Simulation
11. CCD – Charge-Coupled Device
12. FEP – Fluorinated Ethylene Propylene
13. VHP – Végtelen Hosszú Pálcaköteg
14. NVG – Non Vane Grid
15. MVG – Mixing Vane Grid
16. RMS – Root Mean Square
17. TRATEL – TRAnsparent Thermal-hydraulics TEst Loop

1. Bevezetés

Mivel az SMR (Small Modular Reactor – Kis Moduláris Reaktor) technológiai fejlődése jelentősen felgyorsult, és ez a reaktorcsalád egyre nagyobb érdeklődés tárgya a nukleáris ipari kutatásokban [1], nélkülözhetetlen termohidraulikai vizsgálat alá vetni az új nyomottvízes reaktor típusú, négyszöggrács elrendezésű üzemanyag-kazettákat.

Több SMR technológia áll fejlesztés alatt, ezek különböző üzemanyagokat, üzemanyag mátrixokat, üzemanyag elrendezéseket (háromszög vagy négyszög elrendezésű), reaktortartály kialakításokat és hűtőközegeket (D_2O , H_2O , sóolvadék stb.) használnak [2]. A meglévő könnyűvízes reaktorok által nyert tapasztalatoknak köszönhetően a kutatások többsége a nyomottvízes technológiájú reaktorok irányába hajlott. A PWR típusú SMR reaktorok a III+ generációs atomreaktorok közé tartoznak. A III+ generációs reaktorok fejlesztésénél a fő cél a zónaolvadáshoz vezető külső és belső események elkerülése. Az egyik módja a zóna olvadásának elkerüléséhez az inherens biztonság növelése, önszabályozó passzív biztonsági rendszerekkel. A világpiacon elméletileg nagy az igény az SMR-ek iránt. Az SMR-ek egyik fő tulajdonsága, hogy kisebb teljesítményűek, mint a hagyományos atomerőművek [3], ezért rugalmasabban illeszthetők különböző felhasználási célokra. Ezen felhasználási módok közül, a teljesség igénye nélkül pár példa: terhelés követő villamosenergia termelés, lakossági távhő szolgáltatás, ipari felhasználású folyamathő előállítás, tengervíz sótalanítás vagy hidrogén termelés. Némely ország nem rendelkezik saját atomerőművel, gazdasági és földrajzi okokból egyaránt, emiatt az SMR technológia új lehetőségeket nyit azok irányába, akik csatlakozni szeretnének az atomenergetikai iparhoz, de nem rendelkeznek elegendő nukleáris tapasztalattal. Az SMR-ek mérete kisebb, mint a hagyományosan létesített reaktorok esetében, amely az integrált tartály kiépítésének köszönhető. Méretük megkönnyíti az atomerőmű telephelyének a létesítését.



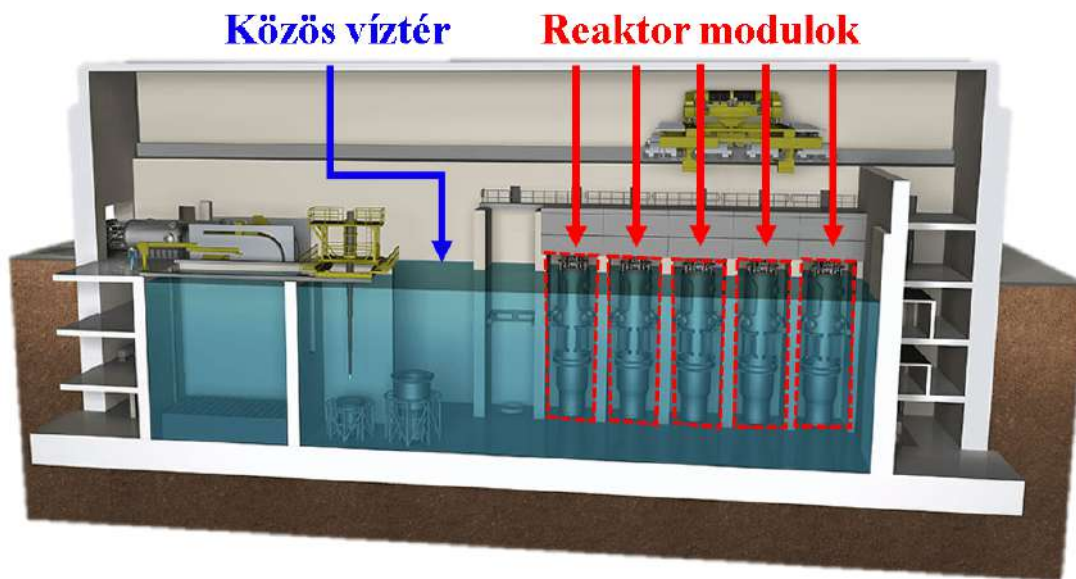
1.1. ábra. NuScale



1.2. ábra. RoPower S.A.

A NuScale által fejlesztett PWR típusú SMR reaktorokban a modulok egy közös víztérben

tartózkodnak. A hagyományos PWR reaktorokkal ellentétben a reaktortartályban található a gőzfejlesztő és a térfogat-kompenzátor, a szekunder kör elemei viszont külön épületben helyezkednek el, mint például a turbinák és a hozzá tartozó turbina csarnok. A pihentető és átrakó medence szintén ugyanazon víztérben található, mint a modulok, emiatt könnyű hozzáférést biztosít a személyzetnek átrakás vagy kiégett üzemanyag eltávolítása során. Tervek szerint, elsőként Romániában lesznek létesítve NuScale típusú SMR reaktorok [4].



1.3. ábra. NuScale VOYGR-12

Az üzemanyag-kazetták biztonsági és üzemelési elemzése azonban fontos alapeleme a biztonságos energiaellátás eléréséhez. Az SMR hűtőközegének cirkulációját gyakran természetes áramlás biztosítja, ezért hűtés szempontjából a természetes áramlás vizsgálata nélkülözhetetlen. Vízmoderált atomreaktorban a moderátor hőmérséklet reaktivitást befolyásoló tényezője egy fontos inherens biztonsági funkció. Az ezt befolyásoló hőmérséklet-eloszlások kialakulását az üzemanyag-kazettában nagy pontossággal kell tudni meghatározni. Termohidraulikai szempontból Magyarországon még nem foglalkoztak hasonló kutatásokkal, emiatt új tudományos tapasztalatot szerezhethetünk az SMR reaktorokról, illetve a hozzá kapcsolódó elvégzett PIV mérésekről és CFD szimulációkról. A kapott eredmények felhasználhatók a jövőben épülő vagy a már meglévő reaktorok vizsgálatára egyaránt [1].

A numerikus áramlástan alkalmazása fokozatosan növekszik a nukleáris szektorban, mivel egy jól felépített CFD szimuláció eredménye sok esetben megegyezik vagy precizitásban

meg is haladja az egyes áramlástan mérés eredményét. Az áramlástan mérések gyakran nem adnak információt lényeges zárt térrészekben lejárló jelenségekről, azonban szoftver szinten egy számítás tetszőleges betekintést nyújt a felhasználónak kísérletileg nehezen elérhető térrészekbe. A számítógépek számítási kapacitásának fejlődése több millió elemszámú diszkrétizálást enged meg egy CFD modell esetében anélkül, hogy növelné a számítási időt. Emiatt az elérhető kereskedelmi CFD szoftvereket sok esetben használják biztonsági elemzésekre [5]. A dolgozatban a számításokat az ANSYS 19.2 programcsomag segítségével készítettem el [6].

1.1. A kutatás célkitűzései

Jelen kutatás célja az, hogy egy 17x17-es SMR nyomottvizes reaktor négyszögács elrendezésű üzemenyag-kazettában létrejövő áramlásokat numerikus áramlástan számításokkal (CFD - Computational Fluid Dynamics) elemezzek. A Nukleáris Technikai Intézet PIV (Particle Image Velocimetry) laboratóriumában a 17x17-es üzemenyag-kazetta leskálázott 3x3-as pálcaköteg modelljein PIV mérések lettek elvégezve, különböző üzemenyag-kazetta távtartórács geometriákkal. A mérések térbeli felbontásából adódóan a PIV mérések által kapott eredmények alkalmasak egy hasonló elrendezésű kazetta CFD szimulációjának a validációjára. Két távtartórács geometria validációja lehetséges a PIV mérések által, egy keverőfüles és egy keverőfül nélküli. A keverőfülek feladata, hogy megnöveljék a kilépő közeg turbulenciáját. Ez kihat a távtartórács után létrejövő áramlás alakjára, viszont segít a pálcák hűtésében. A két távtartórács geometriára kapott CFD számítási eredmények összevetésével, validációt követően, a modellek közti áramlástan paraméterek különbségeire lehet következtetni.

1.2. CFD módszerek alkalmazása

A CFD számítások végeselem-módszerek közé tartozik, alapelve a diszkrétizáció, az adott feladat geometriájának a felbontása elemi cellákra és a numerikus megoldása a megmaradási törvényeknek. A megmaradási törvények parciális differenciálegyenletek, emiatt sok esetben analitikusan megoldhatatlanok. Ha diszkrétizálunk egy fluidum rendszert és peremfeltételeket szabunk meg a cella elemekre, numerikus szempontból egy lineáris parciális differenciálegyenlet rendszert hozunk létre, amely numerikus analízist követően, megfelelő módszerekkel, megoldhatóvá válik. A diszkrétizáció jelentheti elemi csomópontokra vagy térfogatelemekre való bontását a geometriának, az utóbbi használt a dolgozatomban. Felírható

egy összefüggés, melynek segítségével bármilyen intenzív megmaradó mennyiség kifejezhető egy adott cellában. Nevezzük egy cellában levő tömeget ellenőrzött tömegnek (Control Mass - CM vagy System) és a térfogatát ellenőrzött térfogatnak (Control Volume - CV). Ebben az esetben, diszkretizált fluidumokra a következő írható fel [7]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_{CM}} \rho \phi d\Omega = \frac{d}{dt} \int_{\Omega_{CV}} \rho \phi d\Omega + \int_{S_{CV}} \rho \phi (\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS \quad (1)$$

ϕ	Tetszőleges intenzív mennyiség
Ω_{CM}	Ellenőrzött tömeg által elfoglalt térfogat
Ω_{CV}	Ellenőrzött térfogat
S_{CV}	Ellenőrzött térfogat teljes felülete
$\mathbf{n}$	Ellenőrzött térfogat felületének normálisa
$\mathbf{v}_b$	Ellenőrzött térfogat felületének mozgási sebessége
$\mathbf{v}$	Fluidum sebesség

A numerikus megoldások számára, a diszkretizálás miatt, a Ω_{CM} és a Ω_{CV} térfogatok megegyeznek, emiatt a S_{CV} felületi tagból elhagyhatjuk az indexet. Továbbá, bármilyen extenzív mennyiség kifejezhető egy intenzív mennyiség segítségével:

$$\Phi = \int_{\Omega_{CM}} \rho \phi d\Omega. \quad (2)$$

A 1. egyenletben megköveteljük, hogy $\phi = 1$ legyen és feltételezzük, hogy az ellenőrzött térfogatunk rögzített ($v_b = 0$), felírható a tömegmegmaradás egyenlete:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho v \cdot \mathbf{n} dS = 0. \quad (3)$$

Hasonló módon kifejezhető az impulzusmegmaradás is, ahol a ϕ független változó helyett a közeg sebességét írjuk, és bevezetjük általánosan a közegre ható $\mathbf{f}$ erőket:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_S \rho v v \cdot \mathbf{n} dS = \sum \mathbf{f}. \quad (4)$$

A 3. és 4. egyenletek definiálhatók koordináta-rendszer független alakban, ha alkalmazzuk a Gauss–Osztrohradszkij-tételt [8]. Ez esetben ha ismerjük a divergencia és gradiens operátorok alakját, az egyenletek átírhatók tetszőleges koordináta-rendszernek megfelelően (Descartes,

Henger, Gömb, stb.). A 3. egyenlet így a következő alakban írható fel:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (5)$$

míg a 4. egyenletben, ha bevezetünk egy $\mathbf{T}$ stressz tenzort és $\mathbf{b}$ térfogati erőket [7], a 4. egyenlet új alakja:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \operatorname{div} \mathbf{T} + \rho \mathbf{b}. \quad (6)$$

Energiamegmaradást is szükséges bevezetni, amit a termodinamika I. törvényének segítségével írhatunk fel [9]:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \operatorname{grad}(\mathbf{v}(\rho E + p)) = -\operatorname{grad}(\mathbf{q}) + S_e + \operatorname{grad}(T \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{g} \mathbf{v}. \quad (7)$$

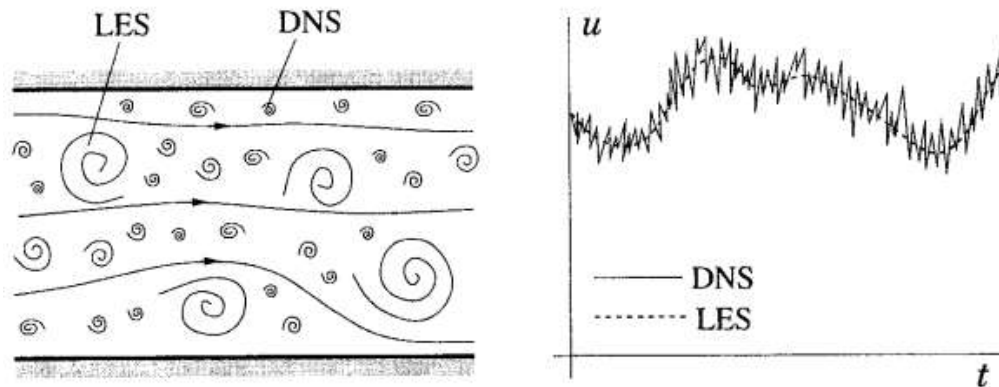
A 7. egyenletben $\mathbf{q}$ a hőfluxus vektor, $\mathbf{g}$ a gravitációs gyorsulás és a S_e tag egy energiaforrást jelöl. Megfelelő implementálással egy diszkretizált rendszerben szimulálható egy fluidum áramlása az 5., 6. és 7. egyenletekkel.

A numerikus áramlástanban a turbulens áramlások kezelésére három ismertebb szimuláció típus lehetséges. A DNS (Direct Numerical Simulation) módszer csak a diszkretizálás végett közelíti meg a valós értékeket, numerikus szempontból hosszú szimulációs időt igényel, de nagyon pontos eredményeket ad a kialakuló turbulenciákra, ezzel szemben a RANS (Reynolds Averaged Numerical Simulation) módszer a modellek egy egyszerűbb ágazatát vezeti be, amelyekben időben átlagolják a Navier–Stokes egyenleteket, ez jól leírja az áramlás főbb paramétereit, majd a turbulenciát turbulenciazárási modellekkel közelítik meg. Végül a LES (Large Eddy Simulation) típusú szimuláció kevésbé szignifikáns örvények viselkedéséből közelíti meg a rendszerben kialakuló turbulenciát 1.4. Dolgozatomban a RANS módszert alkalmaztam.

A Reynolds szám az áramlás turbulenciájának mértékére utal (keveredés), kifejezhető a vizsgált rendszer karakterisztikus méretének segítségével bármilyen numerikus eljárást megelőzően, így elsődleges információhoz juthatunk a rendszer turbulenciáját illetően:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (8)$$

- ρ Közeg sűrűsége [$\frac{kg}{m^3}$]
 v Közeg áramlási sebessége [$\frac{m}{s}$]
 L Vizsgált rendszer karakterisztikus mérete [m]
 μ Közeg dinamikus viszkozitása [$\frac{m^2}{s}$]



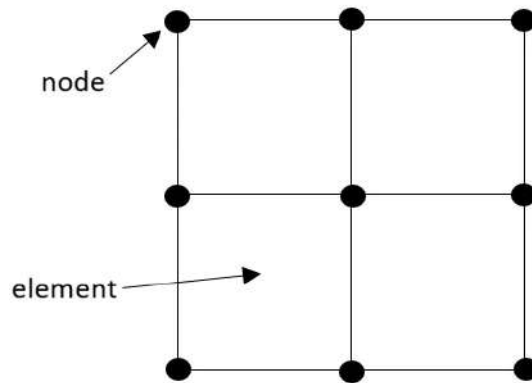
1.4. ábra. Turbulencia modellezés [7]

A CFD programcsomagok a megmaradási egyenletek mellett turbulencia modelleket alkalmaznak. A turbulencia modell kiválasztása rendszer- és megfigyelendő mennyiség függő. Ezért léteznek bonyolultabb (BSL – Menter Baseline Turbulence, SSG –Speziale, Sarkar, és Gatski specifikus Reynolds stressz modellje), illetve egyszerűbb turbulencia modellek (SST – Shear Stress Transport, $k-\epsilon$). A turbulencia modellek bonyolultságát az határozza meg, hogy turbulens áramlás esetében a keletkező keresztáramlatok (primer és szekunder örvények) energiája hogyan disszidálódik a rendszerben. Ez összekapcsolható a turbulencia modellek "Wall Scale" függvényeivel [6], melyek a falak közelében lassuló közeg viselkedését közelítik meg [7]. Mivel diszkretizált a rendszer, ezért az elemi cellák sűrűsége sem elhanyagolható paraméter, egy pontosabb turbulencia modell egy sűrűbb diszkretizációt igényel, mint egy egyszerű modell. A megfelelő sűrűség elérésére hálófüggetlenségi vizsgálatot lehet végezni, így követhető a modell válasza a háló sűrűségének a függvényében.

1.3. Hálózási módszerek

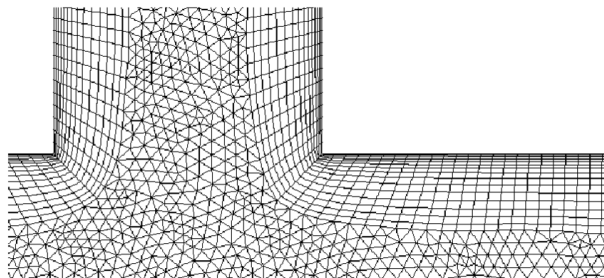
A diszkretizáció fogalma a végelelem-módszerekben hálózasként ismert, mivel hálózhoz hasonló szerkezetet hoz létre egy adott geometria felületén és belsejében egyaránt. A háló két komponensből áll, nódusokból és elemekből. A nódusok tartalmazzák a releváns

fizikai mennyiségek kiszámolt értékeit, az elemekben pedig ezen mennyiségek közelítő értékei találhatók, melyeket két vagy több nódus közötti interpolációval számolunk. Az interpoláció foka és közelítése a számolt fizikai mennyiségtől függ, illetve a programcsomag implementálásától.



1.5. ábra. Háló komponensei [10]

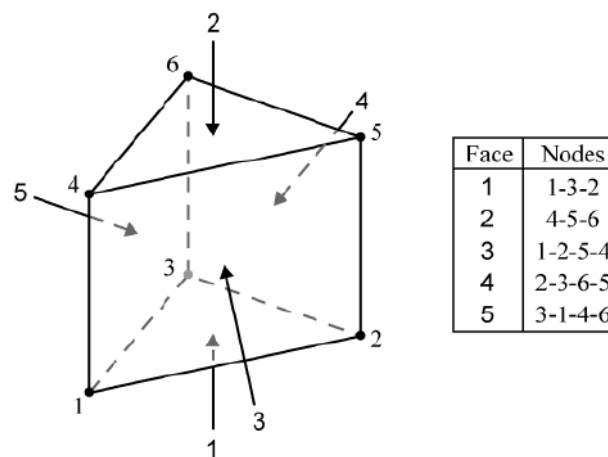
A CFD szimulációkban a háló generálása a geometria elkészítését követi. A háló generálásakor létrehozható strukturált (például hexagonális elemekből) és strukturálatlan (például tetraéderes elemekből) háló, a kettő együttes alkalmazása a hibrid háló. A strukturált hálók előnye, hogy szabályosan veszik fel az elemek a pozíciójukat a geometriában, ezért kisebb a hiba lehetősége a hálóelemek közötti kapcsolatokban, de bonyolultabb a hálógenerálás szabályait rögzíteni. Az elemszám ez esetben kevesebb, mint a strukturálatlan hálóknál. A strukturálatlan hálóknál a hálóelemek szabálytalanul helyezkednek el, ezért bonyolultabb geometriákat is lefedhetnek, de magasabb számítási igényekkel rendelkeznek. Mivel az általam vizsgált 3x3-as pálcakötegben a pálcaköteget rögzítő távtartórács és az áramlás csatornájának a falai pontosabb számításokat igényelnek, ezért hibrid hálózást alkalmaztam.



1.6. ábra. Hibrid háló [11]

A hibrid hálózás során, az adott geometriát egy strukturálatlan hálóval látom el, ezt követően

a fal peremek közelében szabályozott rétegszámot és vastagságot adok meg, így a hálózás során a strukturálatlan háló elemeit a strukturált elemek váltják fel. Az 1.6 ábrán látható felülethez igazodott elemek jönnek létre a fal peremek közelében a tetraédes elemek helyett. Ezeket az elemeket prizmatikus elemeknek nevezzük, és kifejezetten a határréteg modellezésére szolgálnak, egyetlen felülete téglalap alapú, mivel a többi felület a tetraédes elemek felületeivel találkozik. Ezen elemrétegek megragadják a folyadék határrétegének viselkedését a viszkózus áramlásokban, melyek a falak melletti "csúszásmentes feltétel" miatt jelentkeznek. A CFD szimulációkban, a határrétegek közelében az áramló közegre csúszásmentes súrlódási erő hat alapértelmezetten (tapadási törvény).



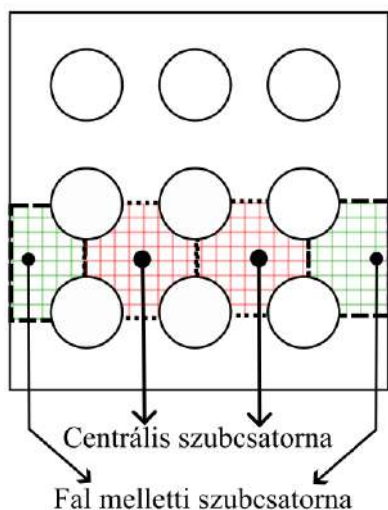
1.7. ábra. Prizmatikus hálóelem [12]

1.4. 3x3-as pálcaköteg szubcsatornái

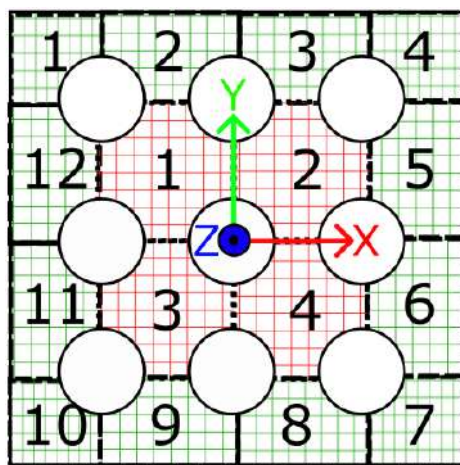
A 3x3-as pálcaköteg axiális irányban két fontosabb szubcsatornával rendelkezik, ezek a centrális és fal melletti szubcsatornák. A továbbiakban egy saját számozási konvencióval láttam el a fal melletti és a centrális szubcsatornákat, ugyanis a későbbiekben ezek rögzítésével követhető a szubcsatornák között létrejövő áramlások, illetve a bennük kialakuló gradiens terek (nyomás, hőmérséklet, sebesség stb.) eloszlása. A falak melletti szubcsatornákból 12 darab különböztethető meg, a sarok elemek kivételével a többi elem ugyanolyan nagyságú. A centrális szubcsatornákból 4 található, számozásuk balról jobbra történik [13].

1.5. Távtartórács geometriák

A 3x3-as pálcakötegben a rögzítő elem a távtartórács. Alapeleme az egy cella, amiben egy pálca helyezkedik el. Ennek négy bütyök és két laprugó tartó felülete van. Geometriája egy

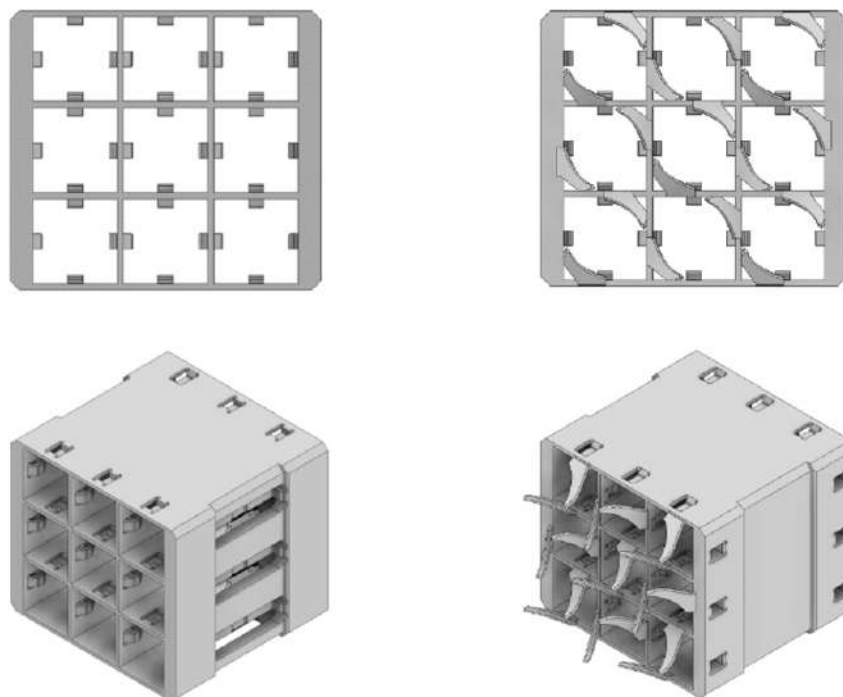


1.8. ábra. 3x3-as pálcaköteg



1.9. ábra. Szubcsatornák számozása

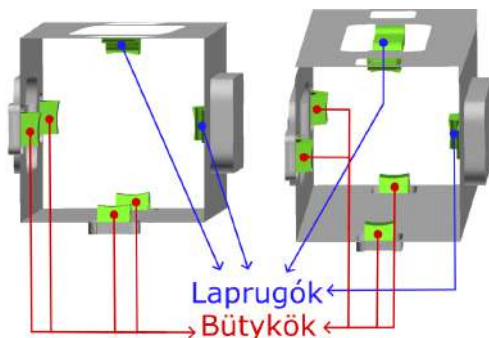
eltolási szimmetriával rendelkezik, egyetlen cellával a távtartó belső geometriája megadható. Az 1.11. ábrán látható axiális irányból egy ilyen cella kialakítása. A geometria ugyanakkor megengedi, hogy a szomszédos cellák között keresztáramlások jöjhessenek létre. Ennek oka a laprugók kivágásai, így a hűtőközeg jobban elkeveredhet.



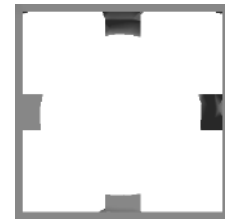
1.10. ábra. Távtartórács geometriák [14]

A két vizsgált távtartórács geometriája azonos, kizárólag a keverőfülekben térnek el. A

keverőfülek az áramlás irányába mutatnak, és a távtartórácsból kiáramló közeget keverik passzív módon. Az impulzus megmaradásából következik, hogy a keverőfülek hatására megnő a közeg sebessége az axiális irányra merőlegesen (u és v sebességkomponensek), így kilépés után az eredeti centrális és fal melletti szubcsatornákból a közeg erőteljesebben áramlik a szomszédos szubcsatornába (1.9 ábra). Az átáramlásoknak köszönhetően turbulensebb az áramlás, emiatt a hőátadás és a kritikus hőfluxus mértéke az üzemanyag felülete és a hűtőközeg között megnövekszik. A hőátadás növelése forráskrízis megelőzéséhez vezet. A forráskrízis során az üzemanyagpálcák felületén gőzfilm réteg képződik. A gőzfilm környezetében csökken a hőátadás, az üzemanyagpálcák burkolata kritikus vagy magasabb hőmérsékletet ér el, amely a burkolat kiszáradásához és túlhevüléséhez vezet. A két jelenség károsítja a burkolatot. Ezt a folyamatot képes befolyásolni egy jól megtervezett távtartórács, ezért szükséges turbulenciát növelő távtartórácsokat vizsgálni.

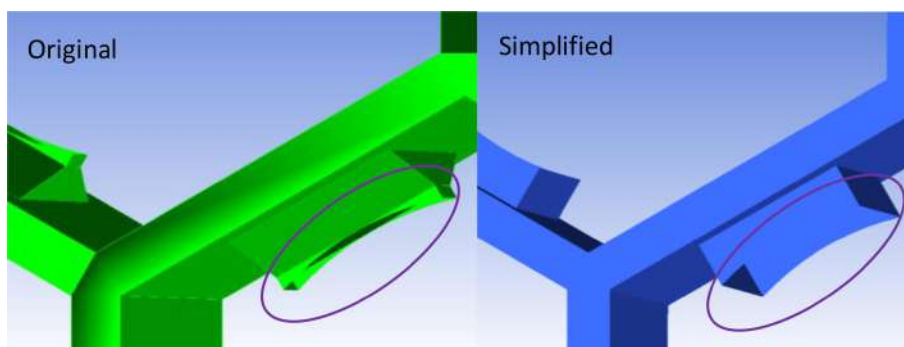


1.11. ábra. Távtartórács cella



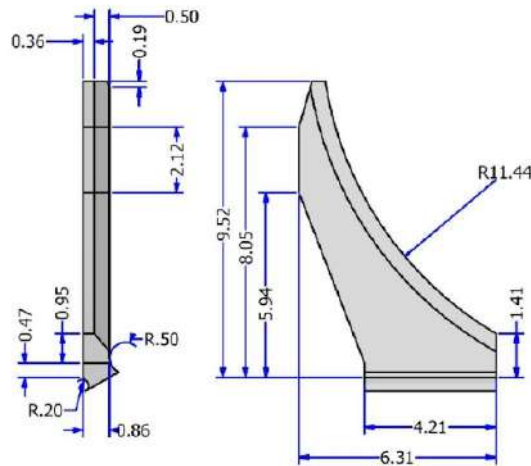
1.12. ábra. Távtartórács cella axiális nézet

A bűtykök és a laprugók érintkezési pontja az üzemanyagpálcával nehezen hálózható, ezért egyszerűsítéssel kellett élnem, amely az 1.13. ábrán látható hatszög rácshoz hasonló. A valóságban a két elem egy vonal mentén érintkezik, a modellben pedig egy felület mentén. Ez előnyt jelent a háló minőségének és a számítási idő szempontjából egyaránt.



1.13. ábra. Bűtykök és laprugók érintkezési pontja egy hatszög rácshoz hasonló ALLEGRO gáz hűtésű gyorsreaktorban [15].

Mivel a keverőfülek belelőgnak a távtartórács utáni csatornába, ezért a méreteik kulcsfontosságúak az eredmények értelmezésének fejezetében. A keverőfülek geometriája az 1.14 ábrán látható. A keverőfül nélküli távtartórácsot NVG-nek (Non Vane Grid), a keverőfüleket tartalmazó távtartórácsot pedig MVG-nek (Mixing Vane Grid) neveztem el.



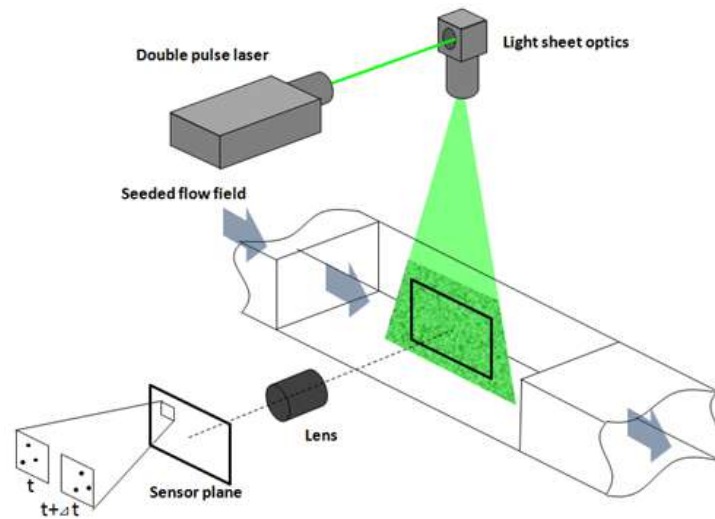
1.14. ábra. Keverőfülek geometriája

2. PIV kísérlet rövid bemutatása

A CFD modellem validálására a PIROUETTE tesztelési létesítményben PIV kísérletek lettek elvégezve. A PIV egy beavatkozásmentes optikai elven alapuló mérési módszer, amely egy adott mélységben az áramló közeg 2D sebességterét adja meg. A 2.1. ábrán egy tipikus PIV kísérleti berendezés található, ahol apró részecskék vannak jelen az áramló közegben.

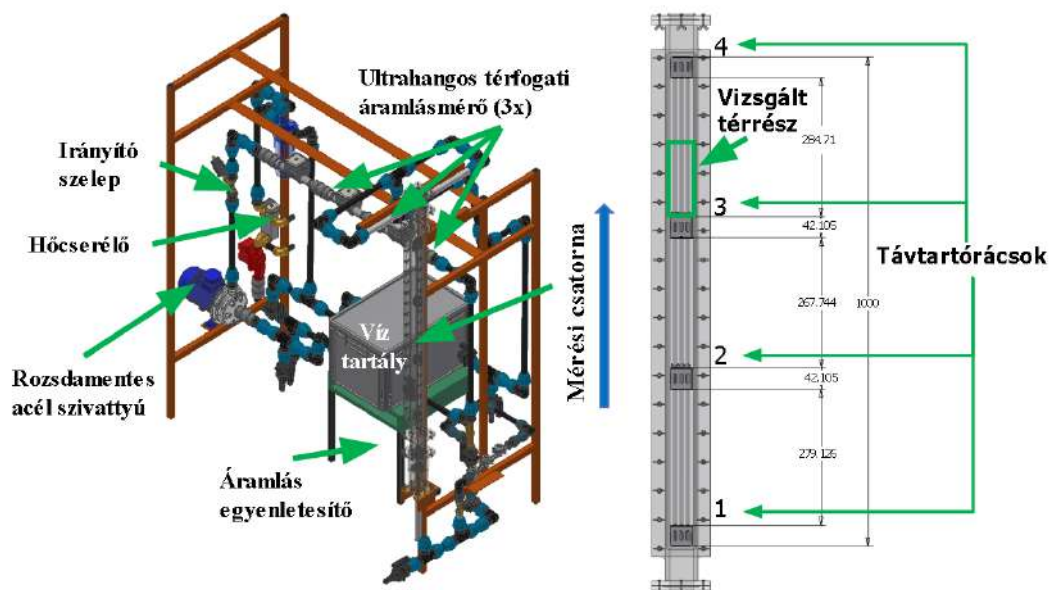
Egy téglalap alakú síkot (mérési sík) az áramlási térfogatban kétszer megvilágítanak lézer impulzussal. Az impulzusok közötti időt az áramlás átlagos sebességéhez és a kép méretéhez igazítják. A megfigyelhető részecskék lekövetik az áramlás irányát, ezért az adott síkban az áramlási sebességgel megegyezően mozognak a két fényimpulzus között. A visszavert fényt kamerákkal rögzítik két különálló képkockán egy CCD (Charge-Coupled Device – Töltés-Csatolt Eszköz) érzékelőn. Ezután a CCD érzékelő adatai közvetlenül egy számítógép memóriájába kerülnek tárolásra, majd feldolgozásra. A képkockák kiértékelése képfeldolgozással történik. Ennek során minden képkockát kis alterületekre, úgynevezett "interrogációs régiókra" osztanak, amelyekből a nyomjelző részecskék lokális elmozdulásvektorát statisztikai módszerekkel, például autokorrelációval és keresztkorrelációval

nyerik ki. Az adatokból átlagolt axiális sebességeloszlást, turbulens kinetikus energiát, Reynolds stressz értékeket és más mennyiségeket számolhatnak.



2.1. ábra. Általános PIV mérési berendezés [16]

A PIROUETTE létesítményben használt kísérleti berendezés a 2.2 ábrán látható. Az áramlást egy centrifugál szivattyú hozza létre, a tesztcsatornába beömlő közeg glicerines víz, melynek tömegárama $\approx 1.6 \frac{kg}{s}$, glicerín koncentrációja 8.25%. A megfelelő glicerín koncentrációt optikai refraktometriai mérésekkel állították be. A szivattyú működése egy hőforrást jelent a rendszerben, ezért hőcserélőt építettek a tesztrendszerbe, hogy a körülmények a mérések során izotermek legyenek. Az izoterm állapottal a hőfüggésből adódó hibák kiszűrhetők, így egyedül a geometria hatása formálja az áramlás alakját.



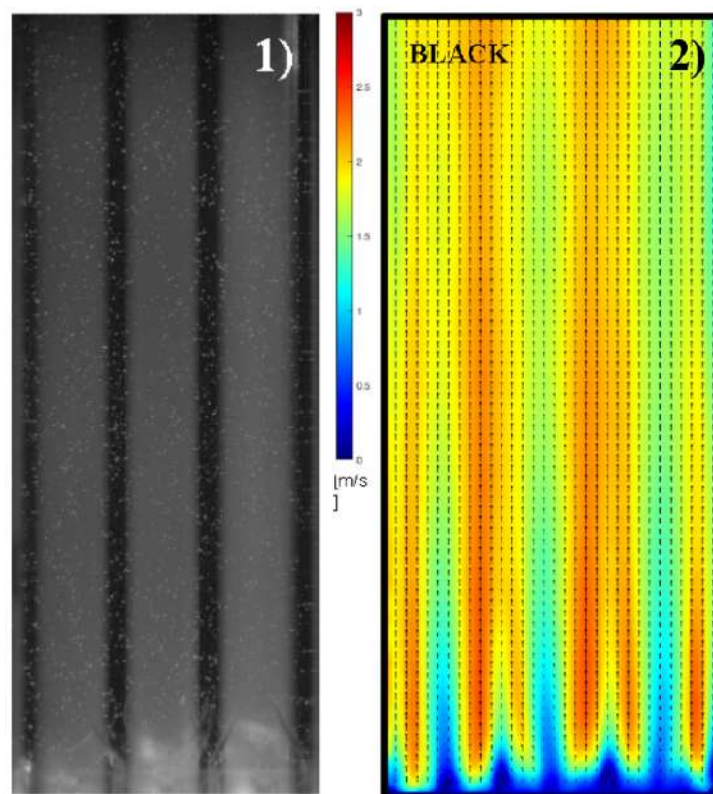
2.2. ábra. PIV kísérlet berendezése [16]

A tesztelési csatornában (2.2. ábra) található a 3x3-as pálcaköteg FEP-ből (Fluorinated Ethylene Propylene) készült, mely anyag törésmutatója közel azonos a vízhez. A távtartórácsok műgyanta alapú 3D nyomtatási technológiával lettek létrehozva (2.3. ábra). A határoló csatornafalak PMMA-ból (Polymethyl Methacrylate - Plexi) vannak. A FEP anyag teljesíti a MIR-hez (Matched Index Refractometry) szükséges feltételeket a csatorna belsejében, így a felvett képek optikai torzulásoktól mentesek. A vizsgált térrészről készült 2D és monitor vonalmenti sebességeloszlások, CFD modell validálásához alkalmasak.

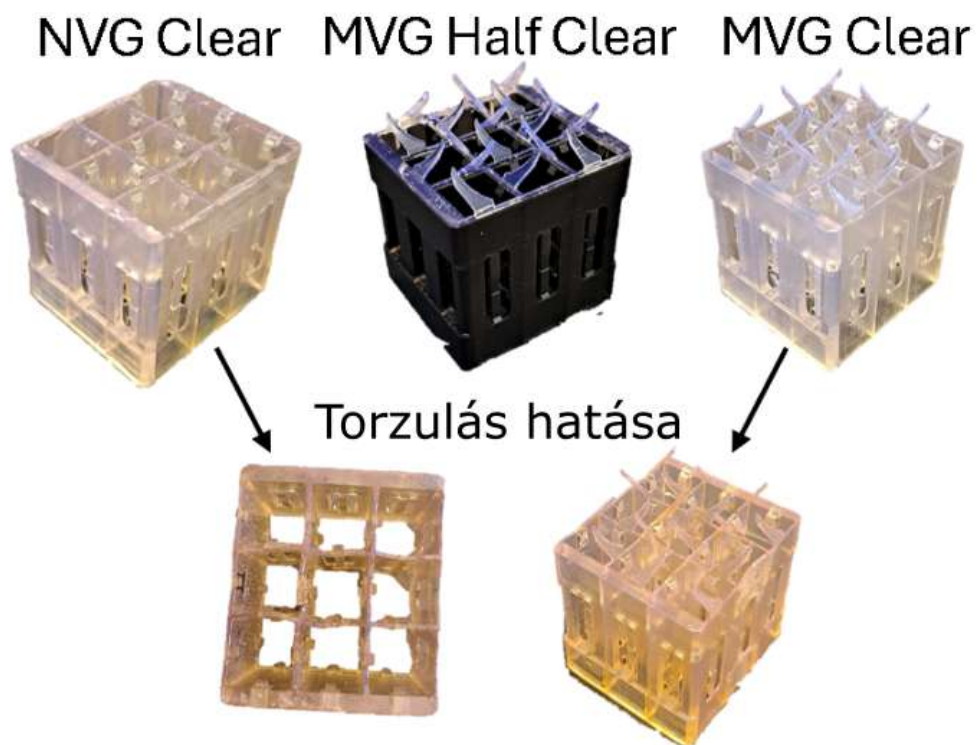


2.3. ábra. PIV kísérlet távtartórácsok [14]

A 2.2. ábrán látható vizsgált térrészt egy zöld lézerrel megvilágították, majd a CCD érzékelővel 2.4. ábrának megfelelő képeket rögzítettek. A kísérletet elvégezték a 2.3. ábrán lévő két távtartórácsra. A 2.4 ábrán az első képen a felvett kép látható, melyen a világos sávok a pálcák, a fehér pontok pedig a nyomjelző részecskék. A második képen pedig a PIV mérés végeredménye látható, a 2D-s sebességeloszlás. Ezt a DANTEC DYNAMICS [17] nevű programcsomag segítségével hozták létre. Az én feladatomban a mérések CFD szimulációval való reprodukálása volt. A méréseket elvégezték több különböző távtartórács anyagból is, melyek között volt teljesen átlátszó (későbbiekben Clear) is. Ennek oka az volt, hogy a mérések során szerettek volna a keverőfülek által kitakart áramlási térből is információkat szerezni. Az előzetes számításaim és ezen utóbbi mérések eredményei merőben más sebességeloszlást produkáltak. Mint utólag kiderült, az átlátszó távtartórács a mérés során eltorzult, melyre utólag jöttek rá az én szimulációs eredményeim sugallatára (2.5. ábra). Ezenfelül a méréseket elvégezték fekete (későbbiekben Black) és a két anyag kombinálásából összeillesztett (későbbiekben Half Clear) távtartórácsokkal is. Ezen esetből is látható, hogy a kísérleti és szimulációs módszertan mennyire jól kiegészítik egymást.



2.4. ábra. PIV kísérlet nyers felvétele és a mérésekből kapott sebességeloszlás [14]



2.5. ábra. Különböző anyagú távtartók és azok torzulása [14]

3. CFD modellek bemutatása

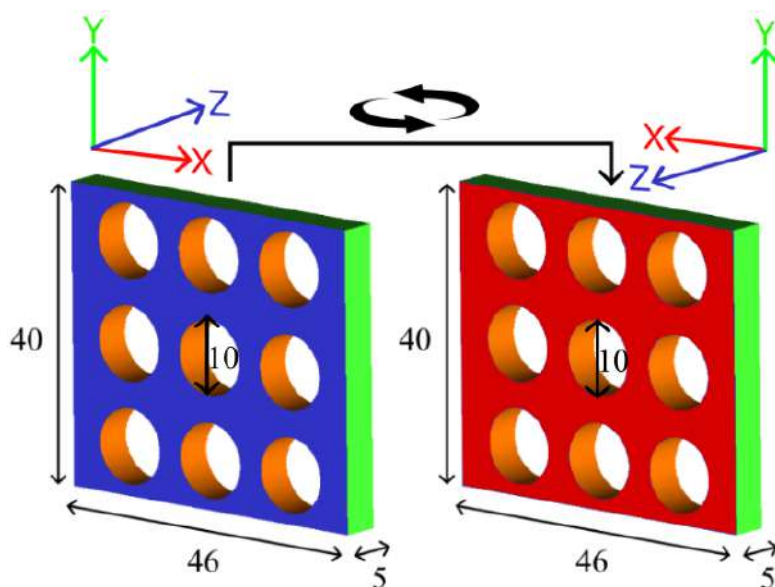
A PIV kísérletben használt tesztszatórnát több egymásra épülő CFD modell segítségével készítettem el. Ezek geometriája egy belépő és kilépő felületet, a csatornát határoló falakat és a 3x3-as pálcák burkolatainak felületét tartalmazzák. A modellek közötti különbség a távtartórácsok számában rejlik, ezért nulla (VHP), egy (Single Spacer), két (Two Spacer) és négy távtartórácsot (Full Bundle) tartalmazó tesztszatórna számításokat végeztem el. Az eredményemmel összehasonlíthatom több vagy kevesebb távtartó hatását egy végtelen hosszú pálcaköteg áramlási terére (nulla távtartó), amelyet az alap áramlási térnek tekintek. Továbbá, a végtelen hosszú pálcaköteg sebességprofilja bemeneti paraméterként is szolgál az egy és két távtartórácsot tartalmazó modelleknek. Minden esetben hálófüggetlenségi vizsgálattal választottam ki az elégséges hálósűrűséget.

3.1. Végtelen hosszú pálcaköteg – VHP

A geometria szempontjából a VHP a legegyszerűbb modell a modellsorozatból. Egy véges metszetét modelleztem a VHP-nak, majd translációs periodicitást definiáltam a be- és kilépő felületek között. A translációs periodicitásnak köszönhetően tekinthető végtelen hosszúnak a modell.

3.1.1. Geometria

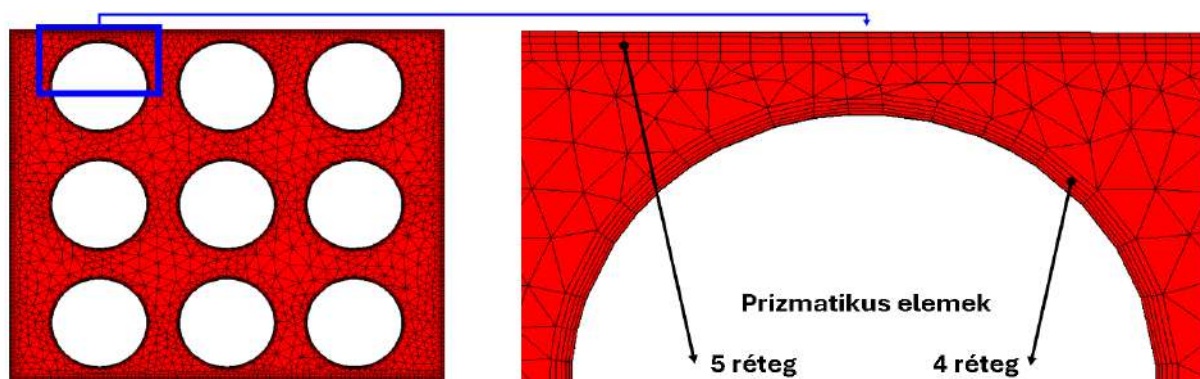
A 3.1. ábrán látható a VHP geometria méretei és orientációja. A további modellek hasonló orientációval rendelkeznek, ahol az axiális irány a Z irány. Axiális irányban 5 mm vastagságot adtam meg, az ábrán látható X irányban a geometria szélessége 46 mm, Y irányban 40 mm a magassága és a pálcák átmérője 10 mm, illetve a rácsosztás 13.5 mm. A szélesség, a magasság és a pálcák átmérőjének mérete minden további modellre érvényes. A modelleknek szín-felület megfeleltetést hoztam létre a felületi elemek azonosítására. Az inlet (kék) jelöli azon felületet, amelyen át beáramlik a szimulációban használt fluidum, az outlet-en ez távozhat (piros), a pálcák burkolatai (narancssárga), a csatornát határoló falak (zöld), illetve a későbbiekben a távtartórácsok (szürke) fal felületek. Ezen fali felületekre igazak a következők: közelükben a közeg sebessége közelíti a nulla értéket, nem haladhat át rajtuk közeg. Az utóbbi állításból következik, hogy ezen felületeken át nem távozhat közeg a rendszerből.



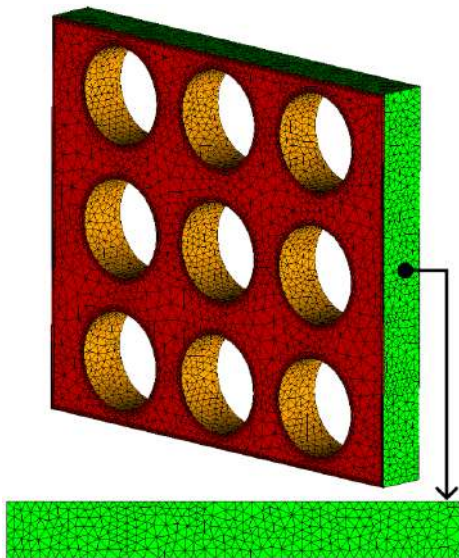
3.1. ábra. Végtelen hosszú pálcaköteg felületi méretei

3.1.2. Diszkretizálás

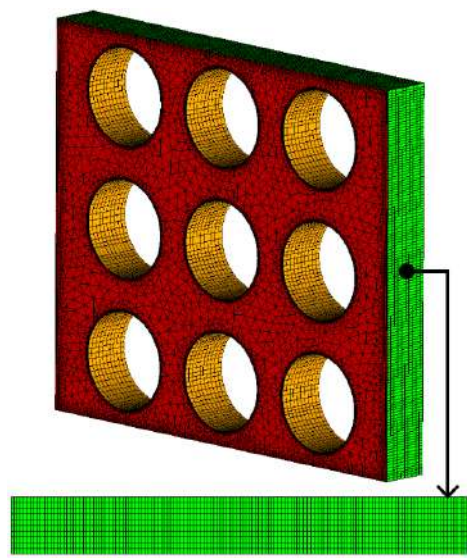
A teljes tesztszatórna diszkretizálásához szükséges különböző hálózási módszerek elemzése a hálósűrűség függvényében. Ennek érdekében, a VHP-nek két merőn eltérő elemekből álló hálósorozatot készítettem el, egy strukturálatlan (3.3. ábra) és egy hibrid hálót (3.4. ábra) különböző hálósűrűségekkel. A hibrid háló belépő felületét strukturálatlan hálóval hoztam létre, amit kihúzással (extrude) a strukturálatlan hálónak megfelelő axiális hosszra méreteztem. A strukturálatlan háló tartalmaz prizmatikus elemeket a határoló rétegek közelében, ezek a csatorna határoló felületei és a pálcák burkolata közelében vannak 3.2. A hibrid háló kihúzott elemei ezért prizmatikusak a pálcák közötti térben és hexaéderesek a pálcafalak mentén, mivel a kihúzás követi a belépő felület hálóstruktúráját. A csatornát határoló felület esetében 4, a pálcá burkolatának pedig 5 prizmatikus réteget definiáltam, maximális méretük 0.3 mm.



3.2. ábra. Végtelen hosszú pálcaköteg prizmatikus elemei a strukturálatlan háló esetében

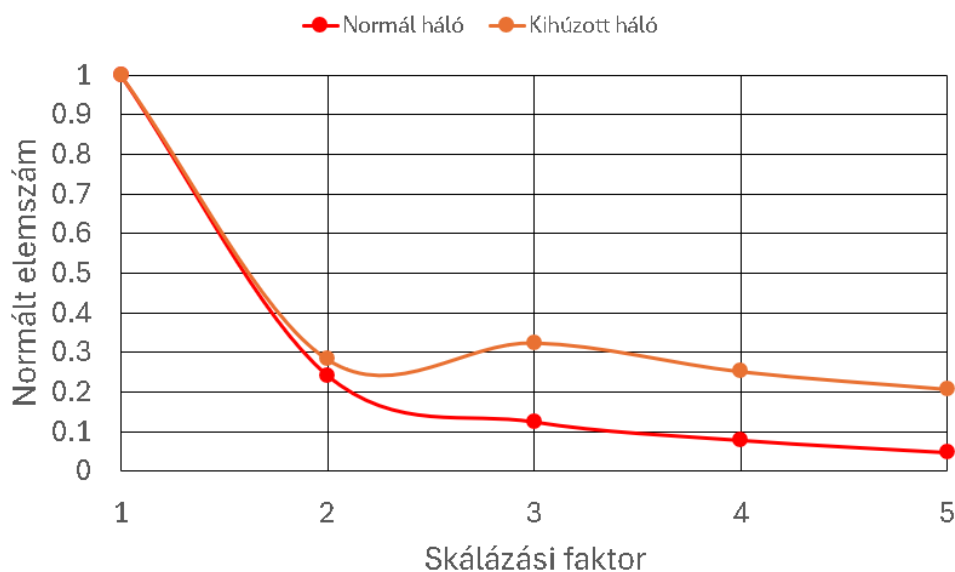


3.3. ábra. Strukturálatlan háló



3.4. ábra. Hibrid háló

Az ANSYS ICEM CFD 19.2 verziójában megadható a háló globális sűrűsége egy skálafaktorral, ezt változtatva hoztam létre különböző elemszámú hálókat. A skálafaktor értéke határozza meg a háló ritkaságát, az 1-nek megfelelő skálafaktor jelenti a normál sűrűségű hálót, ennél nagyobb szám csökkenti a háló sűrűségét, viszont nem változtatja a prizmatikus elemek nagyságát. A háló elemeinek a csökkenése nem egyértelmű, mivel három dimenzióban csökkenti az elemszámot. A 3.5. ábrán látható a különböző skálázási faktorok hatása (az elemszámok normáltak a legnagyobb elemszám szerint), 1 és 2 értékek között változik drasztikusan az elemszám. Ezen skálafaktor értékekre készítettem el a VHP hálóit és a hálófüggetlenségi vizsgálatomat.



3.5. ábra. Skálázási faktor hatása az elemszámra

Hálótípus	Skálafaktor	Elemszám	Átlagos cella méret
	[-]	[-]	mm^3
Strukturálatlan	1	821258	0.008
Hibrid		363909	0.021
Strukturálatlan	2	199471	0.034
Hibrid		103086	0.074
Strukturálatlan	3	103034	0.068
Hibrid		118338	0.065
Strukturálatlan	4	64836	0.109
Hibrid		91900	0.084
Strukturálatlan	5	39464	0.188
Hibrid		75707	0.102

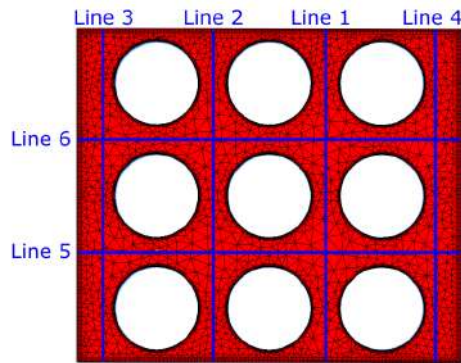
1. táblázat. Különböző skálafaktornak megfelelő elemszámok és átlagos cella méretek

A jelen és a következő fejezetekben leírt CFD számítások peremfeltételeit a PIV kísérlet fizikai paramétereinek feleltettem meg. A számítás típusa és a használt turbulencia modell minden eredmény esetében feltüntetésre került. A következő peremfeltételeket definiáltam:

A pálcák és a csatornafalak felületeire csúszásmentes fali peremfeltételt hoztam létre, a beáramló közeg tömegáramát $1.66267 \frac{kg}{s}$ -nak állítottam, ez megfelel a PIV mérés kényszerített tömegáramának. Az Inlet és Outlet felületek között transzlációs periodicitást adtam meg. A szimuláció fluiduma glicerines víz, fizikai paramétereit: sűrűsége $1018.88 \frac{kg}{m^3}$, specifikus hőkapacitása $4033.78 \frac{J}{kg \cdot K}$ és móltömege $24.1271 \frac{g}{mol}$ $30^\circ C$ -on. Termodinamikai szempontból a rendszer izoterm, a referencia nyomás 1 atm. A szimulációknak Steady State (stacionárius) számítási módszert és SST turbulencia modellt választottam.

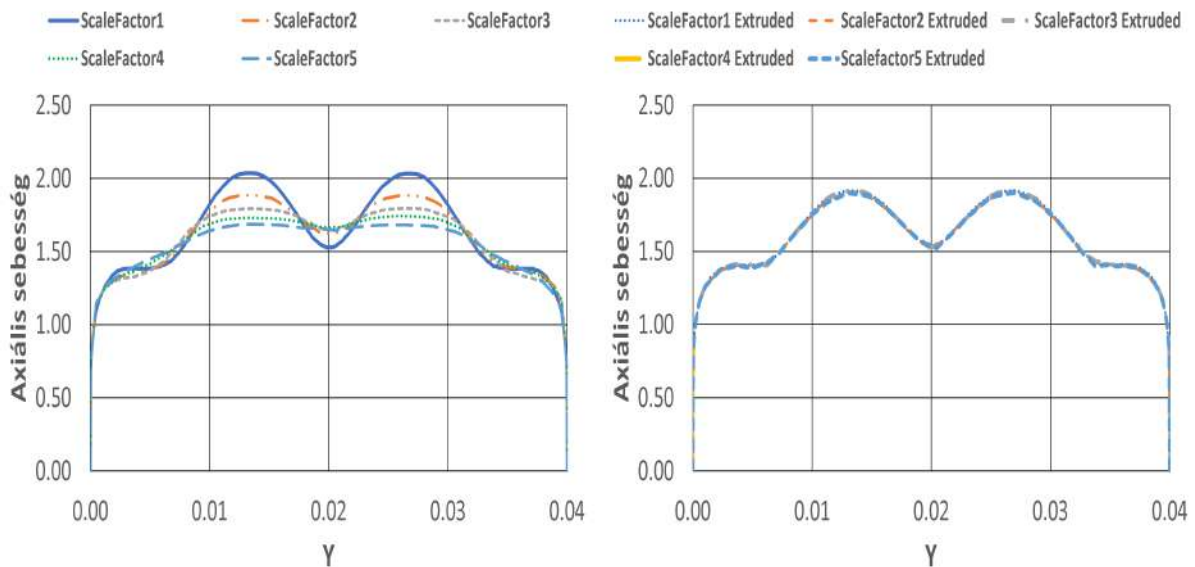
3.1.3. VHP – CFD számítás eredményei

A stacionárius számításokat tíz különböző hálóra végeztem el, ezekből öt strukturálatlan és öt hibrid háló. Ezek eredményeit először egy axiális keresztmetszetben vizsgáltam meg, a 3.6. ábrán látható egyenesek mentén.



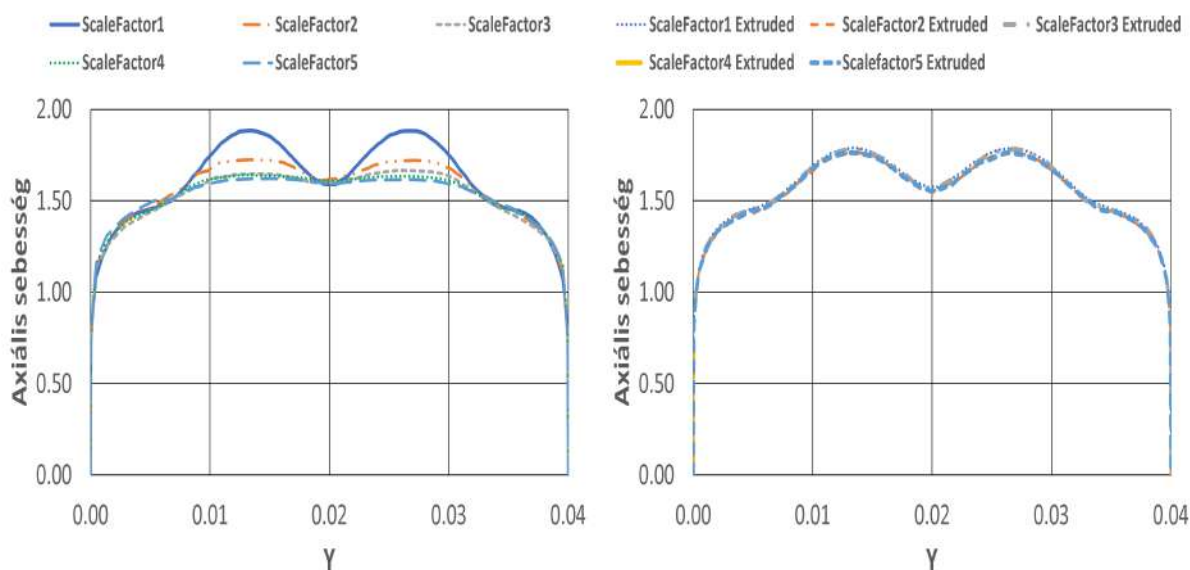
3.6. ábra. Egyenesek helyzete axiális irányú felületen

A Line1 egyenes mentén exportált axiális sebességértékek a 3.7. ábrán láthatók $\frac{m}{s}$ -ban. A baloldali ábrán a strukturálatlan háló, a jobboldali ábrán pedig a hibrid háló eredményei láthatók, különböző hálósűrűségekre (skálafaktorokra). Hasonlóan jártam el a többi egyenes mentén, ezek eredményei a 3.8. és a 3.9. ábrákon láthatók. Az egyenesek mentén exportált axiális sebességeloszlásokból az látható, hogy a hibrid háló eredményei látszólag hálósűrűségtől függetlenek, míg a strukturálatlan háló esetében egy túl sűrű háló túlbecsüli, egy túl ritka háló pedig alábecsüli a hibrid háló maximumát.

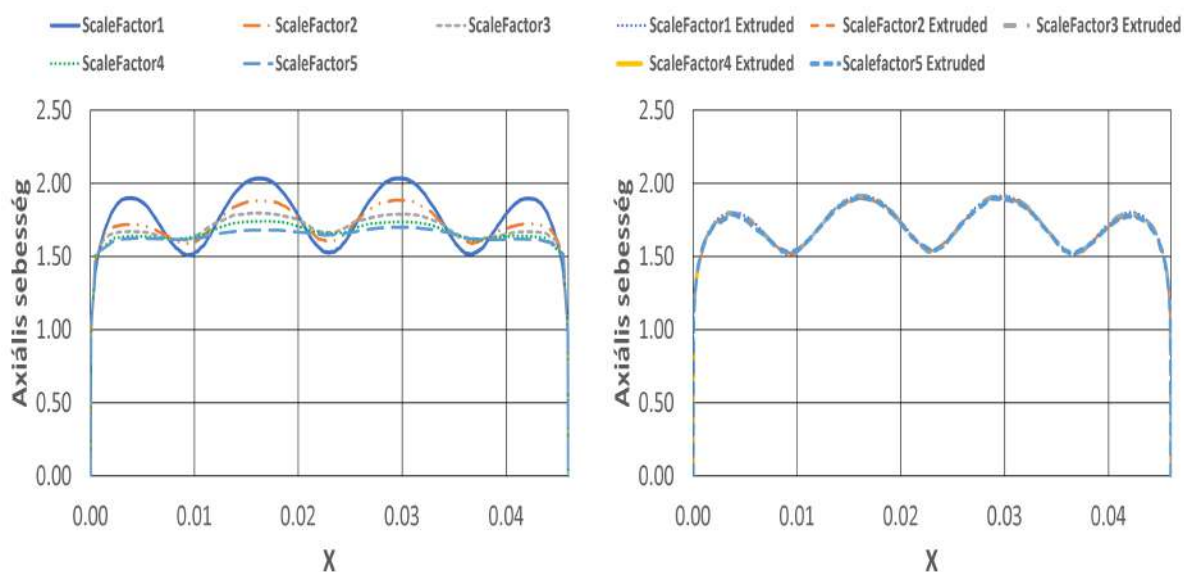


3.7. ábra. Line1 egyenes mentén exportált axiális sebességértékek

A Line2 egyenes mentén exportált axiális sebességekre hasonló értékeket kaptam, mint a Line1 esetében. Hasonlóan a Line3 és a Line4, illetve a Line5 és Line6 axiális sebességeloszlása megegyezik, ezért nem ábrázoltam őket külön.

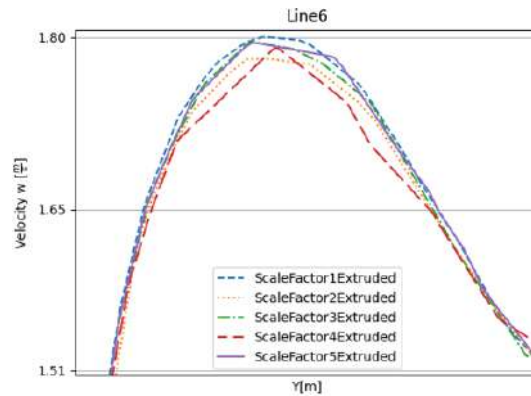


3.8. ábra. Line3 egyenes mentén exportált axiális sebességértékek



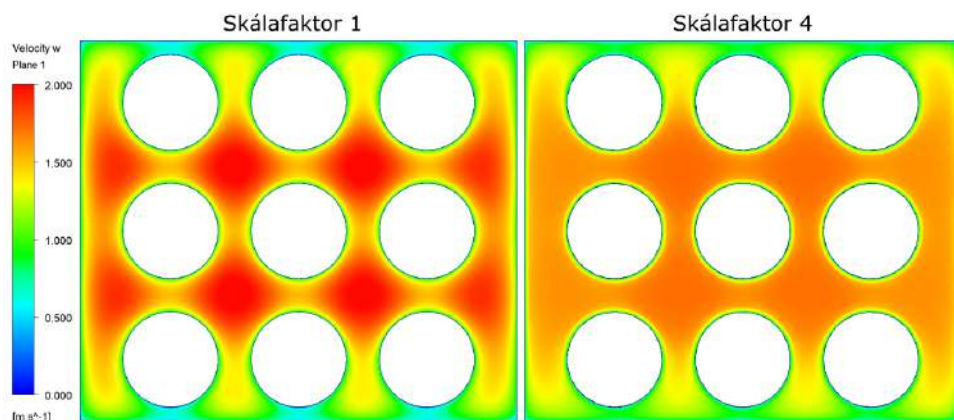
3.9. ábra. Line6 egyenes mentén exportált axiális sebességértékek

A két hálótípus eredményéből az is megfigyelhető, hogy a hibrid hálónak csak a felbontása változott a hálósűrűség hatására (3.10. ábra). Az ábrán a sebességprofilok egy csúcsát nagyítottam ki, hogy szemléltethető legyen a különböző hálósűrűségek hatása. Látható, hogy a ritkább hálók sokkal töredezebb sebességprofilot mutatnak, mint a sűrűbbek. Továbbá a strukturálatlan háló a 2 skálafaktorú hálósűrűség mellett közelítette meg a hibrid háló eredményét, ezért a Single Spacer modellt 1 és 2 közötti skálafaktor értékek használatával hoztam létre (lásd következő fejezet).

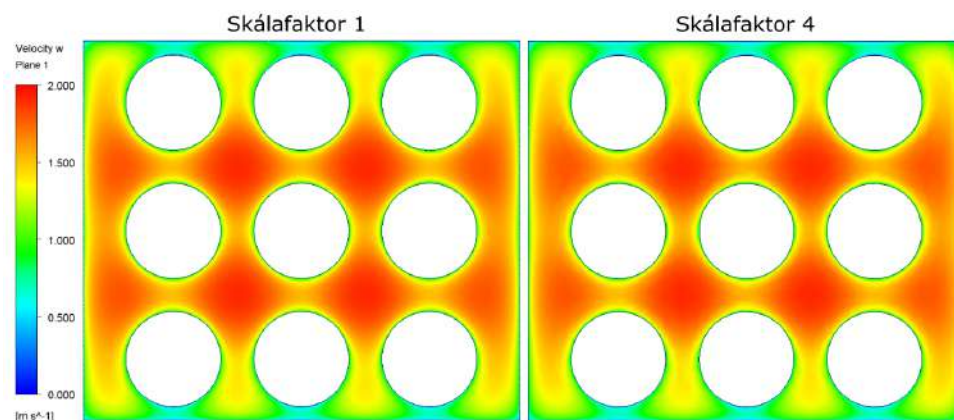


3.10. ábra. Hibrid háló maximumában az axiális sebességeloszlás felbontásának a változása

A 3.11. és 3.12. ábrákon a strukturálatlan háló esetében jól látható, hogy a centrális szubcsatornáknak (1.9. és 1.8. ábrák) drasztikusan csökken az axiális sebesség ritkább háló mellett, ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a hibrid háló szubcsatornáiban az axiális sebesség azonos marad hálósűrűségétől függetlenül. A fal melletti szubcsatornáknak (5-6 és 11-12 cellák a 1.9. ábrán) újabb maximumok találhatók, ezek a 3.9. ábrán is megfigyelhetők.



3.11. ábra. Strukturálatlan háló keresztmetszeti sebességeloszlása



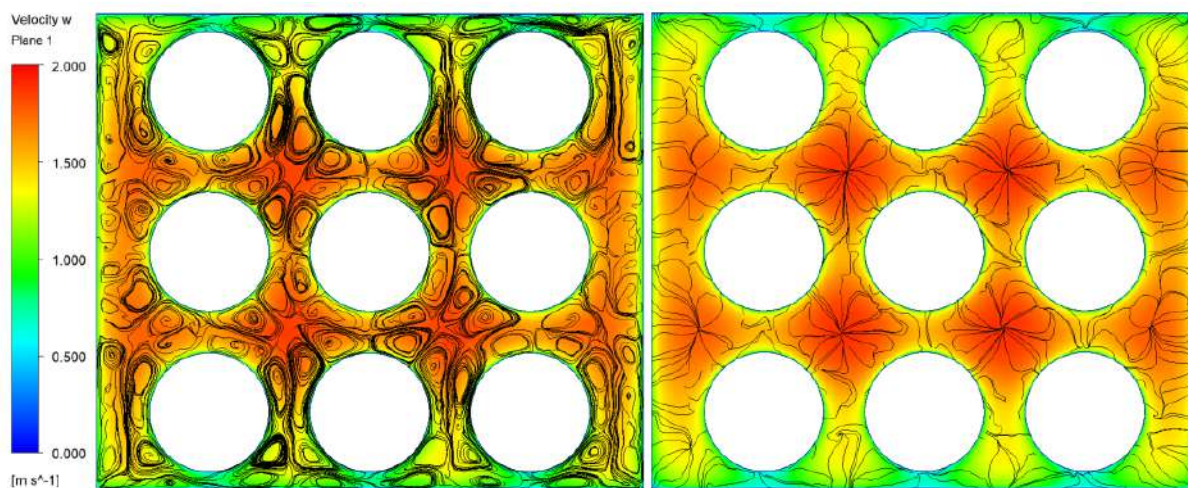
3.12. ábra. Hibrid háló keresztmetszeti sebességeloszlása

Szintén a fal melletti szubcsatornáknál (2-3 és 8-9 cellák a 1.9. ábrán) a csatornafalak és a pálcaburkolatok között csökken az axiális sebesség, ami annak köszönhető, hogy a falak közelében a fluidum sebessége közelíti a nulla értéket. A VHP modell Reynolds szám meghatározására ismertek a sűrűség (peremfeltétel), dinamikus viszkozitás (szimulációból térfogatra átlagolva), a közeg sebessége (szimulációból térfogatra átlagolva) és rendszer karakterisztikus mérete (pálca átmérője). A Reynolds szám értéke:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1018.88 \cdot 1.43843 \cdot 10^{-2}}{5.02682 \cdot 10^{-4}} = 29155.36. \quad (9)$$

A Reynolds szám értéke nagyobb, mint 2300, ami igazolja, hogy turbulens az áramlás.

A VHP modellre végzett számításokat egy turbulencia modell vizsgálattal zártam. A CFD módszertanban köztudott, hogy az SST turbulencia modell nem számol szekunder örvényeket, egy nála bonyolultabb turbulencia modell viszont igen. Ennek igazolásának érdekében elvégeztem egy BSL turbulencia modell számítást is a 2 skálafaktor sűrűségű hibrid hálóra, hogy kizárjam a hálósűrűség hatását, majd a 3.13. ábrán látható eredményeket kaptam. Jól látható, hogy a BSL turbulencia modell eredményében megjelennek a szekunder örvények a pálcák burkolatának közelében, viszont az SST eredményeiben nem.



3.13. ábra. Hibrid és strukturálatlan háló örvényei

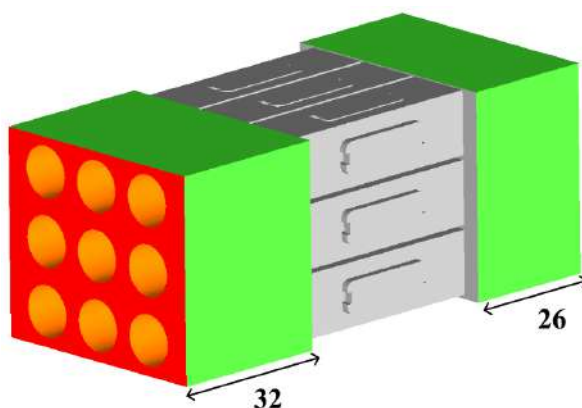
A Single Spacer és a Two Spacer modellek bemeneti sebességprofiljának a BSL turbulencia modellel számolt VHP eredményét illesztettem, mivel más kutatásokban is hasonló eredményekhez jutottak [13].

3.2. Non Vane Grid – NVG

A Non Vane Grid-nek (keverőfül nélküli távtartórács) több változata van, ezért elneveztem őket **Single Spacer**, **Two Spacer**, és **Full Bundle**-nak. A **Single Spacer** az egy, a **Two Spacer** a két és a **Full Bundle** a négy távtartórácsot tartalmazó változatok. A Two Spacer tartalmazza a két közbelső távtartórácsot, a Full Bundle a PIV kísérletben használt tesztcsatorna modellje (2.2. ábra).

3.2.1. Geometria

A változatok geometriájának elkészítéséhez létrehoztam egy SHORT (rövid) geometriát, amely a távtartórács közelében tartalmaz rövid belépő és kilépő szakaszokat, ezek hossza 26 mm és 32 mm. A VHP geometriájához viszonyítva csak a távtartórácsban (szürke felület – 3.14. ábra) különböznek, a többi felületi elemek azonosak. A SHORT geometria egy lépésben behálózható tetraéderes elemekkel és fali peremhálózással.



3.14. ábra. NVG SHORT geometria

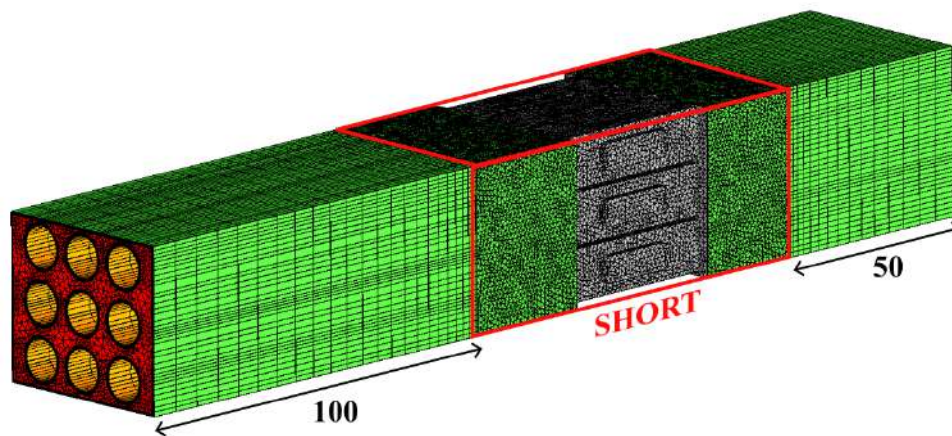
3.2.2. Single Spacer diszkretizálás

A SHORT geometriának hálózásához strukturálatlan hálót hoztam létre. A fali felületekre prizmatikus elemeket definiáltam, ezek 5 rétegűek. A legfinomabb hálónak 1.3, a legdurvábbnak 3 a skálafaktora. A legsűrűbb hálóhoz tartozó 1.3 skálafaktor annak tulajdonítható, hogy a VHP modellből szerzett tapasztalat szerint a túl sűrű háló túlbecsülte a sebességeloszlás maximumát. Mivel a Single Spacer és a VHP geometriája nem egyezik meg, ezért szükségesnek találtam ritkább hálók elemzését is. A meglévő strukturálatlan hálót kihúztam axiálisan mindkét irányba,

rövidebbre a távtartórácsba belépő és hosszabbra ennek a kilépő irányába a 10. függvény szerint.

$$Spacing = 10 \cdot (1 - \exp^{-0.05 \cdot layer}) \quad (10)$$

A 10. egyenletben a térköz változását definiáltam az előző réteg nagyságának függvényében, ezért kihúzáskor a távtartórácshoz közeli rétegek sűrűk, a távolabbi rétegek ritkábbak. Távol a távtartórácstól ismert az áramlási tér a VHP modellnek köszönhetően, ezért csak a távtartó közelében fontos ennek részletes diszkretizálása. Ez felgyorsítja a CFD szimulációk futását, köszönhetően az elemszámok csökkenésének. Az így elkészített új hibrid hálót LONG-nak (hosszú) neveztem el, amely leköveti a SHORT háló sűrűségét. A LONG hálót használtam a Single Spacer számításaihoz. A tesztszatorna szempontjából ez elegendő teret adott a távtartórács közvetlen környezetében a kialakult áramlás vizsgálatára.



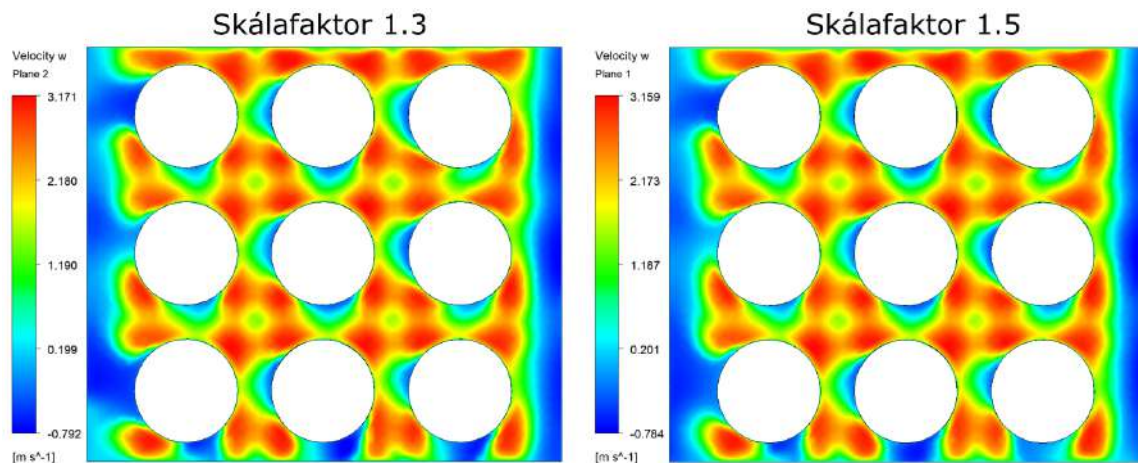
3.15. ábra. Single Spacer háló

A Single Spacer peremfeltételei megegyeznek a VHP (3.1.) modellben használt peremfeltételekkel azzal a különbséggel, hogy a távtartórácsnak csúszásmentes fali peremfeltételt adtam meg. A számolás Steady State módszerrel és SST turbulencia modellel lett elvégezve.

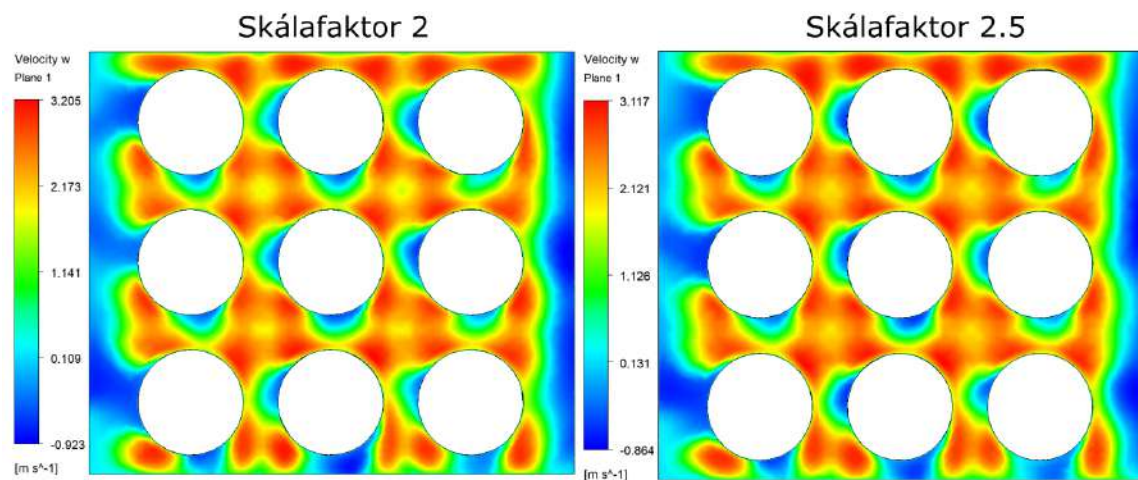
3.2.3. Single Spacer - CFD számítás eredményei

A jelen és a következő fejezetek eredményeinek bemutatására egy egységnyi távolságot definiáltam, ez a pálca átmérője (10 mm), amit a továbbiakban **D**-vel jelölök. A D távolság a távtartórács kilépési pontjától mért távolság az áramlás irányába. A 0.5D (5 mm), 1D (10 mm), 2D (20 mm), 3D (30 mm), 5D (50 mm) és 10D (100 mm) távolságok relevánsak számomra,

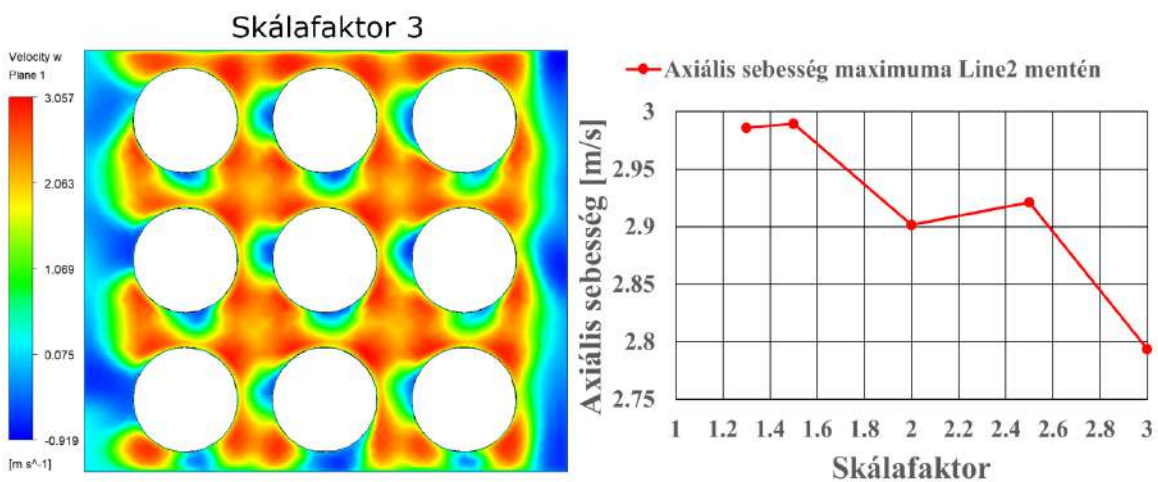
mivel ezen távolságokra vizsgálták meg a PIV kísérlet egyenes menti sebességeloszlásait.



3.16. ábra. 1.3 és 1.5 skálafaktor sűrűségű hálók keresztmetszeti sebességeloszlása 0.5D-ben

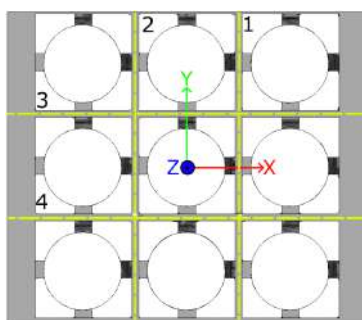


3.17. ábra. 2 és 2.5 skálafaktor sűrűségű hálók keresztmetszeti sebességeloszlása 0.5D-ben



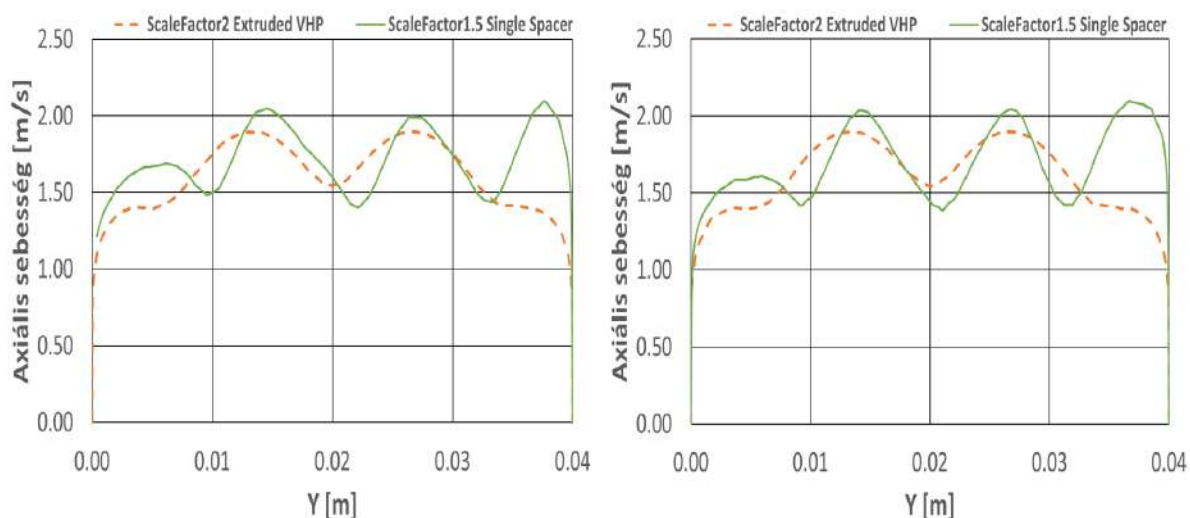
3.18. ábra. 3 skálafaktor sűrűségű háló keresztmetszeti sebességeloszlása 0.5D-ben és Line2 mentén vett axiális sebességek maximuma skálafaktor függvényében

A 3.16., 3.17. és 3.18. ábrákon a különböző hálósűrűségek hatása látható az axiális sebességeloszlásokra, 0.5D-ben. A sűrűbb háló eredményében megfigyelhető, hogy a centrális szubcsatornáknakban (1.9. ábra) a keresztmetszeti sebességeloszlások felbontása pontosabb, mint a ritkább hálók esetében. A 3.18. ábra jobboldali grafikonján a skálafaktor függvényében lettek a maximális axiális sebességértékek feltüntetve. A 1.3 és 1.5 skálafaktoroknak megfelelő sűrűségű hálók axiális sebességfelbontása megegyezik a Line2 mentén végzett vizsgálat szerint, ezért a 1.5 skálafaktornak megfelelő hálósűrűség elegendően precíz eredményt biztosít. A következő eredmények a 1.5 skálafaktorú modellnek tulajdoníthatók. Mivel az axiális sebességkomponens a domináns, ezért az eredményeim ennek vizsgálatára összpontosulnak.

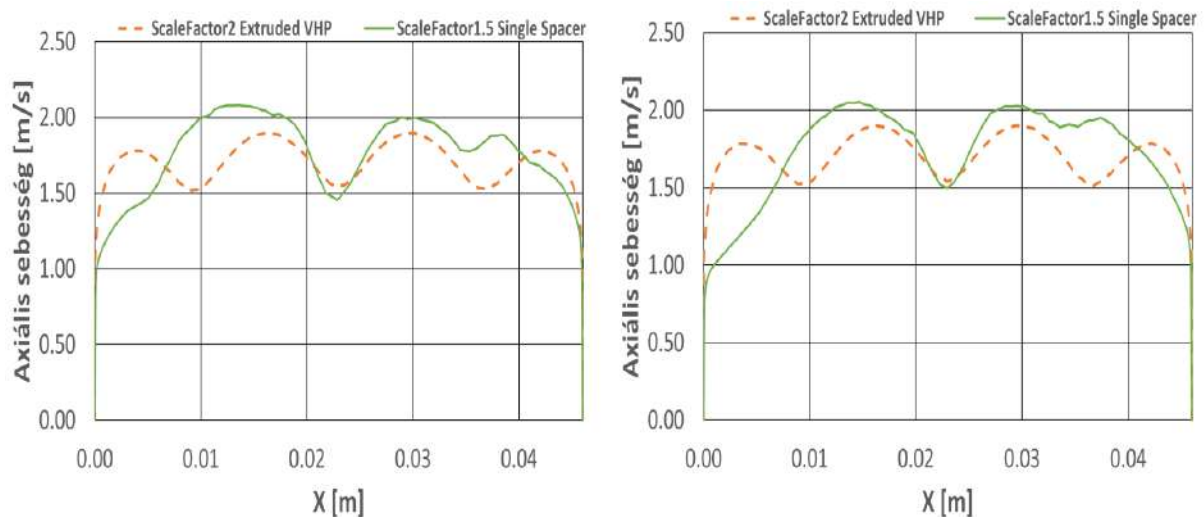


3.19. ábra. A sebességprofilok monitorvonaljainak pozíciója a távtartórácshoz viszonyítva

A 3.19. ábrának megfelelően az 1, 2, 3 és 4 számozású egyenesek mentén vizsgáltam meg a síkra merőlegesen a keresztmetszeti sebességeloszlásokat axiális irányban. A távtartó hatásának megfigyeléséhez összevettem a VHP és a Single Spacer 10D-ben vett axiális sebességeloszlását. A VHP modellben definiált Line1, Line2, Line5 és Line6 (3.6. ábrán) megfelel a Single Spacer-nek készített 3.19. ábrán a 1, 2, 3 és 4 merőleges síkok pozíciójának.

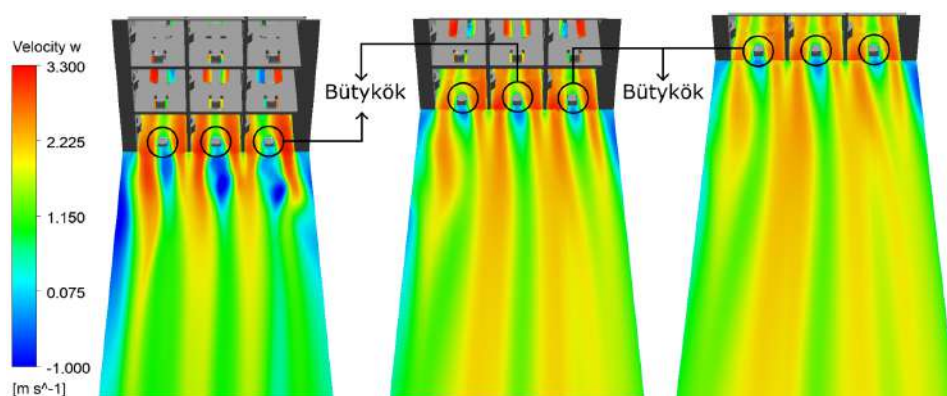


3.20. ábra. Távtartórács hatása az axiális sebességre Line1 (bal) és Line2 (jobb) mentén



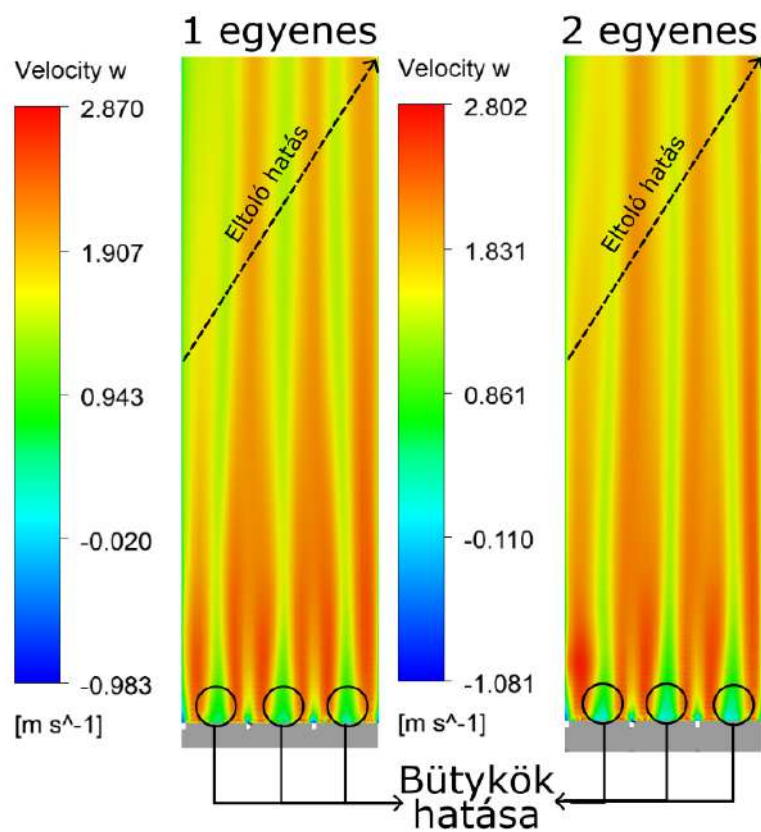
3.21. ábra. Távtartórács hatása az axiális sebességre Line5 (bal) és Line6 (jobb) mentén

A 3.20. és 3.21. ábrákon az látható, hogy a távtartórács hatására az Y tengelyen négy maximum jött létre a VHP két maximumához képest. Az $X=40$ mm pozícióban található csúcsot elneveztem eltolási csúcsnak. Létrejött azzal magyarázható, hogy a geometria Y irányának mentén a csatornát határoló falak és a távtartórács legmagasabb, illetve a legalacsonyabb pontjai közötti távolság eltér úgy, hogy a 40 mm környékén ez kisebb, 0 mm környékén nagyobb. Ennek köszönhetően a távtartórács alján örvényleválás jön létre (lassító hatás), míg a tetején ez nem valósul meg (nincs lassító hatás). Az eltolási csúcs fontos a következő modellek elemzésében. A 3.21. ábrán az eredeti VHP eloszlás alakja úgy változott, hogy a négy maximum kvázi két maximummá egyesült.

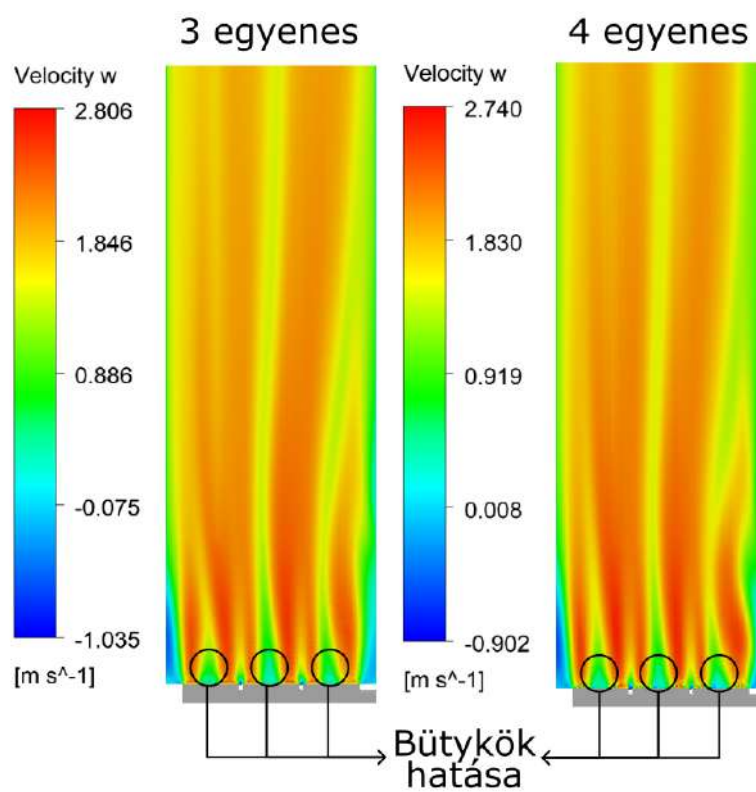


3.22. ábra. Bütykök hatása az áramlásra

A távtartórácsokat közelebbről vizsgálva az látható, hogy a bütykök okozzák az axiális sebesség változását. A bütykök leválási buborékokat képeznek, ezért mögöttük örvények válnak le, amelyeket a 3.22. ábrán negatív sebességértékű tartományokban figyelhetünk meg.



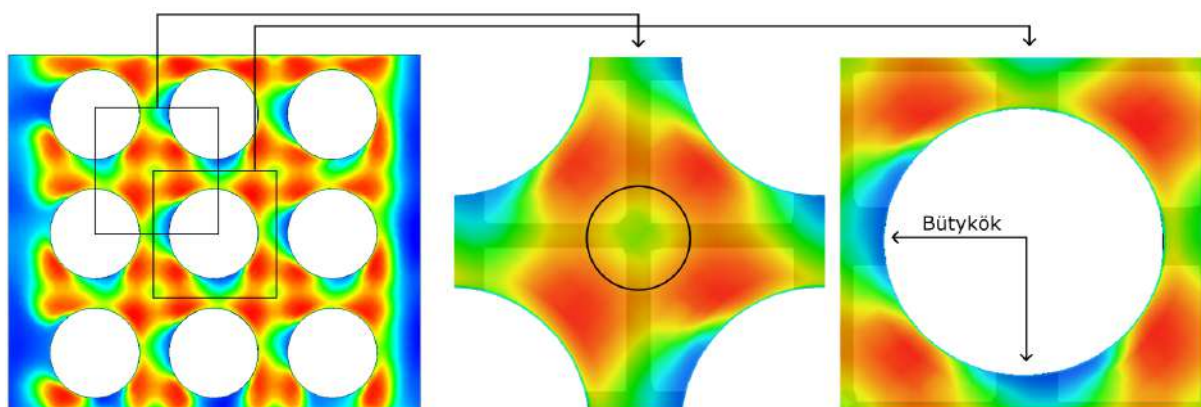
3.23. ábra. 1 és 2 egyenesekre merőleges keresztmetszeti axiális sebességkomponens eloszlása



3.24. ábra. 3 és 4 egyenesekre merőleges keresztmetszeti axiális sebességkomponens eloszlása

A 1, 2, 3 és 4 egyenesekre merőleges síkok keresztmetszeti sebességeloszlása a 3.23. és 3.24. ábrákon található. Feltüntettem a bütykök hatását, ami az axiális sebesség csökkenésében valósul meg, illetve a fentebb említett eltolási effektust, ami a 3.19. ábrán az Y tengely mentén található. Az eltolási effektus a távtartórácson található bütykök és laprugók pozícióinak eltolási szimmetriájából jön létre.

Utolsó megfigyelésemnek ábrázoltam a távtartórács körvonalait az axiális irányban vett keresztmetszeti sebességeloszlásban annak érdekében, hogy megfigyelhető legyen az eltolási szimmetria hatása és a centrális szubcsatornában a négy maximum létrejöttének az oka. Az látható, hogy a távtartórács cellájának geometriája miatt (1.11. ábra) négy gyors sebességcsóva jön létre a távtartórács cella sarkainak a közelében. Kilépéskor a szomszédos távtartórács cellák egy-egy gyors csóvája áramlik a centrális szubcsatornába, ezért látunk négy maximumot a keresztmetszeti eloszlásokban, ez az eltolási szimmetria egyik hatása. A gyors csóvák közötti minimum pont a cellák találkozásánál a kereszt alakú csatlakozásnak köszönhető (lásd 3.25. ábrán).

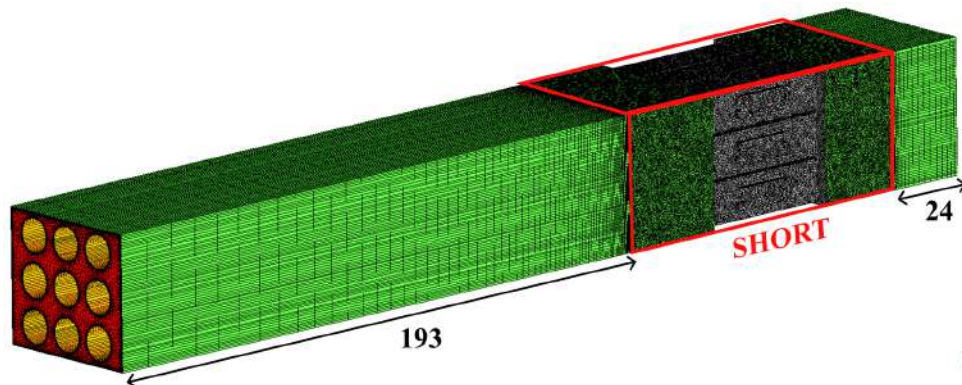


3.25. ábra. Centrális szubcsatorna és távtartórács cella sebességeloszlásának vizsgálata

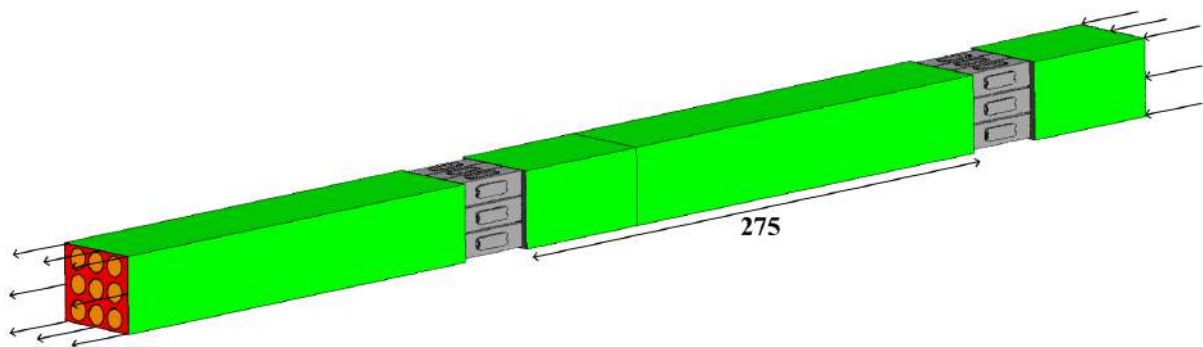
3.2.4. Two Spacer diszkretizálása

A Two Spacer-nek újradefiniáltam a LONG hálót, mivel ennek axiális hossza meg kell egyezzen a tesztszobában használt távtartók közötti távolsággal. A távtartó utáni csatorna teljes hosszát 225 mm-nek, az előtte levőét pedig 50 mm-nek állítottam be (3.26. ábra). Két LONG háló összekapcsolásakor az össztávolság megfelel a PIV tesztszobában használt távtartórácsok közötti átlag távolságnak, ami 275 mm. A hálót egyenes menti kihúzással készítettem 1.05 növekedési rátával, a legnagyobb cella mérete a 193 mm tartományban 10 mm,

a 24 mm tartományban pedig 2.3 mm (3.26. ábra). Az elkészített hálót betöltöttem a CFX Pre-be kétszer, majd a két hálót összekapcsoltam egy ún. Domain Interface beágyazásával (3.27. ábra). Az első távtartórácsot Spacer1-nek, a második távtartórácsot pedig a Spacer2-nek neveztem el.



3.26. ábra. Two Spacer 1.5 skálafaktorú újradefiniált hálója



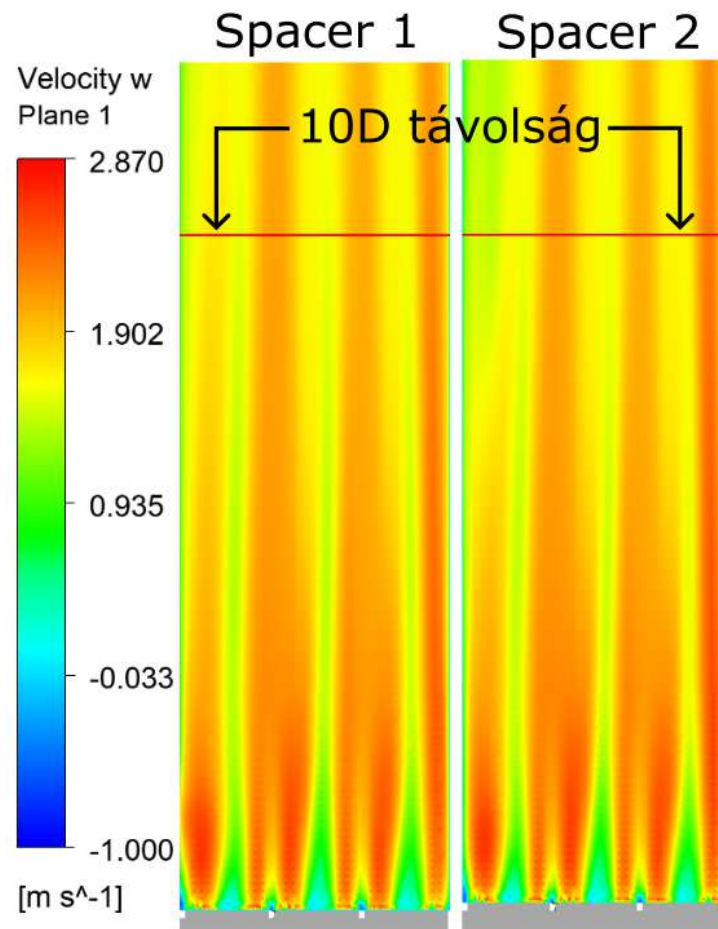
3.27. ábra. Two Spacer modell betöltése CFX-PRE-be

A háló betöltését követően megadtam a peremfeltételeket, ezek megegyeznek a Single Spacer modellekben használt peremfeltételekkel. A számítások elvégzésére BSL turbulencia modellt használtam, Steady State számítási módszerrel.

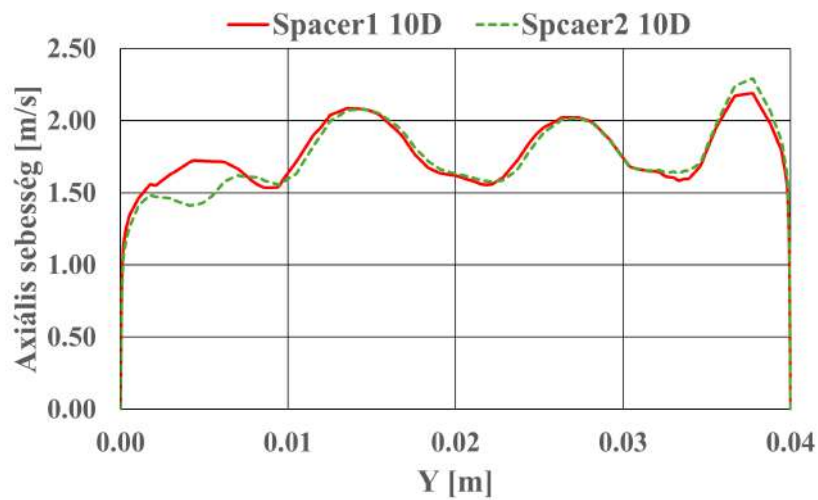
3.2.5. Two Spcaer - CFD számítás eredményei

A Two Spacer CFD számításaiból kapott eredményeket megvizsgálva arra a következtetésre jutottam, hogy ezek megegyeznek a Single Spacer CFD eredményeivel, azonban az eltolási hatás intenzívebb a második távtartó utáni csatornarészben. A 3.29. ábrán látható az első távtartó és a második távtartó utáni 10D távolságra vett axiális sebességkomponensek a Line1-mentén. Az első távtartó eltolási csúcsának az értéke kisebb, mint a második távtartó esetében, illetve az is megfigyelhető, hogy a 0 mm és 10 mm között található csúcs az első távtartó után

lassan egybeolvad a 10 mm és 20 mm közötti csúccsal. Ez a hatás a távtartórács eltolásának köszönhető, a 3.28. ábrán jobban látható 10D-nél távolabbi pontokban a hatás kibontakozása.

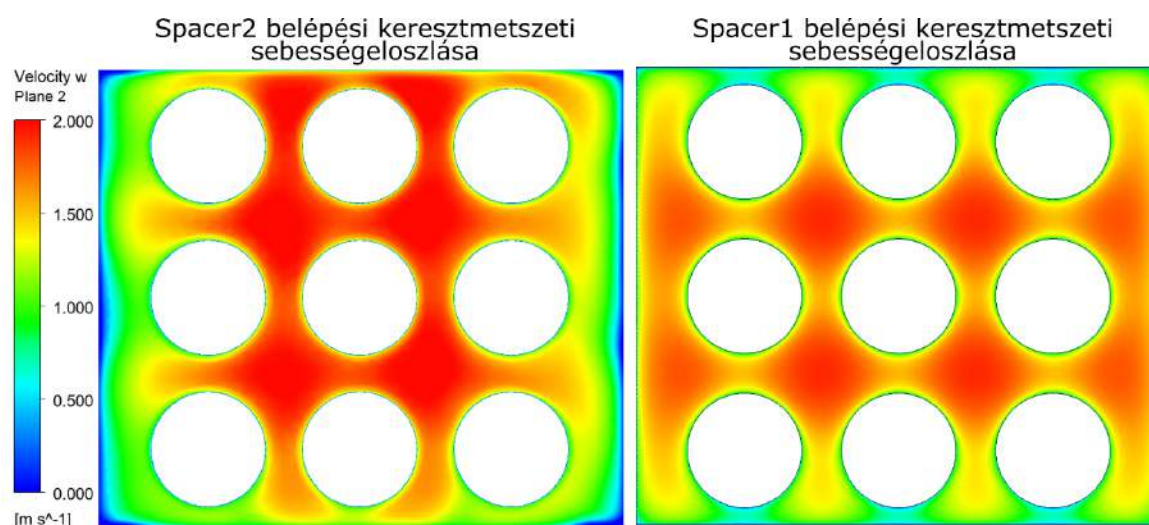


3.28. ábra. Két egymás utáni távtartórács hatása



3.29. ábra. Spacer 1 és Spacer 2 Line1 egyenes mentén 10D-ben exportált axiális sebességek

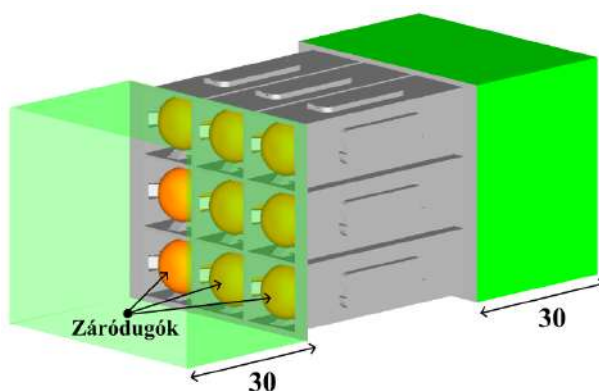
Megemlítendő, hogy már a két távtartórácsba beáramló közeg 2D sebességeloszlása sem azonos (lásd 3.30 ábra), emiatt nem meglepő a különböző sebességprofil. Viszont a távtartó utáni 2D sebességeloszlás alakja közel megegyezik.



3.30. ábra. Két egymás utáni távtartórács hatása

3.2.6. Full Bundle diszkretizálása

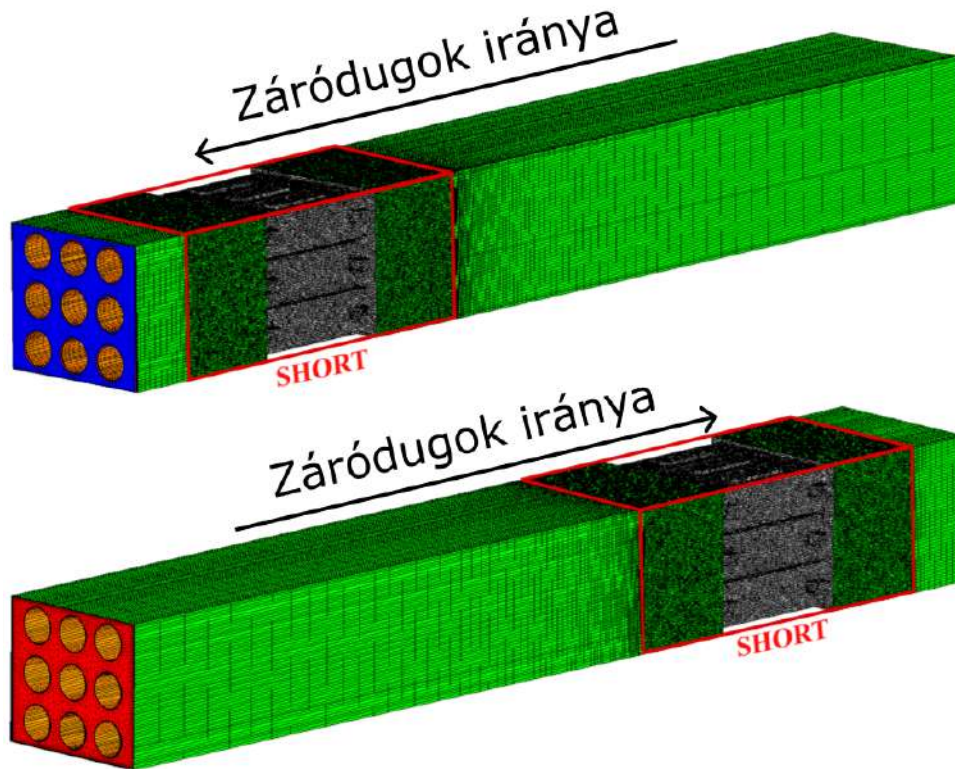
A tesztcsatornában használt pálcáknak a végeit záródugókkal zárták le, emiatt egy olyan geometriát hoztam létre, amely tartalmazza ezeket. Ezt elneveztem EDGE-SHORT-nak. Az első és a negyedik távtartórácsban végződő pálcaköteg geometriája ilyen. Az EDGE-SHORT geometria egy lépésben behálózható tetraédes és fali peremhálózással a SHORT hálózhoz hasonlóan. A Full Bundle elkészítéséhez létrehoztam a SPACER1-LONG hálót egyenes menti kihúzással, a kilépő ágát 225 mm és a belépő ágát 50 mm hosszúságokra méreteztem.



3.31. ábra. Záró és nyitó távtartórács geometriája

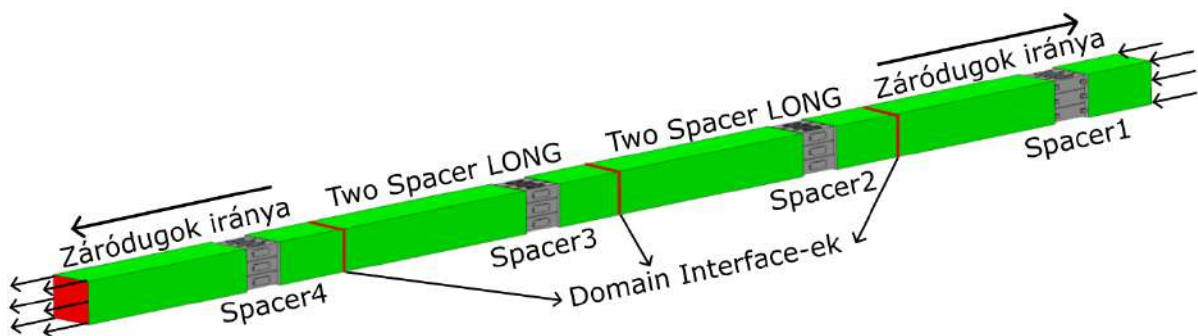
Mivel a végső és a kezdeti távtartórácsokban a záródugók iránya nem egyezik meg, ezért

megismételve Two Spacer-nek megtett lépéseket, egy olyan hálót készítettem, amelynek a belépő ága 225 mm és a kilépő ága 50 mm. Ezt elneveztem SPACER4-LONG-nak. A két háló a 3.32. ábrán látható.



3.32. ábra. Nyitó és záró távtartórács hálója és a záródugók iránya

A záró és nyitó távtartórácsok hálóit és a Two Spacer LONG hálóját betöltöttem a CFX-Pre programba, majd ugyanazon peremfeltételeket definiáltam, mint a Two Spacer modell esetében, viszont a bemenő tömegáram a kezdeti távtartórácsnak ez esetben egyenlő a csatorna axiális keresztmetszetének minden pontján, és ennek értéke megegyezik a VHP modellben használt tömegárammal. A hálók összecsatolását hasonlóan ún. Domain Interface-ekkel csatlakoztattam. A szimulációkat BSL turbulencia modellekkel végeztem el, Steady State számítási módszerrel.

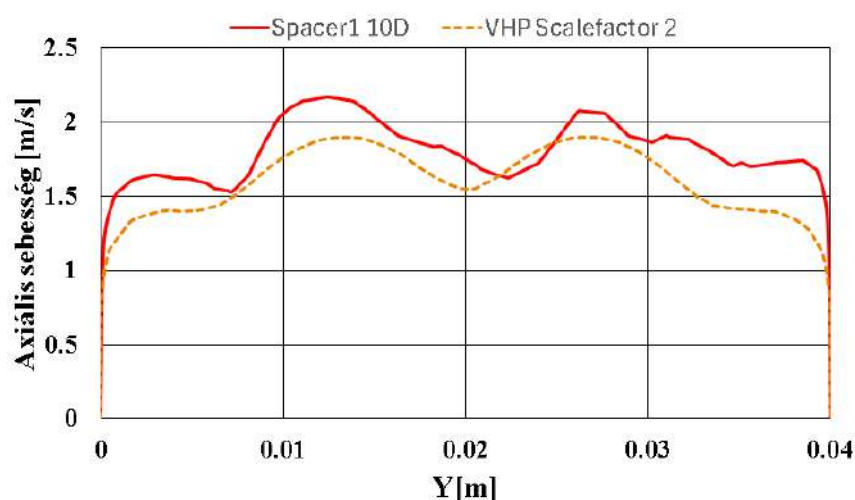


3.33. ábra. Full Bundle tesztcsatorna betöltése CFX-Pre-be

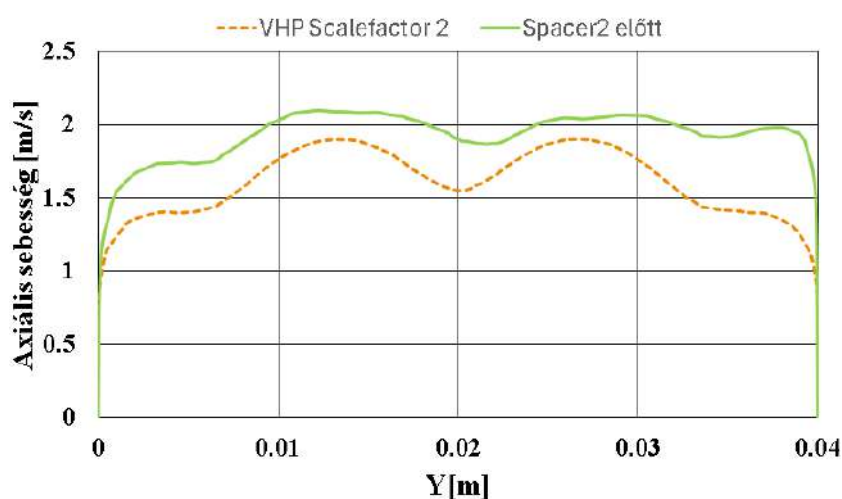
3.2.7. Full Bundle - CFD számítás eredményei

A Full Bundle modellre kapott CFD eredmények kvalitatíve megegyeznek a Two Spacer esetében kapott számítási eredményekkel, szinte elhanyagolható különbségeket tapasztaltam a Spacer3 utáni 2D sebességeloszlásokban.

Mivel a Spacer1 előtti csatornában egyenletes tömegáram peremfeltételt adtam meg, ezért érdemes összehasonlítani a Spacer1 utáni csatornában számolt eredményeket a VHP eredményeivel.



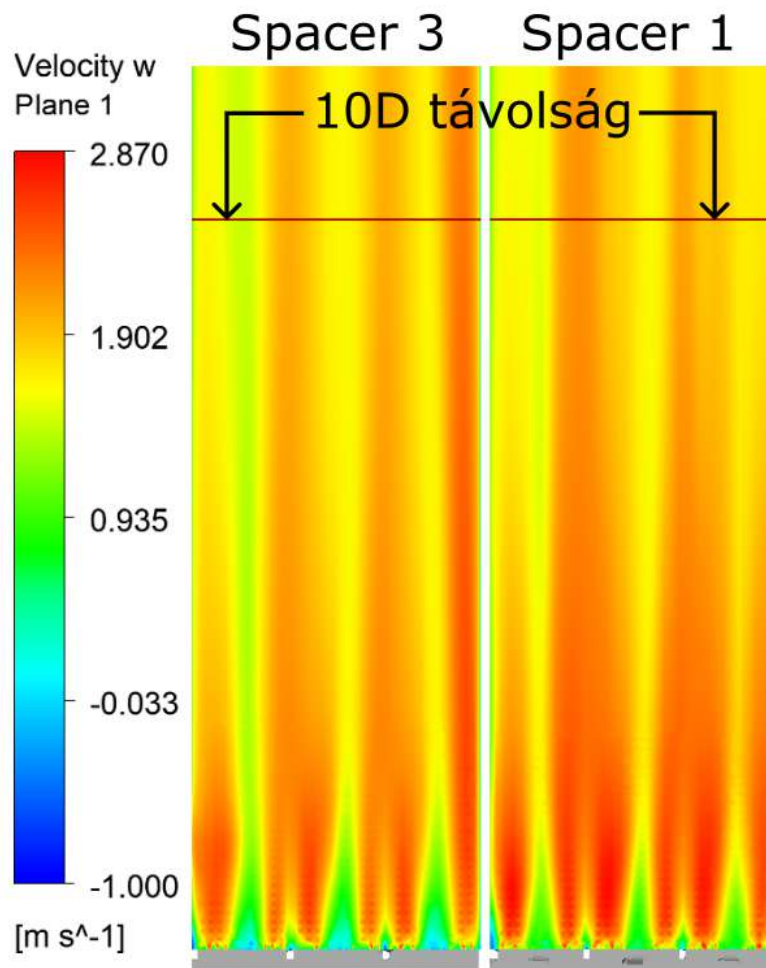
3.34. ábra. Full Bundle Spacer1 és a VHP axiális sebességének az összehasonlítása Line2 mentén



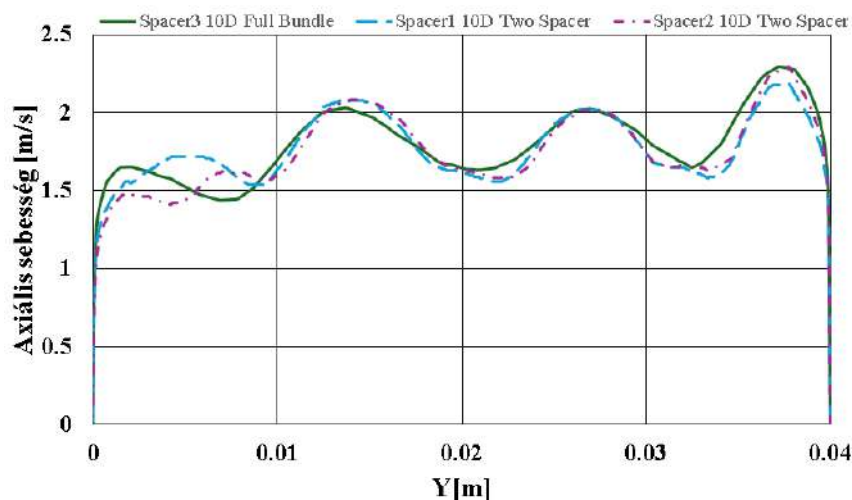
3.35. ábra. Full Bundle Spacer2 előtti és VHP axiális sebességének összehasonlítása Line2 mentén

Látható, hogy a Spacer1 Line2 mentén, 10D-ben exportált axiális sebességeloszlása (3.34.

ábra) közelíti a VHP modell eredményét, a Spacer2 belépési pontja előtt pedig szinte ugyanazt az alakot adta vissza (lásd 3.35. ábrán), csak enyhén magasabb sebesség értékekkel. A CFD számítás szerint a 275 mm csatornahossz nem elegendő, hogy a VHP-re jellemző sebességeloszlás kialakuljon, ezért a Full Bundle Spacer1 utáni csatorna eloszlása különbözik a Two Spacer belépési csatornájának eloszlásától. Az eddigi tapasztalatok szerint azonban a csatorna előélete enyhén befolyásolja a távtartórácsok utáni áramlás alakját (kivételt képez a Spacer1 sebességeloszlása 3.36. ábrán, mivel az INLET egyenletes tömegáramú peremfeltételt adtam meg), ezért mondhatjuk, hogy a Two Spacer és a Full Bundle eredményei megegyeznek. Ezt a tényt az is igazolja, hogy a Two Spacer - Spacer2 után vett és a Full Bundle - Spacer3 után vett eltolási csúcsok maximális sebessége telítődött a $2.3 \frac{m}{s}$ értéknél (3.37. ábra), tehát a Full Bundle Spacer1 ugyanazokat a körülményeket hozza létre, mint a Two Spacer VHP INLET-el vett modell esetében, ezért a számítási eredmények is megegyeznek.



3.36. ábra. Full Bundle Spacer3 és Spacer1 2D sebességeloszlásai Line2-re merőleges síkban



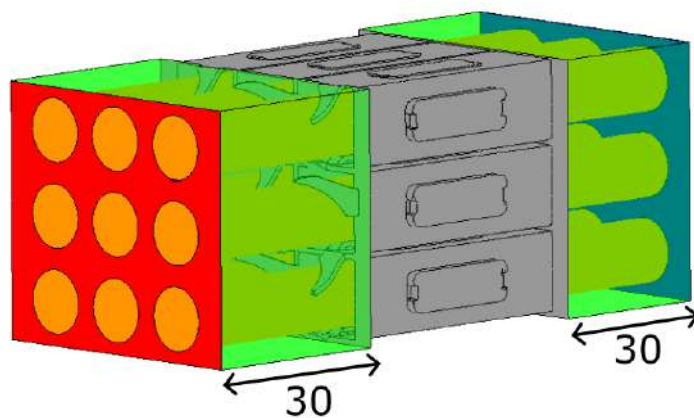
3.37. ábra. Full Bundle-Spacer3 és Two Spacer-Spacer1-Spacer2 axiális sebességeknek az összehasonlítása Line2 mentén

3.3. Mixing Vane Grid – MVG

A Mixing Vane Grid (keverőfüles távtartórács) modellezését az NVG-hez hasonlóan végeztem el, ezért az MVG almodelleket nem részletezem. Az elért eredmények alfejezetében a Single Spacer és a Full Bundle modellek CFD számításainak bemutatására került sor.

3.3.1. Geometria

Az almodelleket felépítő SHORT geometria hasonlít az NVG SHORT geometriához, fő különbsége a távtartórács belépési és kilépési csatorna hossza (lásd 3.38. és 3.14. ábrákon), illetve a távtartórácsot követő csatornaszakaszba belógó keverőfülek (1.10. ábra).



3.38. ábra. MVG Short geometria

3.3.2. Diszkretizálás

A redundancia elkerülésének érdekében nem részletezem a SHORT geometria diszkretizálását, mivel a háló generálásának lépései megegyeznek a Two Spacer modelljében látható újradefiniált 1.5 skálafaktorú LONG háló (3.26. ábra) létrehozásának lépéseivel. Az így elkészített hálóval a Single Spacer és a Full Bundle számításai elvégezhetők, mivel a PIV kísérlet tesztcsatornájában a távtartók közül a 2. és a 3. távtartórácsokat cserélték ki NVG-ről MVG-re, a záró és nyitó távtartórácsok geometriája azonos maradt.

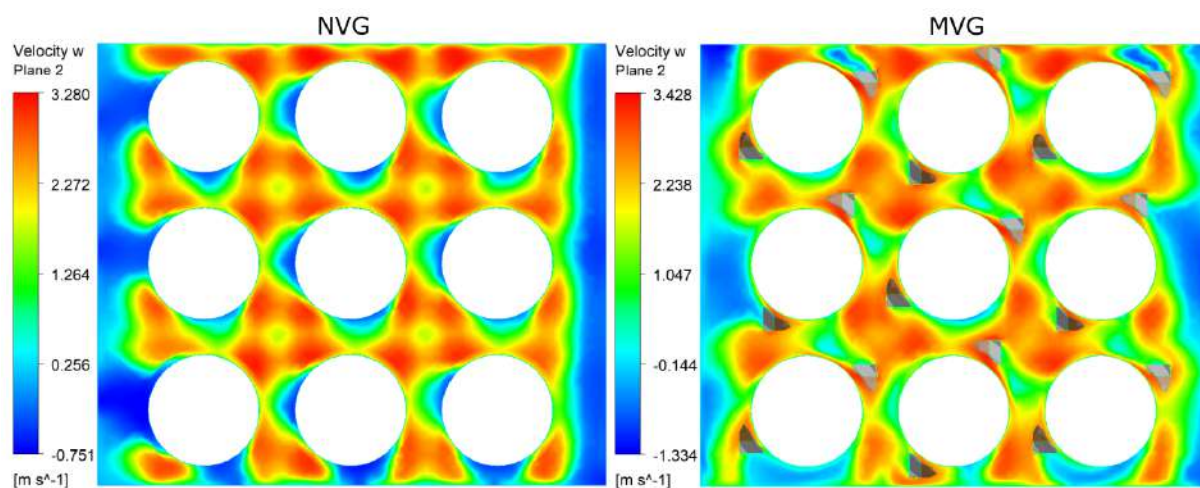
Az így elkészített háló önmagára (Single Spacer) vagy a NVG-Full Bundle-hoz hasonlóan (3.33. ábra) betölthető a CFX-Pre programba a számítások elvégzésére. A megadott peremfeltételek azonosak az NVG Single Spacer és Full Bundle peremfeltételeivel, BSL turbulencia modellt használtam a szimulációk futtatására, Steady State számítási módszerrel.

3.3.3. CFD számítások eredményei

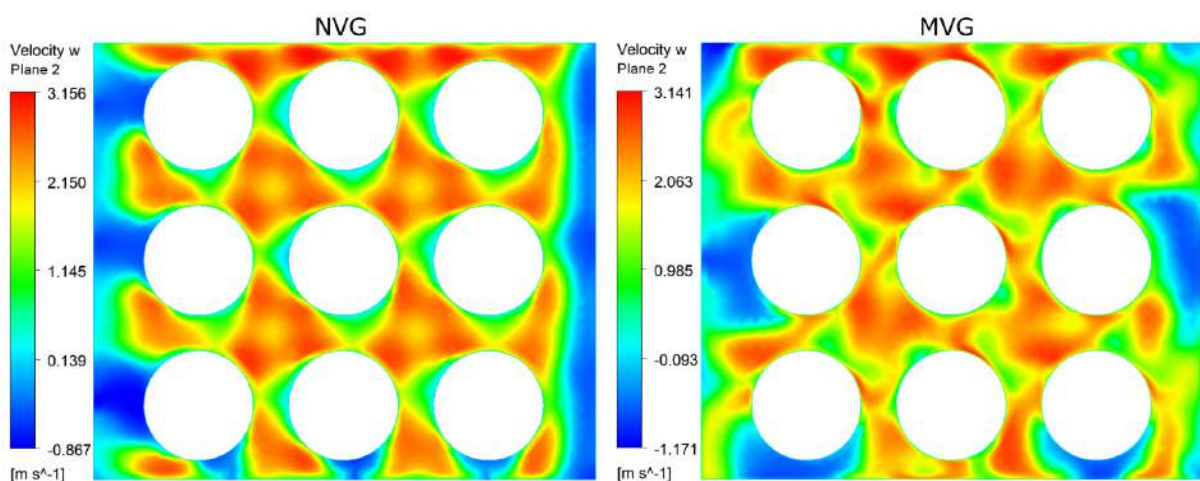
Mivel ugyanazon eredményeket vizsgáltam meg a MVG-re, mint az NVG esetében, ezért külön nem részletezem őket, ezek bemutatására a távtartórácsok összehasonlításának fejezetében kerül sor, ahol a távtartórácsok áramlásra gyakorolt hatásai közötti különbségek láthatók.

4. NVG és MVG CFD számításainak összehasonlítása

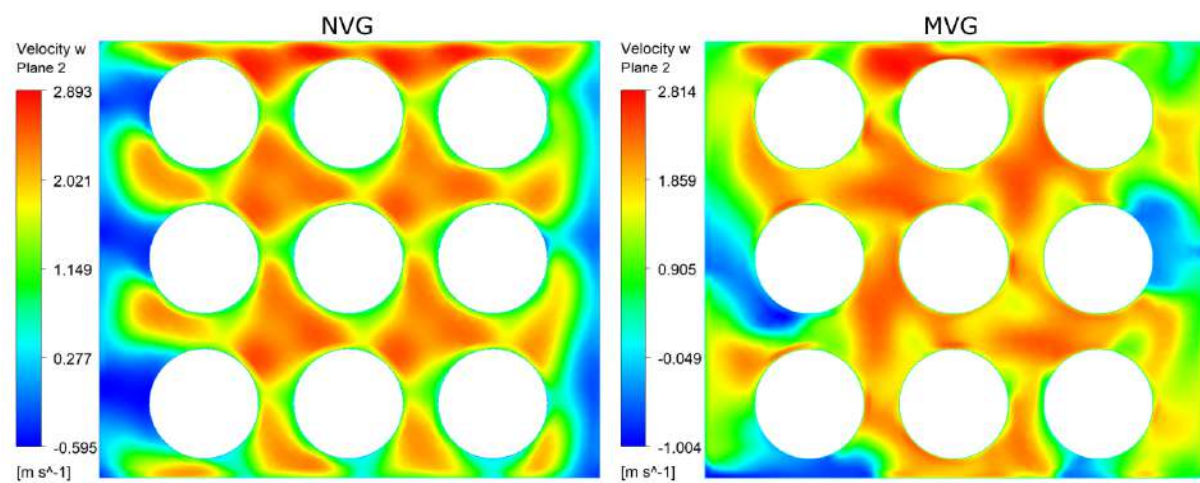
A két távtartórács összehasonlítására a Full Bundle modellek Spacer2 és Spacer3 közötti csatornáit vizsgáltam, azon belül a sebességterek evolúcióját. Ennek folyamatát 0.5D, 1D, 2D, 3D, 5D és 10D távolságok mentén követtem, melyeknek eloszlása a 4.1., 4.2., 4.3., 4.4., 4.5. és 4.6. ábrákon láthatók. Az egyik lényeges különbség az eltolási hatás megszűnése, amely a keverőfüleknek tulajdonítható, mivel ezek perturbálják az NVG sebességeloszlását. Megfigyelhető, hogy a keverőfülek az eredeti NVG sebességeloszlás azon pontjaiban találhatók, ahol maximumok vannak, emiatt sokkal intenzívebb turbulenciát okoznak az áramok eltérítésével. Ennek egyik hatása, hogy a fal melletti szubcsatornáknál megnő az axiális sebesség az NVG sebességeloszlásában látható értékekhez képest. Egy másik hatása, hogy a 10D sebességeloszlásban több maximumot láthatunk, mint az NVG esetében.



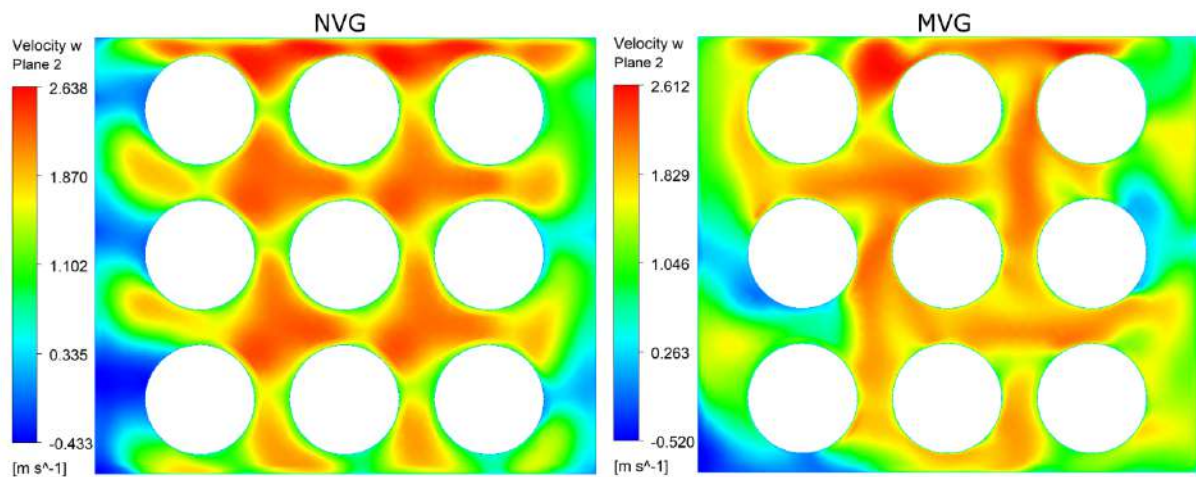
4.1. ábra. NVG és MVG axiális sebességeloszlása 0.5D-ben



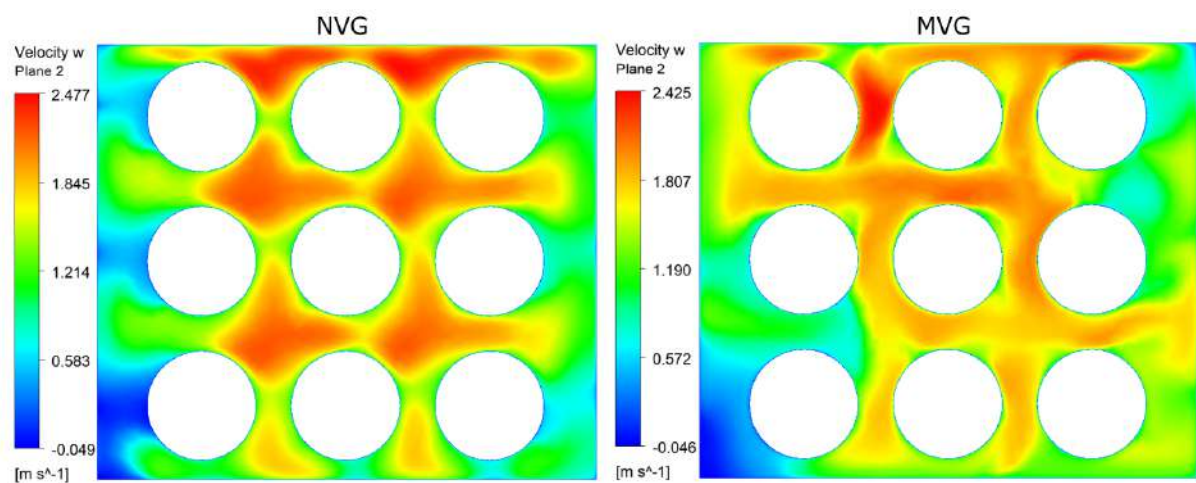
4.2. ábra. NVG és MVG axiális sebességeloszlása 1D-ben



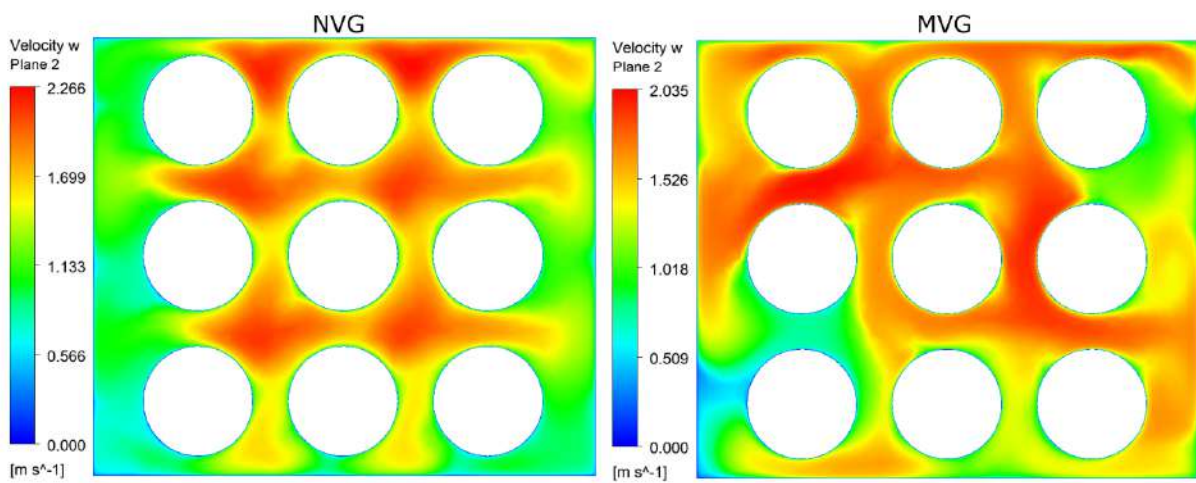
4.3. ábra. NVG és MVG axiális sebességeloszlása 2D-ben



4.4. ábra. NVG és MVG axiális sebességeloszlása 3D-ben

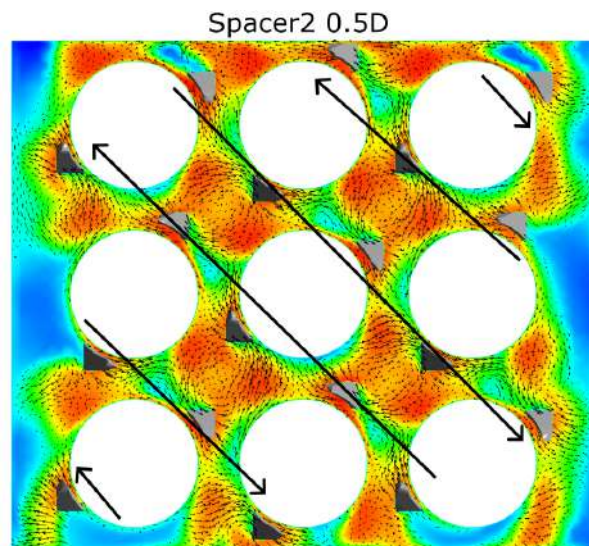


4.5. ábra. NVG és MVG axiális sebességeloszlása 5D-ben

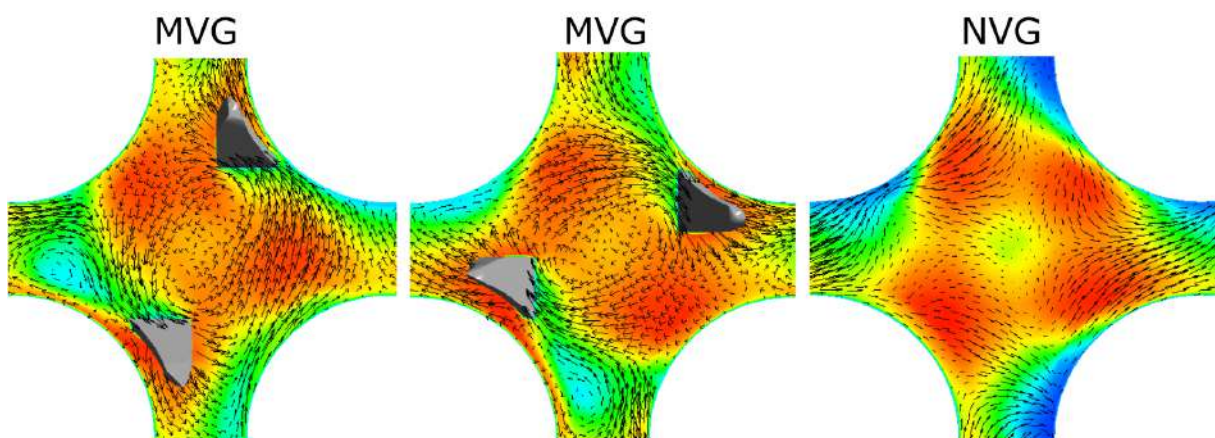


4.6. ábra. NVG és MVG axiális sebességeloszlása 10D-ben

Az MVG egy pálcája körül egy keverőfűl pár található, különböző elrendezésekben. Az egyik elrendezésben a két keverőfűl horizontálisan, a másodikban pedig vertikálisan vannak szembeállítva. Egy centrális szubcsatorna szempontjából a keverőfűlek ellentétes irányokba mutatnak (4.7. ábra), aminek az egyik hatása az, hogy közvetlenül a távtartórácsból való kilépést követően a centrális szubcsatornából áramlások keletkeznek a szomszédos szubcsatornákba, illetve egy örvény keletkezik a centrális szubcsatorna közepében. Az NVG esetében ilyen hatás nem figyelhető meg. A 4.7. ábrán az látható, hogy a keverőfűlek a főátló és mellékátlók mentén a pálca körüli keverőfűl párok ugyanazon elrendezésűek. Ennek közvetlen hatása az, hogy a távtartórácsból való kilépéskor több keverőfűl hatása összeadódik, ennek eredményeként váltakozó irányú áramok jönnek létre a csatorna átlói mentén.

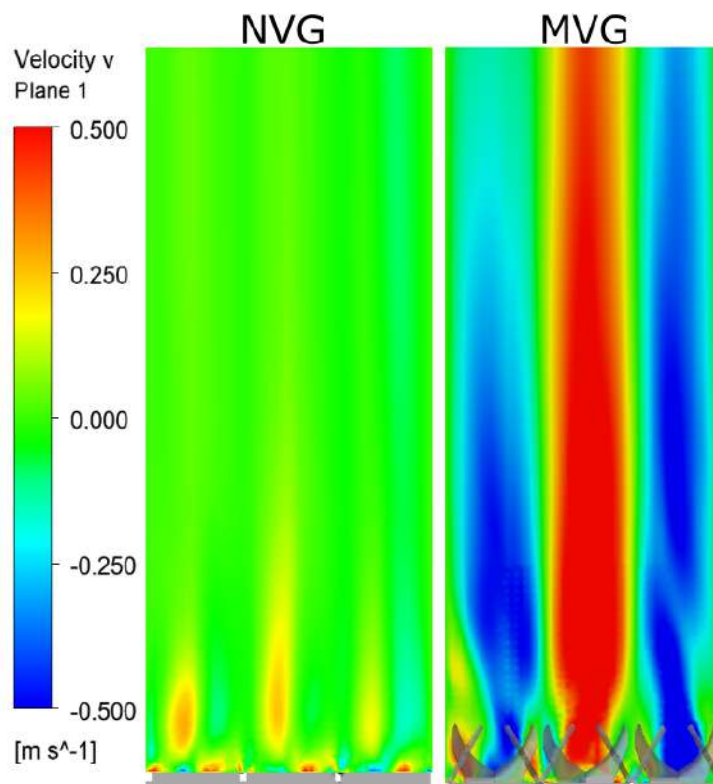


4.7. ábra. NVG és MVG axiális sebességre merőleges áramlás 0.5D-ben

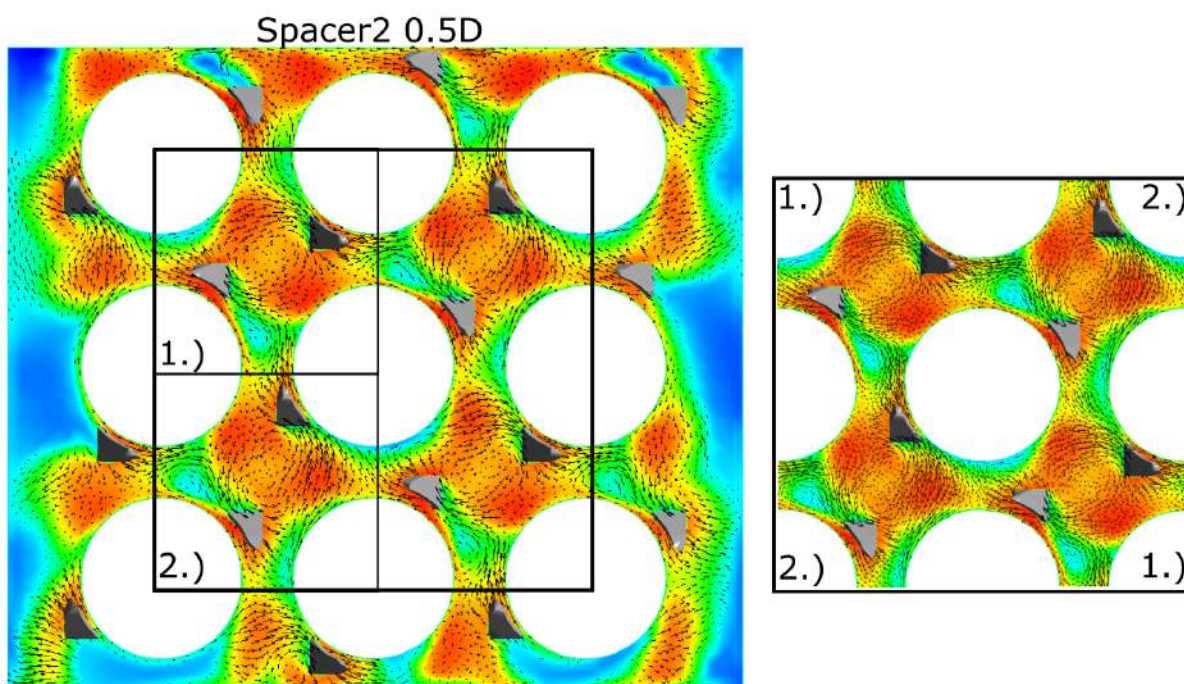


4.8. ábra. NVG és MVG centrális szubcsatornáiban axiális sebességre merőleges áramlás 0.5D-ben

A fentebb elmondottakból egy jó viszonyítást nyújt a Line2-re merőleges síkon az Y irányú sebességeloszlás. A 4.9. ábrán megfigyelhető az, hogy az elvárás szerint az Y irányú sebességkomponens (Velocity v) sokkal intenzívebb a MVG rács esetében.



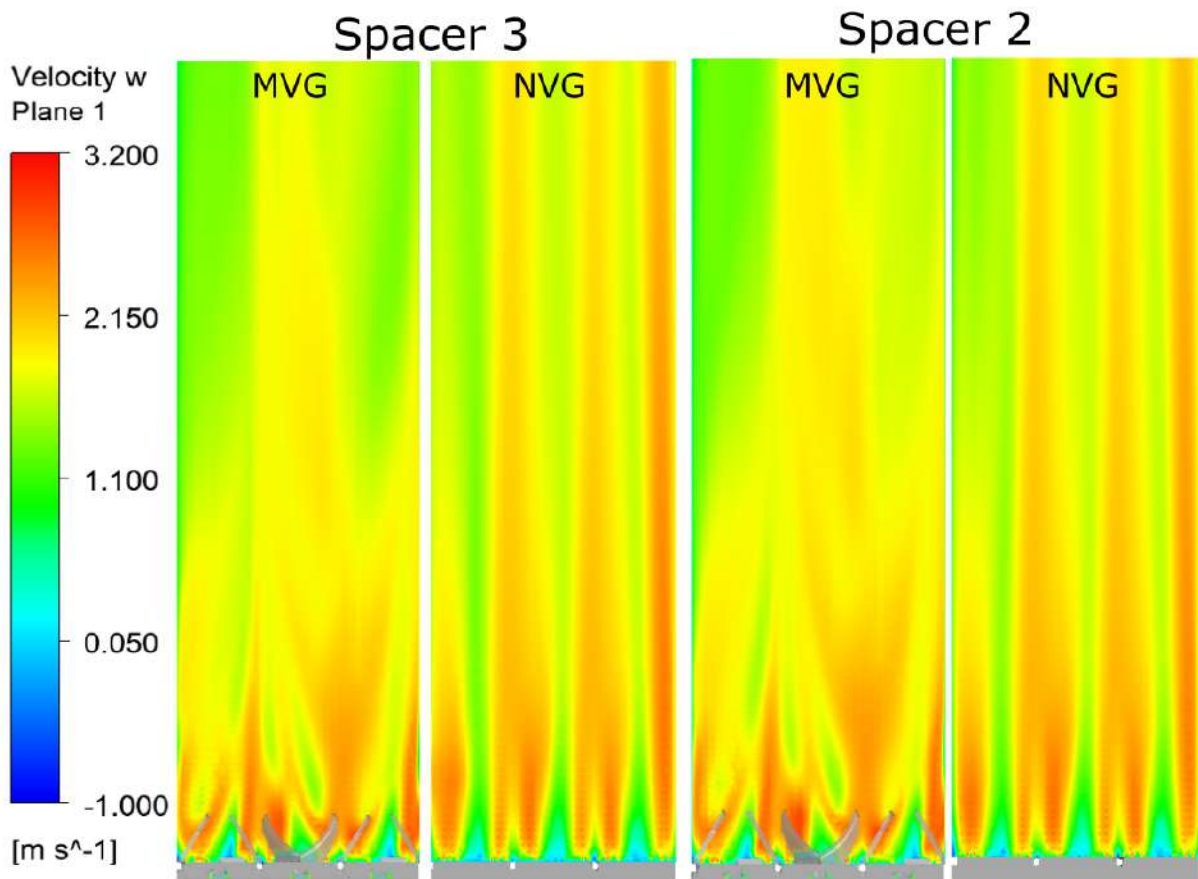
4.9. ábra. NVG és MVG Spacer2 utáni Line2-re merőleges síkban Y irányú sebességeloszlásai



4.10. ábra. MVG centrális szubcsatornák szimmetriája

Egy érdekessége az MVG-nek, hogy a 1, 3 és a 2, 4 centrális szubcsatorna pároknak (1.9. ábra) az áramlási tere azonos, ezért két különböző keverőfűl állású centrális szubcsatornából létrehozható a pálcaköteg négy centrális szubcsatornájának az áramlási tere (lásd 4.10. ábrán), ez kibővíthető nagyobb pálcakötegre is, aminek igazolását a jövőben fogom elvégezni. Az NVG esetében mindegyik centrális szubcsatornában az áramlás 0.5D-ben kvalitatíve megegyezik, mivel ezek szimmetrikusak.

A Line1-re merőleges sík sebességeloszlásai a 4.11. ábrán láthatók. A bütykök hatása az NVG csatorna teljes hosszában jelen van, míg az MVG modell esetében ez megszűnik 5D távolság után a turbulencia miatt. Továbbá a keverőfűlek az eltolási szimmetriát csökkentik az NVG csóváinak az eltolásával, a csatorna közepének irányába.

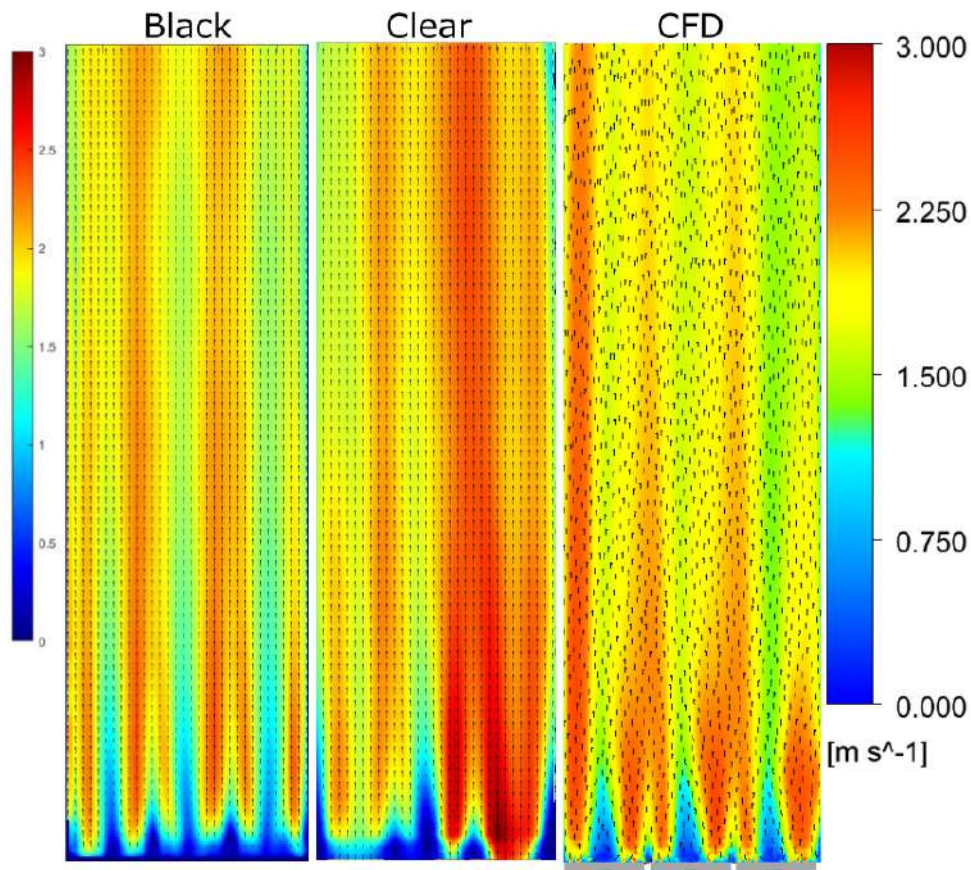


4.11. ábra. MVG és NVG Line1-re merőleges sík sebességeloszlása

A Line2, Line5 és Line6-ra merőleges síkok sebességeloszlásai a mellékletekben megtekinthetők.

5. CFD és PIV eredmények összevetése

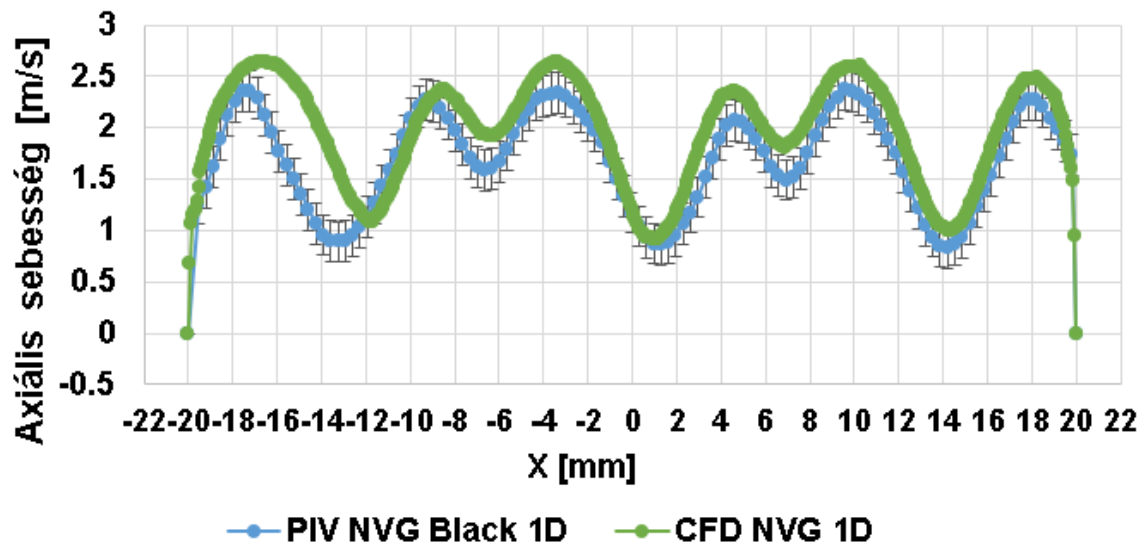
A CFD és PIV összevetését a Spacer3 utáni csatornában végeztem el, mivel a PIV kísérletben ez volt a vizsgált térrész (lásd 2.2. ábrán). A PIV kísérlet sebességeloszlásai a 3.6. ábrának megfelelő Line1-re merőleges síkban lettek átlagolva.



5.1. ábra. MVG és NVG Line1-re merőleges sík sebességeloszlása

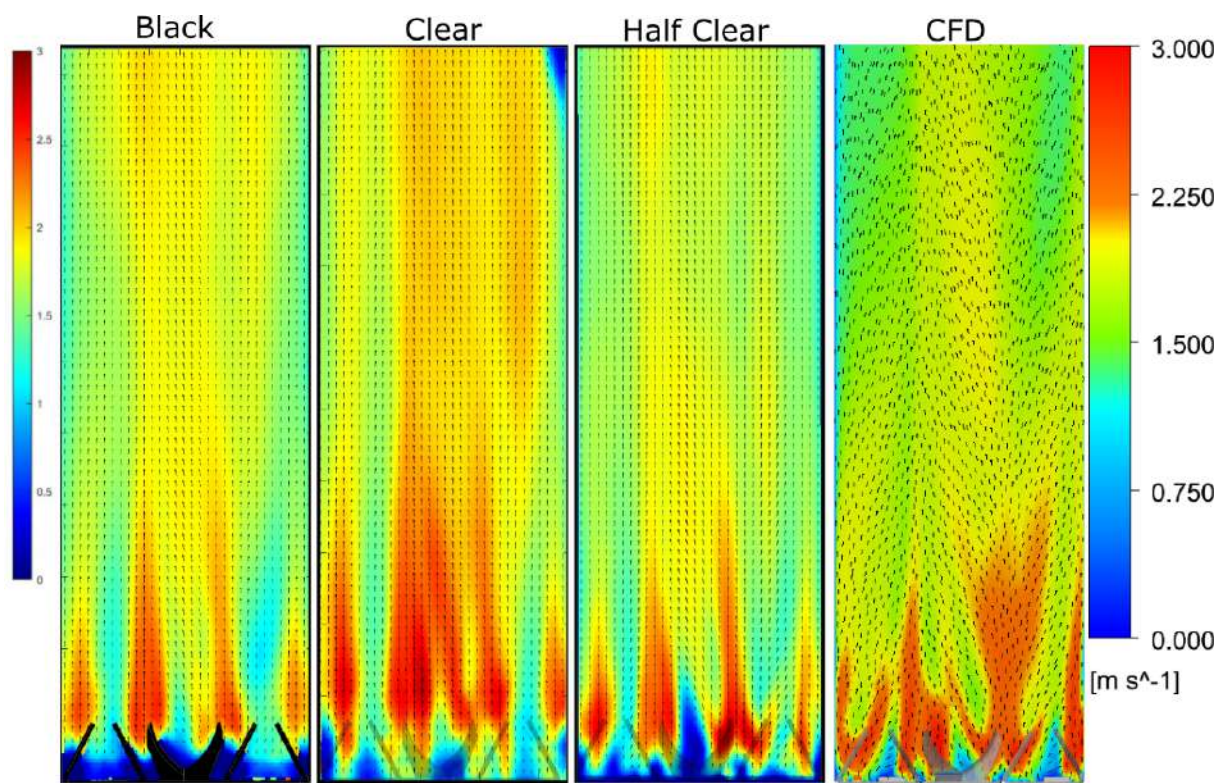
A Bevezetés fejezetben említett teljesen átlátszó (Clear) NVG-vel elvégzett kísérlet eredményén jól látható a sebességeloszlás eltérése a CFD eredményéhez viszonyítva (5.1. ábra). A távtartórács torzulása miatt a négy kilépő gyors csóva iránya megváltozott, emiatt a bütykök hatásai az egyesült csóvák közelében megfigyelhetetlenek. A fekete (Black) távtartórács sebességeloszlása sokkal közelebb áll a CFD eredményeihez, ennek köszönhetően egyértelmű lett a Clear távtartórács torzulása. A CFD számításaim szerint az eltolási csúcshoz tartozó csóva sebessége nem disszipálódik a csatorna mentén, ahogyan a PIV kísérletben ezt tapasztalták, illetve a távtartórács eltolási szimmetriájának a hatása kevésbé változtatta a sebességeloszlást a CFD eredményével ellentétben. A jövőben ennek feloldására a turbulencia modell finom beállítását fogom megvizsgálni és annak hatását az eredményekre. 1D távolságban az axiális

sebességek szoros egyezést mutattak a Line1-re merőleges síkban 5.2, a Black távtartórács esetében. Az axiális sebességek további D távolságokban megtekinthetők a mellékletben. Mindent figyelembe véve elmondható, hogy a távtartórács áramlásra gyakorolt jellegét a számításaim helyesen adják vissza, valamint a kísérletek geometriai bizonytalanságából adódó hibák se figyelmen kívül hagyandók.



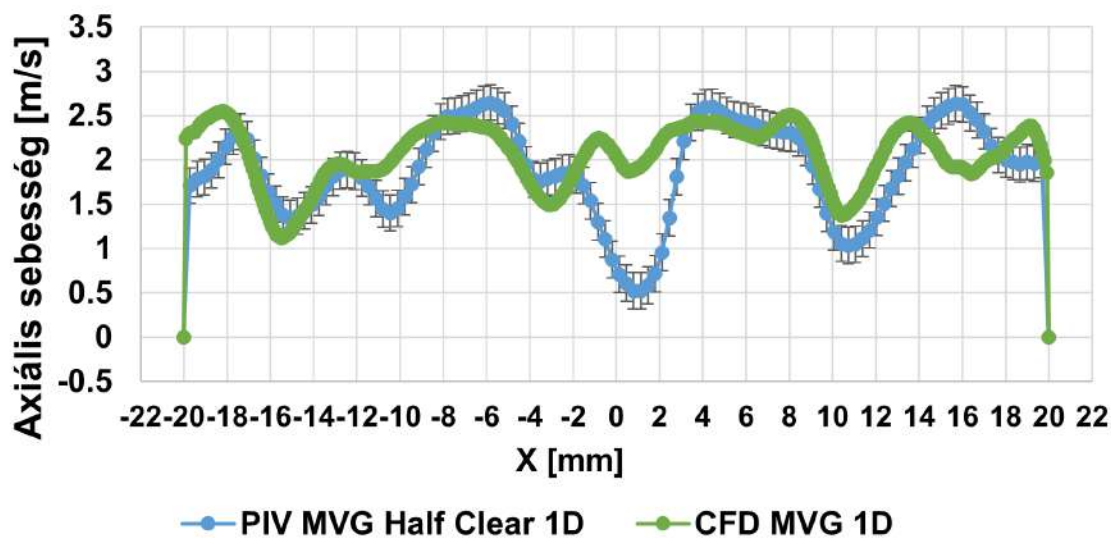
5.2. ábra. NVG CFD és PIV Line1-re merőleges sík axiális sebessége 1D-ben

Az 5.3. ábrán látható sebességeloszlásokban mind a CFD, mind a Black, mind a Half Clear eredményeiben megfigyelhető négy nagy intenzitású csóva. Ezek a csóvák minden esetben egy azonos áramlási jelenség következményeként jelennek meg, amely az adott konfigurációban kialakuló áramlási instabilitásokhoz és örvényekhez kapcsolódik. A csóvák olyan visszatérő áramlási mintázatokat mutatnak, amelyeket a geometria, a határoló felületek és az áramlási sebesség együttes hatása hoz létre. Ezek a csóvák a különböző anyagok vagy szimulációs feltételek ellenére ugyanannak a fizikai jelenségnek (pl. áramlási réteg instabilitása és lokális örvényképződés) köszönhetően alakulnak ki, ami az áramlási rendszer geometriájára vezethető vissza.



5.3. ábra. MVG CFD és PIV Line1-re merőleges sík sebességeloszlása

Az NVG-hez hasonlóan, a teljesen átlátszó anyagból készült MVG kísérlet és a CFD számításom eredménye nagyon eltér egymástól. A Clear távtartórács utáni csatorna sebességeloszlásának a középvezetékén egy erőteljes áramlás bukkan fel, amelyet a CFD nem tudott reprodukálni, viszont a Black és a Half Clear eredményei szorosabb egyezést mutattak a számított eredményekkel. Ez ténylegesen igazolta, hogy a Clear távtartórács eltorzult.



5.4. ábra. MVG CFD és PIV Line1-re merőleges sík axiális sebessége 1D-ben

1D távolságban az axiális sebességek a Line1-re merőleges síkban az 5.4. ábrán láthatók, a PIV Half Clear távtartórács esetében. Az axiális sebességek további D távolságokban megtekinthetők a mellékletben.

A CFD számítás során a sebességkomponensek RMS (Root Mean Square) és a távtartórács közvetlen közelében lokálisan monitorozott sebesség értékek tranziens jelleget mutattak, ezért a jövőben egy tranziens számítást fogok elvégezni az MVG modellre, hogy a kísérlet és a CFD számítás közötti különbségek okát megtaláljam. Az itt látható eltérés egyik oka tehát lehet a rácsból kilépő nagy sebességű csóvák meanderezése, tehát tranziens jellege. A stacioner számítási eredmények közvetlenül megadhatók a tranziens számítás kezdeti peremfeltételeként.

6. Következtetések és továbbfejlesztési lehetőségek

A PIV kísérletben használt tesztcsatorna számára saját geometriát modelleztem az ANSYS 19.2 programcsomag segítségével, melyen CFD számításokat végeztem el azonos peremfeltételekkel. A diszkretizált NVG és MVG Full Bundle modelljei közel 14.5 millió elemet tartalmaztak, ezek megfelelő hálósűrűségéhez egy hálófüggetlenségi vizsgálat során jutottam el. Az SST turbulencia modellről bebizonyosodott, hogy nem bontja fel elegendően az áramlás terét, ezért a BSL turbulencia modell egy sokkal jobb választást jelentett számomra. Az eredményekből arra következtettem, hogy a szimuláció és a kísérlet párhuzamos vizsgálata egy teljesebb képet alkotott a rendszerről, és ezek kiegészítik egymást. A szimulációm sugallatára rájöttek, hogy a kísérletben használt átlátszó anyagú távtartórácsok eltorzultak, ezért helytelen eredményekhez jutottak, ugyanakkor a kísérlet fényt vetett a CFD és a PIV eltéréseire, melyeket a turbulencia modell finomhangolásával, illetve tranziens jelleg vizsgálatával javíthatok. A számolt és a mért sebességeloszlások szoros egyezést mutattak a kis eltérések ellenére, ezért a jövőben a CFD modellem egy jó módja annak, hogy előzetes információhoz juthassanak egy más távtartórács geometria kísérletét megelőzően.

Továbbá, a keverőfülek feloldották a CFD számításban észlelt eltolási hatást, és intenzív turbulens áramlást hoztak létre a csatornában, mint ahogyan más kutatások is igazolták [18]. Mivel ismert, hogy hasonló rendszerekben a turbulencia növelésével fokozottabb hűtés biztosítható [5], ezért bebizonyosodott, hogy az MVG az ideálisabb távtartórács egy négyszögrács elrendezésű SMR kazettának. A jövőben a turbulens áramlás termohidraulikai vizsgálatához hőforrás peremfeltételt adok meg a pálcák felületeinek, ezzel a hőátadást is meg tudom vizsgálni. Emellett tranziens szimulációval fogom megpróbálni feloldani a tapasztalt kisebb ellentmondásokat.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, dr. Orosz Gergely Imrének, az eddig másfél évig tartó közös munkáért, a tanácsadásért és a szakmai tudásért, amit a CFD szakma területén munka közben szerezhettem.

Köszönetet mondok a BME Nukleáris Technikai Intézet dolgozóinak, hogy használhattam az R épület TRATEL laborjában található terem számítógépeit, a CFD számítások elvégzésére és az eredmények adatainak a tárolására.

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



Hivatkozások

- [1] World Nuclear Association. *Small Nuclear Power Reactors*. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors>. 2024.
- [2] IAEA. *ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS*. https://aris.iaea.org/publications/smr_book_2020.pdf. 2020.
- [3] World Nuclear Association. *Nuclear Power in the World Today*. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>. 2024.
- [4] NuScale. *Growing the SMR Market*. <https://www.nuscalepower.com/en/projects>. 2024.
- [5] Ulrich Bieder és Delphine Costa. „Analysis of the IAEA benchmark on heat transfer in a 4×4 rod bundle with mixing grid”. *Annals of Nuclear Energy* 115 (2018), 352–366. oldal. ISSN: 0306-4549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.01.034>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454918300355>.
- [6] ANSYS Inc. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. 2009.
- [7] Milovan Peric Joel H. Ferziger. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd, rev. ed. Springer, 2002.
- [8] Frank E. Harris. *Mathematics for Physical Science and Engineering*. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128010006/mathematics-for-physical-science-and-engineering>. 2014.
- [9] F. Incropera és mások. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th. John Wiley és Sons Inc., 2007.
- [10] Onscale Chloe Allison. *Meshing in FEA: Introduction to meshing*. <https://onscale.com/meshing-in-fea-introduction-to-meshing/>. 2020.
- [11] Santiago Arias és Adeline Montlaur. „Numerical Study and Experimental Comparison of Two-Phase Flow Generation in a T-Junction”. *AIAA Journal* 55(5):1-10 (2017).
- [12] Thomas C. Harmon és Jason C. Fisher. *A Coupled Systems Approach to Solute Transport Within a Heterogeneous Vadose Zone-Groundwater Environment*. <https://www.researchgate.net/publication/241388358...> 2004.
- [13] Han Wang, Daogang Lu és Yuzhong Liu. „PIV measurement and CFD analysis of the turbulent flow in a 3x3 rod bundle”. *Annals of Nuclear Energy* 140 (2020), 107135. oldal.

- [14] Paula García Torres. *PIV Measurements of a Pressurized Water Reactor 3x3 Rod Bundle*. 2024.
- [15] Gergely Imre Orosz és mások. „ALLEGRO Gas cooled Fast Reactor Rod Bundle investigations with CFD and PIV method”. *Nuclear Engineering and Design* 400 (2022), 112062. oldal. ISSN: 0029-5493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112062>.
- [16] Seika Digital Image. *Principle of PIV*. https://www.seika-di.com/media/en/en_piv_principle. 2017.
- [17] DANTEC DYNAMICS. *PIV Solutions*. <https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/>.
- [18] Wenhai Qu és Yi Li. „Numerical study of mixing vane spacer grid effect on subchannel mixing in a 5×5 rod bundle”. *Annals of Nuclear Energy* 201 (2024), 110426. oldal. ISSN: 0306-4549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110426>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454924000884>.