

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET

MERVAY BENCE

TDK DOLGOZAT

CFD számítások a GIF 7 pálcás SCWR benchmarkhoz

Témavezető:

Kiss Attila

tudományos segédmunkatárs

Budapest, 2014

Szerzői jog © Mervay Bence, 2014.

Szerzői jog © Kiss Attila, 2014.

NYILATKOZATOK

Beadhatósági és elfogadási nyilatkozat

A jelen Tudományos Diákköri dolgozat a témavezető által elvárt szakmai színvonalnak tartalmilag megfelel, beadható.

Továbbá a TDK dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéke által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek maradéktalanul eleget tesz. E tervezési feladatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

Budapest, 2014. október 27.

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Mervay Bence* (Z7MB6G), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a TDK dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2014. október 27.

hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó.....	2
1. Bevezetés	3
2. A GIF 7 pálcás benchmark feladatának bemutatása	5
3. A BME NTI által alkalmazott megközelítés.....	12
4. Az általam kidolgozott részfeladat: a geometria érzékenység vizsgálat.....	14
4.1. A geometria készítésről általában	14
4.2. A legegyszerűbb távtartó geometria (P2-0) bemutatása	16
4.3. A közepes részletességű távtartó geometria (P2-1) bemutatása	25
4.4. A legrészletesebb távtartó geometria (P2-2) ismertetése	32
4.5. A bevezető szakasz (P1) geometriájának bemutatása.....	36
4.6. A kivezető szakasz (P3) geometriájának bemutatása.....	40
4.7. A megépített CFD modellek bemutatása	41
5. A kapott eredmények bemutatása	52
5.1. Az eredmények kiértékelése	52
5.2. A sebességprofilok vizsgálata	53
5.3. Turbulens kinetikus energia profilok vizsgálata	56
5.4. Nyomáseloszlás vizsgálata.....	58
5.5. Fali nyírófeszültség vizsgálata	60
5.6. Távtartó geometria választása az eredmények alapján	63
6. Közreműködésem a végső számítási eredmények kiértékeléséhez	64
6.1. Az A1-es eset	64
6.2. A B1-es eset	65
6.3. A B2-es eset	70
6.4. Értékelés.....	74
7. Összefoglalás	75
8. Felhasznált források.....	77
9. Mellékletek	78
9.1. Termoelemek elnevezése és pozíciói	78

Előszó

Ma a jövő atomenergetikája a negyedik generációs reaktorok mentén képzelhető el. A negyedik generációs reaktorok hat fajtájának fejlesztése világszerte folyamatban van. Ezek a reaktorok nem az első három reaktorgeneráció szerves továbbfejlődésének eredményei, hanem forradalmian új megoldásokat tartalmaznak. Ezek az új megoldások számos műszaki kihívást vetnek fel. Ilyen kihívás például e mű témájával, a szuperkritikus nyomású vízzel hűtött reaktorokkal (Supercritical Water Reactor, röviden SCWR) kapcsolatban a hűtőközeg bonyolult és teljes mértékben még meg nem értett termohidraulikája (különböző hőátadási metódusok közötti különbségek okai, a hiperkompresszibilitás hatása, stb.) vagy a nagy hőállóságú szerkezeti anyagok igénye. Az SCWR hűtőközegének, a szuperkritikus nyomású víznek (Supercritical Water, röviden SCW) még teljes mértékben meg nem értett termohidraulikája szükségessé teszi a rendelkezésünkre álló numerikus kódok használhatóságának ellenőrzését erre a hűtőközegre, amit a kódok által számolt és mérési eredmények összevetésével, validációval szokás elvégezni. Ez a Tudományos Diákköri Dolgozat egy nemzetközi validáció, úgynevezett benchmark feladatot és a hazai részvétel egy részének folyamatát, eredményét mutatja be.

* * *

Szeretném kifejezni köszönetemet Kiss Attila tanár úrnak odaadó konzulensi munkájáért.

Budapest, 2014. október 27.

Mervay Bence

1. BEVEZETÉS

A Generation IV. International Forum (GIF) által szervezett benchmark feladat 2013. február végén jelent meg. A benchmark koordinálását Martin Rhode professzor (Delfti Műszaki Egyetem) végezte. A BME Nukleáris Technikai Intézete jelentkezett a benchmark feladatra. A számítási eredmények beküldési határideje 2014. május végén járt le, ami előtt az NTI benyújtotta eredményeit.

A hőátadási folyamatok az SCWR-ben komplex képet mutatnak, különösen az úgynevezett pszeudókritikus pont környékén. Jelentős hőátadási tényező elfajulás jelentkezhet, amely elfogadhatatlanul magas fali hőmérséklet csúcsokat okozhat. Jelenleg, nem létezik általános modell, amely képes lenne pontosan és értelmesen leírni ezt a viselkedést. Ezért szükség van egy hosszú távú alulról fölfelé építkező tevékenységre, amelynek első lépésében meg kell ismerni a mögöttes fizikai hátteret, majd erre az ismeretre építve új modelleket kell fejleszteni. Ezzel párhuzamosan, a gyakorlati, rövid távú feladat abban áll, hogy fel kell mérni a jelenlegi modellek határait, képességeit. A GIF hét pálcás benchmark feladat ez utóbbi feladatot tűzte ki célul.

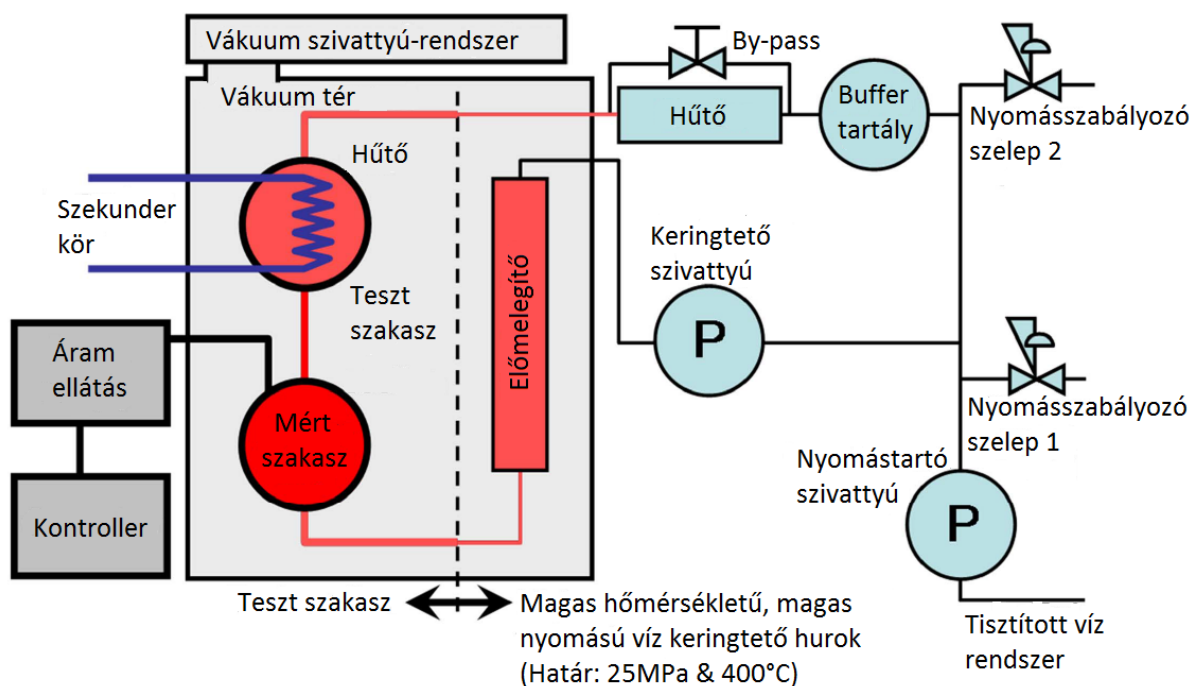
A benchmark során tíz egymástól független szervezet által elvégzett numerikus számítás került összehasonlításra egy hét pálcás üzemanyag kötegben elvégzett mérés három esetével. A kísérletet a JAEA (Japán) végezte. A kísérleti adatok, amelyeket axiálisan és kerület mentén különböző pozíciókban mértek a hét fűtőelem pálcán előre nem ismerték a benchmark résztvevői, tehát egy úgynevezett vak benchmarkról van szó. A három mérési esetből egy izotermikus, míg kettő fűtött eset volt. Az első fűtött esetnél alacsony hőfluxussal fűtötték a pálcákat relatíve alacsony belépési hőmérséklet mellett. A második fűtött esetnél magas hőfluxussal fűtötték a pálcákat és relatíve magas volt a belépő hőmérséklet. A második fűtött esetben a vártnál magasabb fali hőmérsékletek adódtak, amelyek a szuperkritikus hőátadás sajátosságainak tudható be.

Többféle modellt használtak a benchmarkot megoldó intézetek egészen az egydimenziós rendszerkódos megközelítéstől, amelyek hőátadási korrelációt alkalmaznak a RANS típusú CFD modellekig, ahol SST turbulencia modellt használtak 62 milliós numerikus rácson. A numerikus és mérési eredmények összehasonlítására egy workshop keretében került sor 2014. június végén Delftben, Hollandiában. Összefoglalásképpen elmondható, hogy egyik numerikus modell sem volt képes megfelelően becsülni a harmadik eset (má-

sodik fűtött eset) fal hőmérséklet értékeit. Továbbá, meglepő módon az egyszerű hőátadási korrelációkat használó modellek közel azonosan pontos eredményeket adtak mindhárom mérési esetre, mint a legnagyobb komplexitású, háromdimenziós CFD modellek. Ezért azt lehet következtetésként levonni, hogy SCW termohidraulikai modellezésénél a jelenlegi modellek felhasználása mellett nagy körültekintéssel kell kezelni a kapott eredményeket.

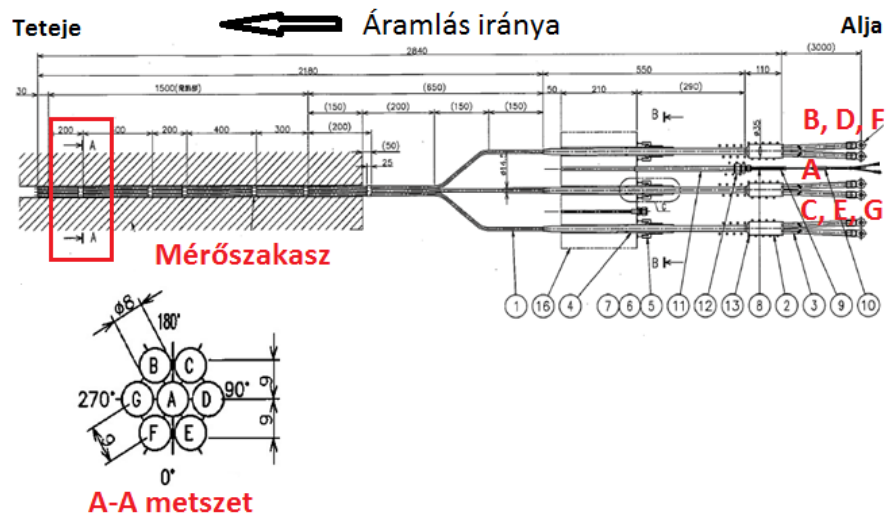
2. A GIF 7 PÁLCÁS BENCHMARK FELADATÁNAK BEMUTATÁSA

A vizsgált rendszer két fő részre bontható. Az itt külön nem részletezett kisegítő berendezések (lásd 2-1. ábra jobb oldalán) mellett a teszt szakaszból épül fel. A teszt szakasz egy vákuum térben foglal helyet és egy nyitott csőhuroknak tekinthető, amely a kisegítő résszel együtt már egy zárt hurkot alkot. A teszt szakasz csőrendszerében található egy előmelegítő, majd ezt követi a vizsgálati tárgyát képező, hét elektromosan fűtött pálcát tartalmazó mért szakasz (lásd a 2-1. ábra). A mért szakasz után egy hőcserélő található, amely egy szekunder körben keringő hidegebb vízzel hűti a kísérleti berendezés primer körében keringő szuperkritikus nyomású víz közegünket.



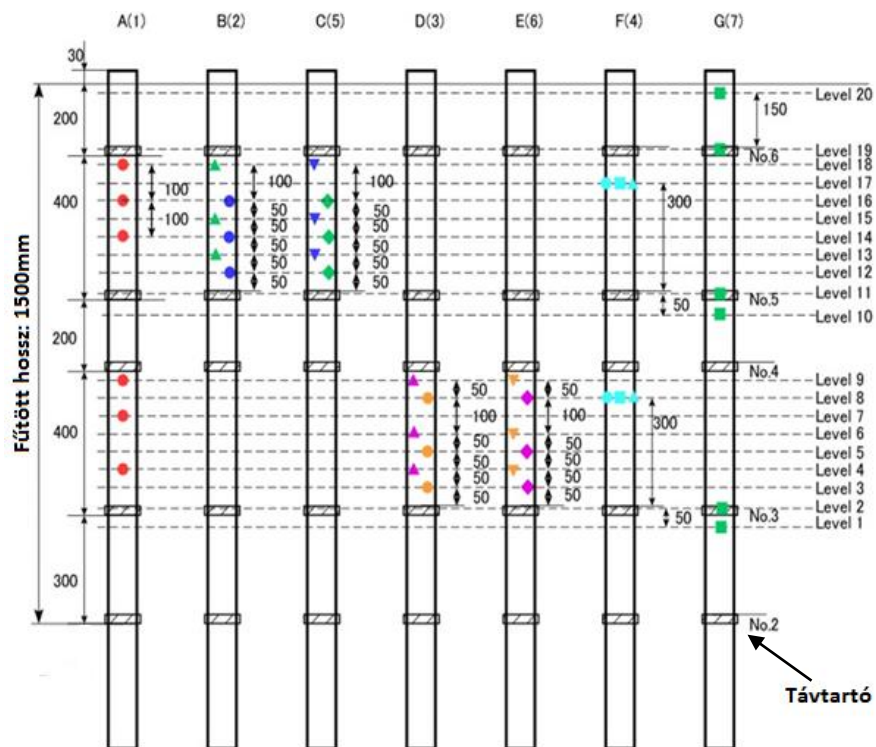
2-1. ábra: A kísérleti létesítmény konfigurációja [1]

A hét elektromosan fűtött pálcát a mérőszakaszban helyezkedik el az A-A metszeten látott elrendezésben (lásd 2-2. ábra). A fűtést a pálcák alulról kapják, az „A” pálcák fűtése különálló, míg a „B”, „D” és „F” pálcák fűtése közös (vagyis a fűtési teljesítményük azonos, lásd 2-1. táblázat és 2-2. táblázat), valamint a „C”, „E” és „G” pálcák is közös fűtést kapnak. A közeg alulról felfelé áramlik át a mérőszakaszon (lásd a 2-2. ábra tetején jelölt irányt).



2-2. ábra: A hét fűtőpálca sematikus ábrája [1]

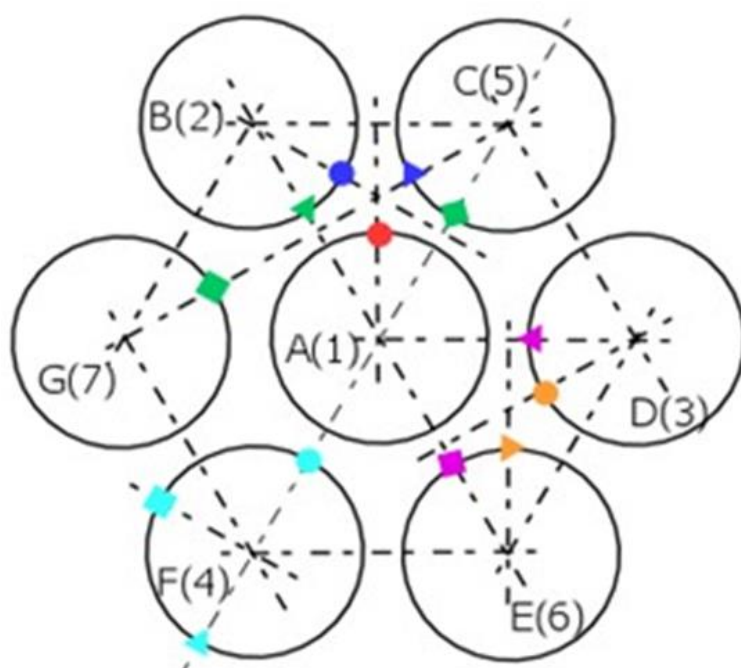
Mind a hét fűtőpálcán 6-6 termoelem kapott helyet (lásd 2-3. ábra). A teljes fűtött hossz 1500 mm, melynek az alsó 300 mm-én nincs elhelyezve termoelem. A termoelemek közti axiális távolságok ismertek, valamint az egyes termoelemek radiális és kerületmenti pozíciói (lásd 2-4. ábra) is fontosak (ezt jelzik a különböző színű és alakú jelölők). A termoelemeket a 2-5. ábra feltüntetett módon helyezték el a pálca burkolatban.



2-3. ábra: A fűtőpálcák külső felületére helyezett termoelemek axiális pozíciói [1]

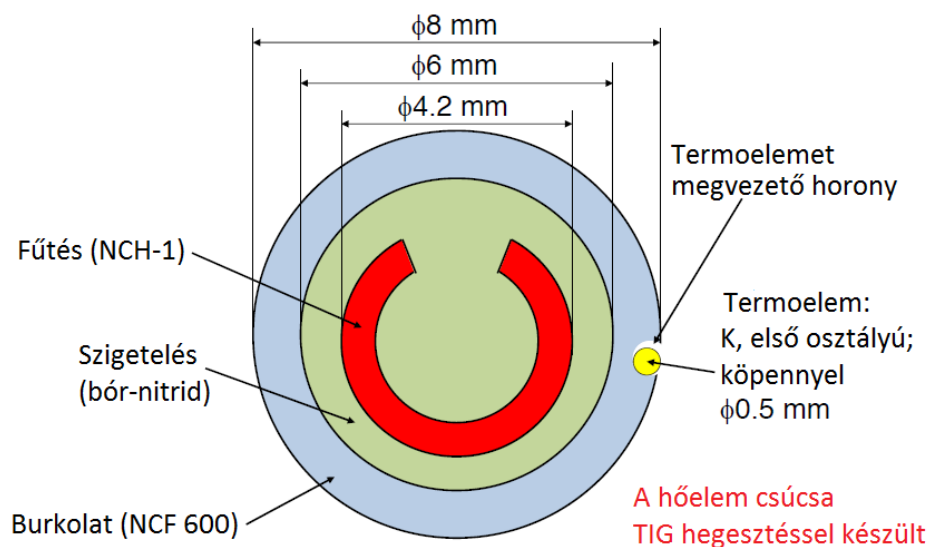
A 2-4. ábra a termoelemek radiális és kerületmenti elhelyezése látható, a jelölések megegyeznek a 2-3. ábra látott jelölésekkel. Megfigyelhető, hogy az áramlási csatorna belső szubcsatornáiban található a termoelemek jelentős része, csak az F jelű pálcá rendelkezik olyan termoelemmel, ami kifelé néz.

Így megállapítható, hogy az egyes termoelemeket három tulajdonság alapján lehet beazonosítani: melyik pálcán találhatóak, milyen axiális magasságban helyezkednek el, valamint milyen a kerületmenti pozíciójuk (fokban mérendő). Ez azért fontos, mert a számításokban az ezen pozíciókban számított értékekre vagyunk kíváncsiak, tehát azonosítani kell tudnunk a termoelemeket.



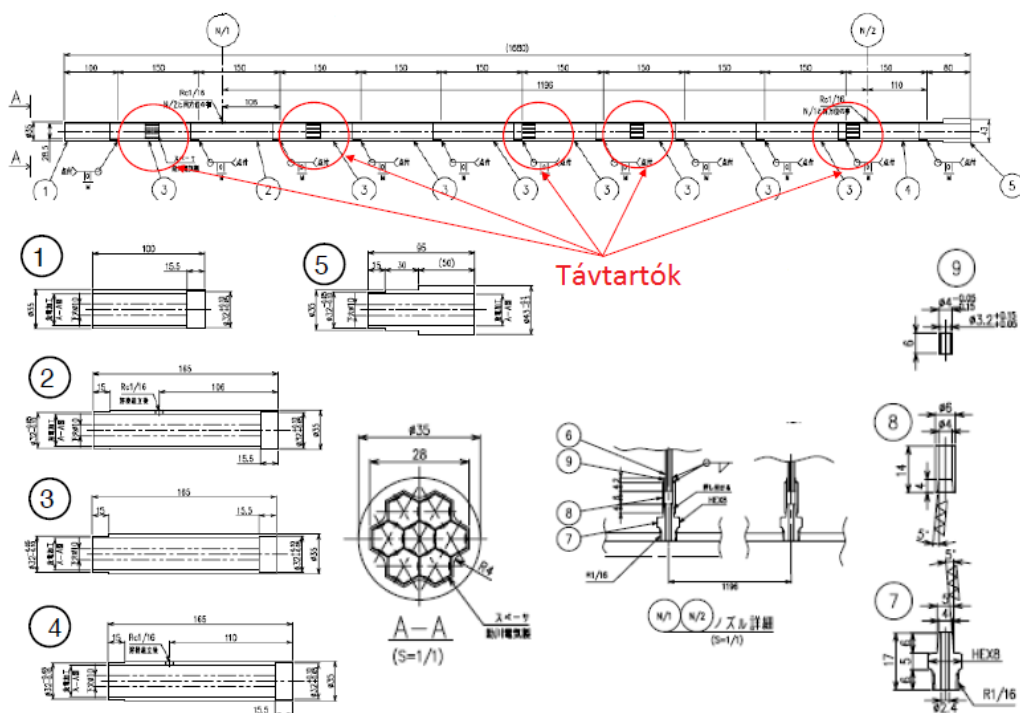
2-4. ábra: A fűtőpálcák külső felületére helyezett termoelemek kerületmenti pozíciói [1]

Egy fűtőpálca belső felépítését a 2-5. ábra szemlélteti. A belső szerkezet három elem-ből tevődik össze, magából a fűtőszálból (NCH-1), bór-nitrid szigetelésből és a burkolatból (NCF 600 / Inconel 600 acélötvözet) áll. A termoelemek számára a burkolatban hornyokat alakítottak ki, így a termoelem nem befolyásolja az áramlást; nem töri meg a fűtőpálca alakját. A termoelem csúcsa TIG hegesztéssel (volfrámelektrodás védőgáz as ív-hegesztés) készült.



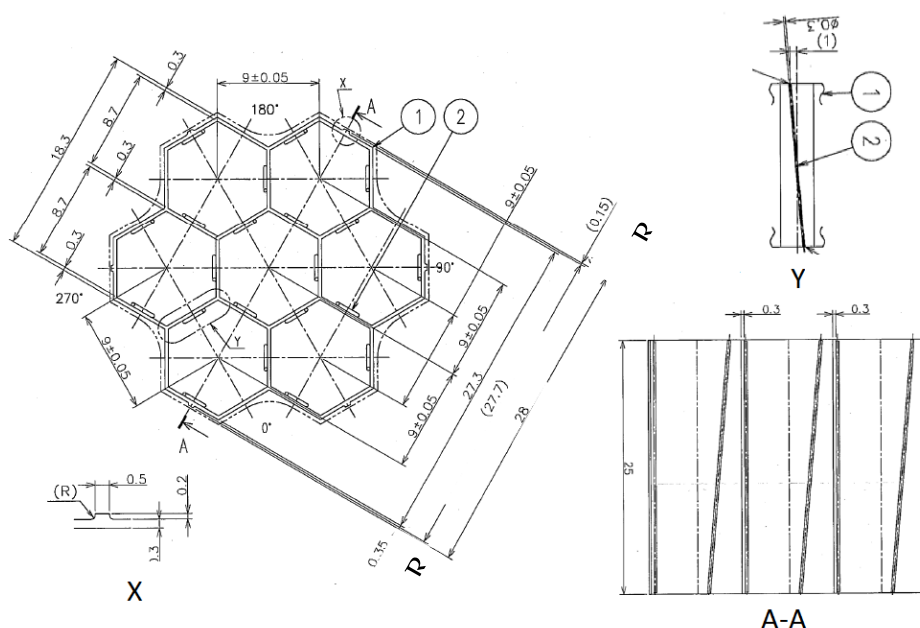
2-5. ábra: Egy fűtőpálca belső szerkezete [1]

A mért szakasz burkolata (angol neve alapján „shroud”) határolja kívülről az áramlási csatornát, melyben a hét fűtőpálca található. A fűtőpálcák egymáshoz képesti megfelelő horizontális távolságát öt távtartórács biztosítja, melyek axiális elhelyezkedését a 2-6. ábra mutatja.



2-6. ábra: A mért szakasz burkolatának (shroud) sematikus rajza [1]

A 2-7. ábra X jelű kirészletezésen látható elem a tartórács külső felületén helyezkedik el, a mért szakasz burkolatának irányába. Feladata a tartórács (és így gyakorlatilag a pálcák) pozicionálása és horizontális elmozdulásának megakadályozása a mért szakasz burkolatán belül. A burkolat és a külső pozicionáló elem között 0,15 mm-es rés található. Egy elem 0,5 mm széles, 0,2 mm magas, a távtartórács és az elem találkozásánál pedig lekerekítés van. Egy távtartórácson hat darab ilyen elem található, a külső hatszög-elemeken helyezkednek el (a középső hatszög elemen, mely az „A” pálcát tartja, értelem-szerűen ilyen elem nincs).

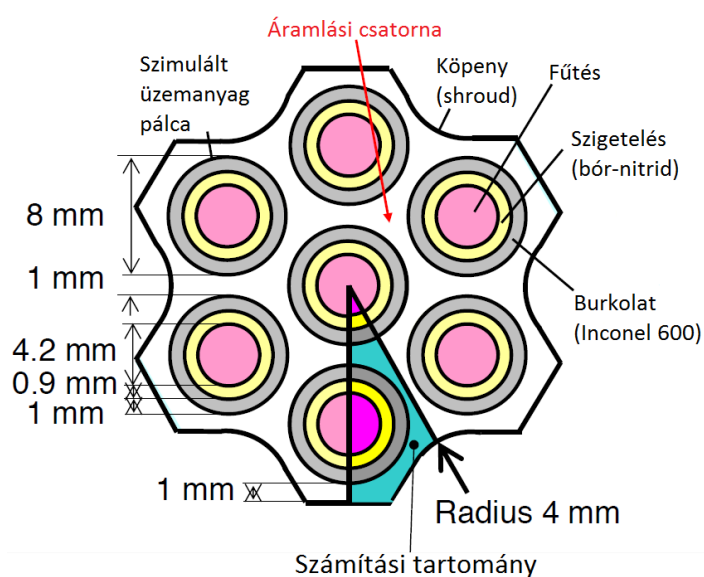


A benchmark kiírásban van egy ajánlás a számítási geometriát illetően. Axiális irányban a teljes fűtött hossz (1500 mm) modellezését, horizontális irányban pedig a keresztmetszet 1/12-ed részét ajánlják. A tesztszakasz horizontális metszetét a 2-8. *ábra* mutatja,

külön jelölve rajta az ajánlott számítási tartományt. A geometria 1/12-ed része azért javasolt, mert ez a legkisebb elem, mely – két oldalán szimmetria peremfeltételt alkalmazva – leköveti a geometriát. (Megjegyzendő, hogy ez az ajánlott számítási tartomány a távtartórácson lévő apró részletek (lásd a 2-7. ábra X és Y kinagyított részletét) elhanyagolása mellett tekinthető geometriailag szimmetrikus tartománynak. Ha az apró részleteket is figyelembe vesszük, akkor a terület egyharmadát kell modellezni - ahogy a végső számítási modellnél alkalmaztuk – ahhoz, hogy geometriailag szimmetria peremfeltételt alkalmazhassunk az elmetszett felületeken. A fűtés egyenetlensége miatt maga a hőátadás ekkor sem tekinthető szimmetrikusnak, ami miatt a végső modellnél eltérések várhatóak a mérési és számítási eredmények között.)

Ennek előnye, hogy elég a geometriának csak egy kisebb részét lemodellezni (jelen esetben az 1/12-ed részét), ami egyszerűbbé teszi a háló elkészítését, és a számítás erőforrásigénye is kisebb lesz. Hátránya természetesen, hogy szimmetriára épít nem csak a geometriában, de az áramlásban is, ami nem feltétlenül felel meg a valóságnak (főleg, hogy a pálcák fűtési teljesítménye nem azonos), vagyis torzíthatja az áramképet.

Természetesen ez csak egy ajánlás, melytől el lehet térni. A BME NTI-ben (mivel megvolt a szükséges számítási kapacitás) a horizontális keresztmetszet 1/3-ával számítottuk a végső modellt, az én részfeladatomhoz készített modellek pedig a horizontális keresztmetszet 1/6-át tartalmzták.



2-8. ábra: Példa a számítási geometriára [1]

A feladatkiírás fontos része még a számítási peremfeltételek megadása. A mérőberendezésen három különböző esetet vizsgáltak meg. Az A1-es esetben (lásd 2-1. táblázat) a fűtőpálcák ki voltak kapcsolva, a berendezés üzemi nyomáson (25 MPa) és szobahőmérsékleten üzemelt. A B1-es és B2-es esetekben (lásd 2-2. táblázat) a fűtés be volt kapcsolva, a két eset közti eltérést a fűtőteljesítmény jelenti, mely a B2-es esetben nagyobb volt.

2-1. táblázat: Számítási peremfeltételek fűtetlen áramlás esetén [1]

Eset	Közeg	Belépési hőmérséklet, K	Belépő nyomás, MPa	Tömegáram, kg/min	Tömegfluxus, kg/(m ² ·s)
A1	Szuperkritikus víz	297,35	25,0	26,33	2283,44

2-2. táblázat: Számítási feltételek fűtött áramlás esetén [1]

Eset	Közeg	Belépési hőmérséklet, K	Belépő nyomás, MPa	Tömegáram, kg/min	Tömegfluxus, kg/(m ² ·s)	Fűtés A, kW	Fűtés B, D, F, kW	Fűtés C, E, G, kW
B1	Szuperkritikus víz	353,58	24,98	16,69	1447,56	19,67	22,51	22,52
B2	Szuperkritikus víz	519,58	25,03	16,52	1432,97	34,14	34,08	34,13

A tömegfluxus mindkét esetben a tömegáramból lett kiszámítva úgy, hogy elosztották az áramlási csatorna keresztmetszetével, ami $1,9218 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

3. A BME NTI ÁLTAL ALKALMAZOTT MEGKÖZELÍTÉS

A BME NTI az ANSYS CFX kód 14.5-ös verzióját használta fel a benchmark feladat megoldásánál. Az alkalmazott megközelítés a RANS módszer volt (lásd [2]). A benchmark feladat megoldásához három, különböző számítási tartomány került diszkrétizálásra különböző célból, amik a következők voltak:

1. **CFD modell a rácsérzékenységi vizsgálatokhoz (B2 esetre):** a számítási tartomány axiális irányban tartalmazta az egész fűtött szakaszt (belépő profil generátor szakasszal és egy kilépő szakasszal), kerületmenti irányban a javasolt 1/12-ed kerületet ölelte föl (lásd 2-8. *ábra*), a távtartó rácsot egyszerűsítettük a 2-7. *ábra* X és Y kinagyításán lévő részletek elhagyásával. Három-három különböző felbontású ráccsal került megvizsgálásra az axiális, radiális, kerületmenti és fal közeli felbontás hatása az eredményekre. Ennek a számítás-sorozatnak a tanulságai alapján (amik itt nem kerülnek kifejtésre) kiválasztásra került az eredményekre gyakorolt hatás és a numerikusszámítási költség szempontjai alapján az optimális rács, ami a további számítások során felhasználásra került. Ezeket a számításokat először SST turbulencia modellel végezték el állandósult állapotra, majd ennek eredményéből indították el a tranziens számítást, amit $k-\omega$ Reynolds feszültség turbulencia modellel végeztek el.
2. **CFD modell a geometriaérzékenységi vizsgálatokhoz (A1 esetre):** a számítási tartomány axiális irányban nem tartalmazta az egész fűtött szakaszt (csak egy belépő profil generátor szakaszt, egy távtartót és egy kilépő szakaszt), kerületmenti irányban 1/6-ed kerületet ölelte föl (lásd 2-8. *ábra*). Ezeknek a számításoknak a célja a távtartó rács részletek eredményekre gyakorolt hatásának a megvizsgálása volt. Három modellel került megvizsgálásra a távtartók eredményekre gyakorolt hatása. Az első modellnél a 2-7. *ábra* X és Y kinagyításán lévő részletek elhagyásra kerültek. A másodiknál az Y kinagyításon lévő részletek modellezve lettek, míg az Y kinagyításon lévő részleteket nem. A harmadik modellnél mind az X, mind az Y kinagyításon lévő részletek megvoltak. Ennek a számításorozatnak az eredménye alapján döntés született, hogy a távtartórácsok milyen részletességgel szerepeljenek a végleges modellben. Erről a számításorozatról további részlet nem kerül tárgyalásra itt, lévén ez a dolgozat további témája.

3. **CFD modell a végleges számításokhoz (A1, B1 és B2 esetre):** a számítási tartomány axiális irányban tartalmazta az egész fűtött szakaszt (az előző két modellhez hasonlóan belépő profil generátor szakasszal és egy kilépő szakasszal), kerületmenti irányban 1/3-ad kerületet ölelte föl (lásd 2-8. *ábra*), a távtartórács teljes részletességgel szerepel ebben a modellben. A nagy rácsméret miatt, ezeket a számításokat először k- ϵ , SST, majd SSG turbulencia modellel végezték el állandósult állapotra, majd ennek eredményéből indították el a transziens számítást, amit SAS SST turbulencia modellel végeztek el. E számításorozat eredményeinek kiértékelésében vettem részt, amit a dolgozat végén mutatok be.

4. AZ ÁLTALAM KIDOLGOZOTT RÉSZFELADAT: A GEOMETRIA ÉRZÉKENYSÉG VIZSGÁLAT

4.1. *A geometria készítésről általában*

A nagy, végső számítási modellt Kiss Attila tanár úr készítette el, én egy kisebb részfeladatot kaptam, mely a számítások pontosságát volt hivatott elősegíteni.

Mint a mérnöki gyakorlatban általában szokás, egy CFD-s szimuláció is a geometria vizsgálatával kezdődik. Megpróbáljuk meghatározni, hogy az elkészítendő modellben milyen egyszerűsítések alkalmazhatóak. Ezek helyes felmérése több szempontból is nagyon fontos.

Ha túl sok egyszerűsítést alkalmazunk, a modellünk pontatlan lesz, a számítási eredmények nem fognak megfelelni a valós értékeknek még csak megközelítőleg sem, így pedig az egész számításnak nincs sok értelme.

Éppen ezért törekednünk kell a geometria lehető legpontosabb modelljét elkészíteni, melynek viszont több dolog is gátat szabhat.

A legfontosabb, amit szem előtt kell tartani, hogy a számítások elvégezhetők maradjanak. Egy nagyon részletes modell valószínűleg jó eredményekhez vezet, azonban ha nincs meg a megfelelő számítási kapacitás, a részletes modell nem sokat ér, a számítás nem fog tudni lefutni.

A másik szempont az idő. Minél bonyolultabb a modell, annál több időt vesz igénybe mind az elkészítése, mind pedig a számítások lefutása. Ha az eredményekre gyorsan van szükségünk, nem foghatunk bele egy olyan modell elkészítésébe, mely csak hónapok múlva képes eredményeket szolgáltatni.

Végül meg kell becsülnünk, hogy melyek azon részei a modellnek, amelyek a számított eredményeket nem befolyásolnák jelentősen, de a számításokat sokkal bonyolultabbá és hosszabbá tennék. Ezeket a részeket egyszerűsíteni kell, természetesen olyan módon, hogy a fentebbi szempontokat továbbra is szem előtt tartsuk.

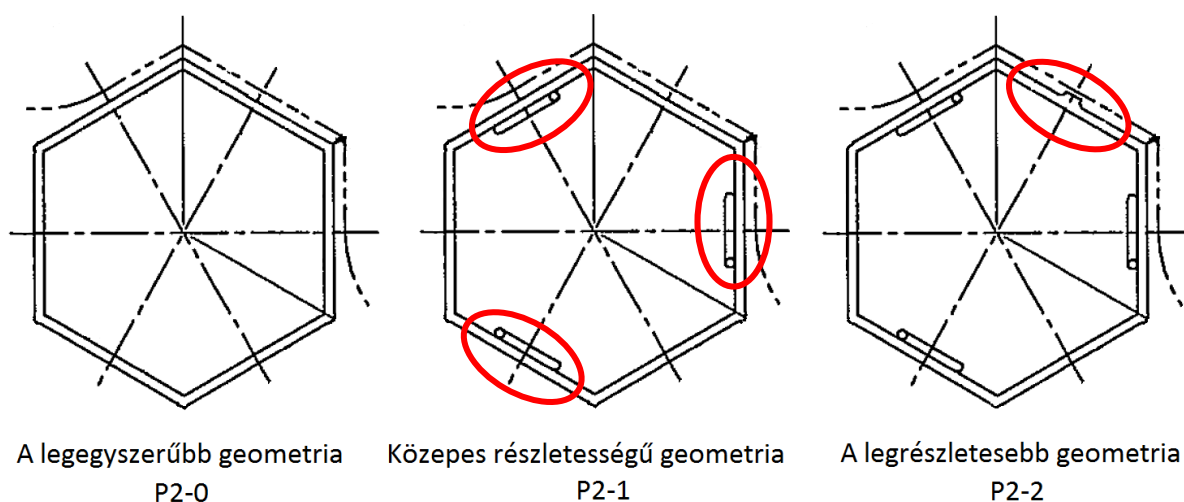
A feladatom a távtartó geometriai vizsgálata volt a fentebbi szempontok alapján. A teljes mérőszakaszban összesen öt távtartó található, melyek befolyásolják az áramlást. Azt vizsgáltam, hogy a különböző részletességű távtartó-geometriák áramlást befolyásoló

hatása mennyire különböző, és hogy ennek alapján melyik geometriát érdemes beépíteni a végső számítási modellbe.

Összesen három különböző részletességű modellt készítettem el, melyekre számításokat végeztünk. A legegyszerűbb modell csak a távtartó hatszögrácsát tartalmazta, a közepes bonyolultságúba belekerültek a fűtőpálcákat tartó hengerek, a legpontosabb geometria pedig tartalmazta a távtartó külső részén található elemeket is, melyek a távtartó elmozdulását akadályozzák meg a mért szakasz burkolatán belül (lásd 2-7. *ábra* és 4-1. *ábra*).

Az elnevezésekről: a geometriák könnyebb beazonosíthatósága miatt a következő jelöléseket használtam:

- Bevezető szakasz: P1
- Legegyszerűbb távtartó geometria: P2-0
- Közepes részletességű távtartó geometria: P2-1
- Legrészletesebb távtartó geometria: P2-2
- Kivezető szakasz: P3



4-1. *ábra*: A háromféle távtartó geometria

A távtartó modelljét a fent látható módon (4-1. *ábra*) készítettem el, vagyis a geometria horizontális keresztmetszetének 1/6-át modelleztem. A modellem továbbá nem tartalmazta a teljes fűtött hosszt, csupán egy bevezető szakaszból, egy távtartóból és egy kivezető szakaszból állt.

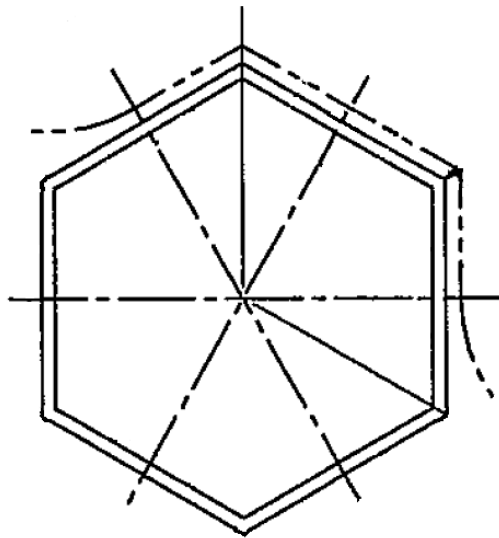
Mivel magában a távtartórácsban és a fűtőpálcában a hőterjedés megismerése nem volt szempont, így ezeket a térfogatókat nem diszkretizáltuk (nem hálóztuk be), egyedül az áramlási csatorna lett diszkretizálva.

Mivel a három különböző geometria egymásra épül (egymás továbbfejlesztett változatai), így bemutatásukat a legegyszerűbbel kezdem (P2-0), és a bonyolultabb geometriák esetén csak a főbb különbségeket emelem ki. Ezek után mutatom csak be a bevezető és kivezető szakaszt.

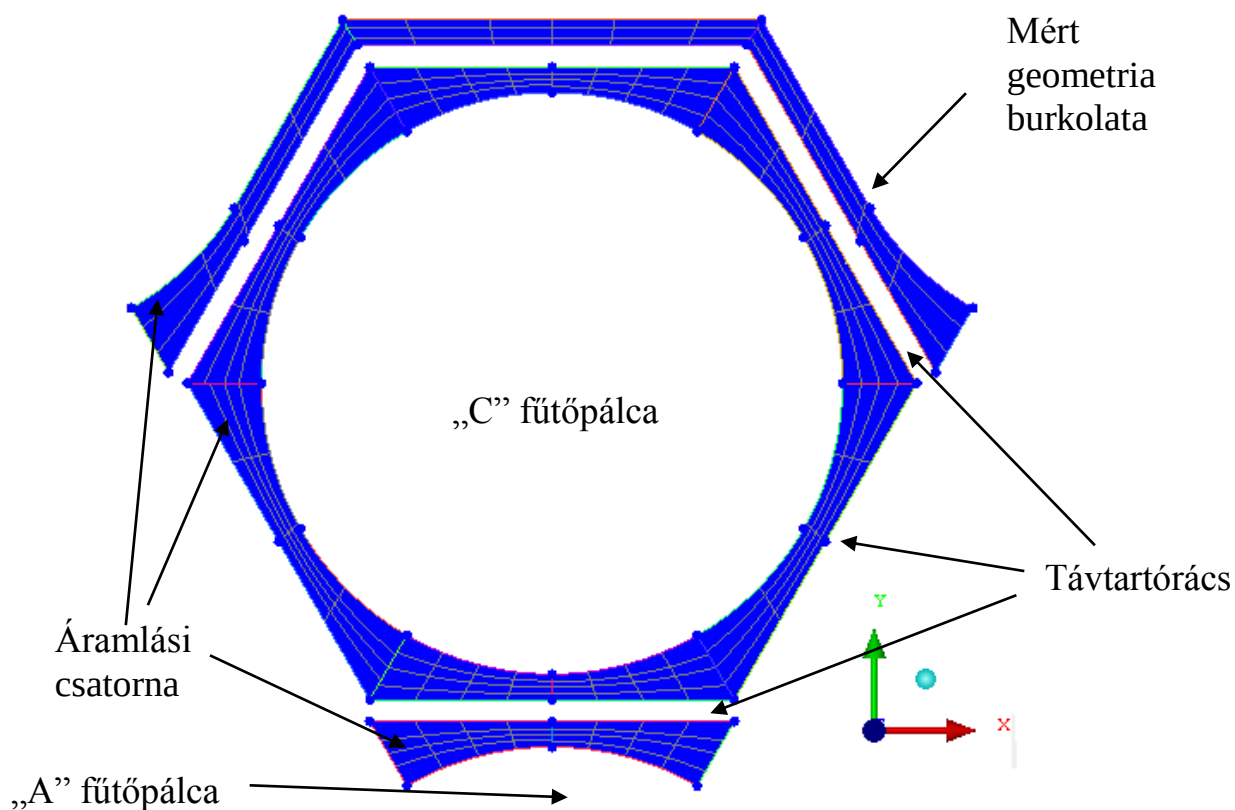
A geometria és a háló elkészítéséhez az ANSYS ICEM CFD 14.0 programot használtam.

4.2. A legegyszerűbb távtartó geometria (P2-0) bemutatása

A legegyszerűbb geometria csak a távtartó hatszögrácsát tartalmazza, a pálcákat rögzítő huzalokat és a távtartót pozicionáló elemeket nem (lásd 4-2. ábra).

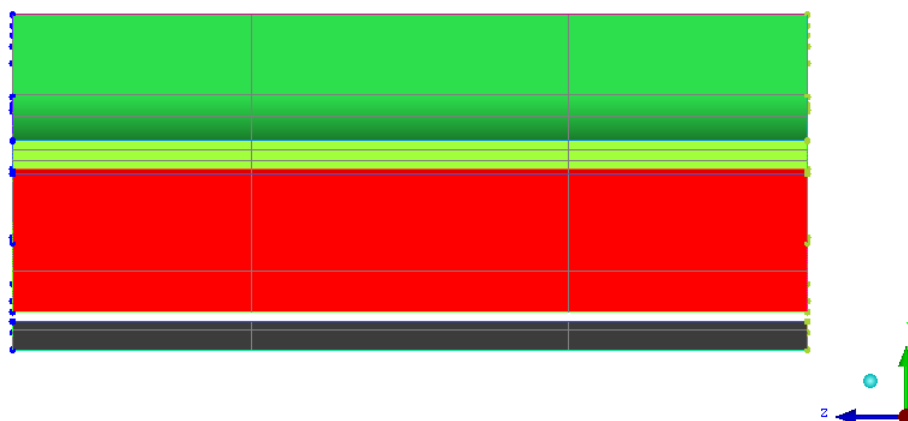


4-2. ábra: A legegyszerűbb távtartó geometria



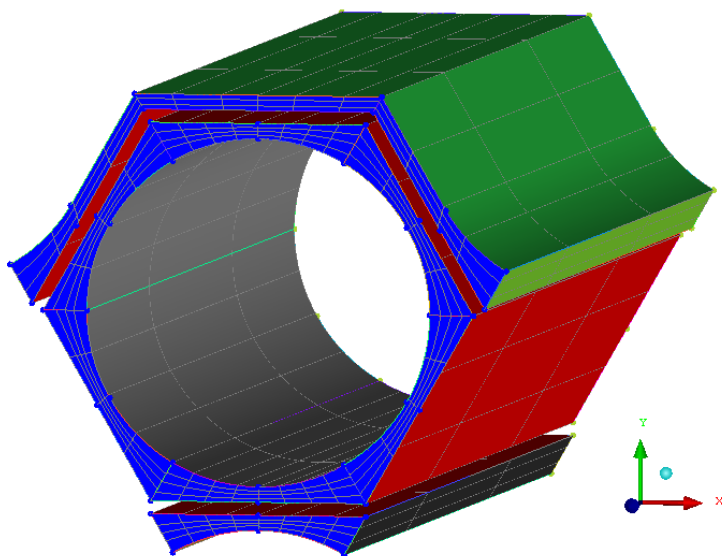
4-3. ábra: A P2-0 távtartó geometria keresztmetszete a távtartó magasságában

A 4-3. ábra mutatja a P2-0 távtartó geometria keresztmetszete a távtartó magasságában. Látható, hogy mind a fűtőpálcák, mind a távtartórács üresen hagyott területek, a bennük történő hővezetés számunkra nem érdekes (az egyszerűség kedvéért), egyedül az áramlást befolyásoló tulajdonságuk fontos, ezért nem szükséges diszkretizálnunk a térfogataikat, az is elég, ha csak a geometriák határa ismert.



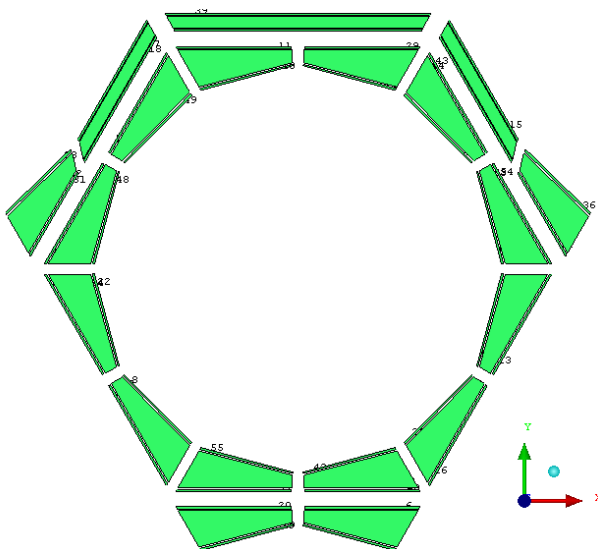
4-4. ábra: A P2-0 távtartó geometria axiális nézete

A 4-4. ábra mutatja a P2-0 távtartó geometria axiális nézetét. Ez nem árul el túl sok információt, egyedül az axiális hossz érdekes, ez 25 mm. A 4-5. ábra mutatja a távtartó izometrikus nézetét, mely alapján a geometria jól elképzelhető és megérthető.

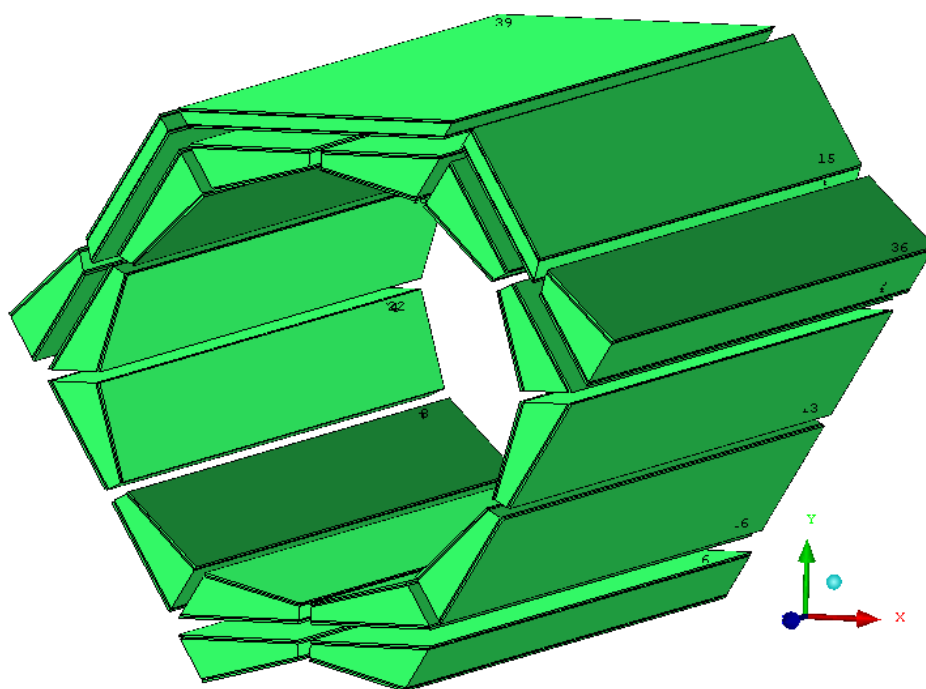


4-5. ábra: A P2-0 távtartó geometria izometrikus nézete

A geometria megépítése után el kellett készítenem a hálót. A geometria – mivel nem túl bonyolult – lehetőséget adott tisztán hexaédres háló használatára, mely numerikus szempontból a legjobb, így ezt a hálózási módot választottam. Ehhez először blokkokra kell bontani a geometriát.



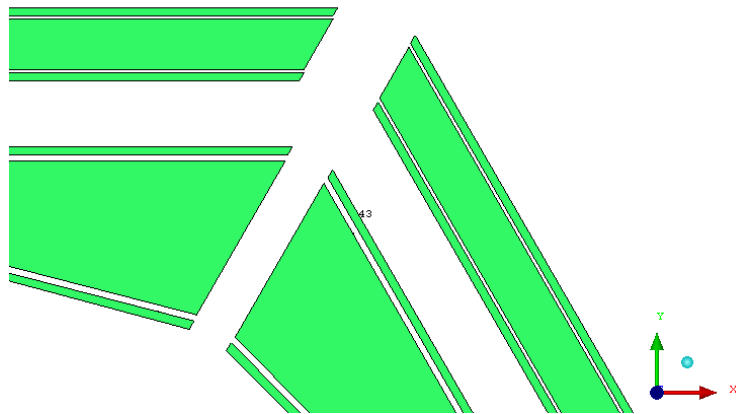
4-6. ábra: A P2-0 távtartó blokkstruktúra fölül nézete



4-7. ábra: A P2-0 távtartó blokkstruktúra izometrikus nézete

A 4-6. ábra és 4-7. ábra mutatja a blokkstruktúra kialakítását. Az áramlási csatornának a távtartórács és a mért szakasz burkolata közti részét 5 blokkra osztottam fel, a „C” fűtőpálca és a távtartórács közti részt 12 blokkra, a távtartórács és az „A” fűtőpálca közti részt pedig 2 blokkra (lásd 4-6. ábra és 4-7. ábra). Ez elsőre soknak tűnhet (gyakorlatilag mindhárom esetben feleannyi blokkból is megoldható lett volna a blokkstruktúra kialakítása), azonban mégis szükség volt ilyen nagyszámú blokkra a határréteg háló megfelelő kialakítása érdekében.

A határréteg hálót O-grid alkalmazásával készítettem el (lásd 4-8. ábra és 4-9. ábra). Ennek előnye, hogy a határréteg háló a geometria hálójától elkülönül (hiszen külön blokkok alkotják), így vastagsága (illetve egyéb tulajdonságai) a geometria hálójától függetlenül változtatható. Megjegyzendő, hogy a P2-0 geometria esetén nem feltétlenül lett volna szükség külön O-gridre a határréteg háléhoz, azonban a P2-1 és P2-2 geometriák határrétege csak így volt megfelelően behálózható, és mivel a három geometria egymásra épül, muszáj volt már a legegyszerűbb geometria esetében is olyan megoldásokat alkalmazni, melyek megkönnyítik a modellek közötti átjárhatóságot.

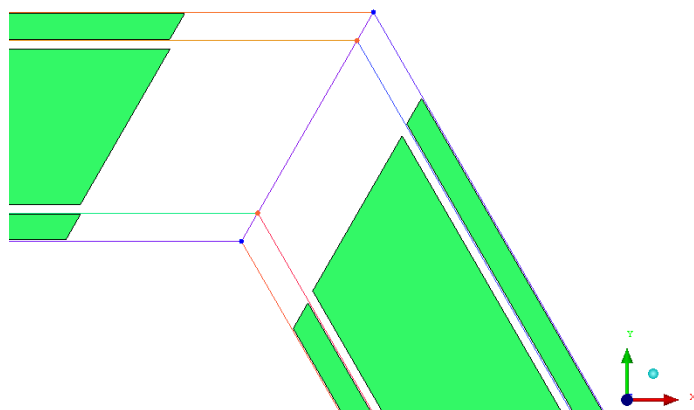


4-8. ábra: O-grid határréteg blokk fölül nézete

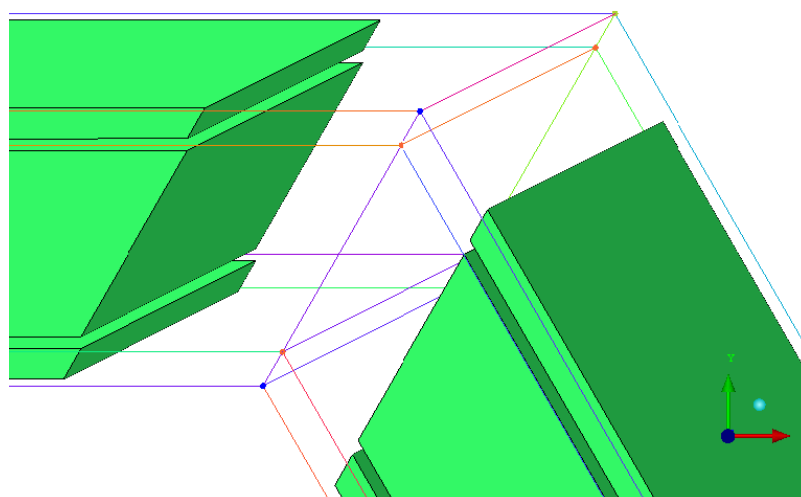


4-9. ábra: O-grid határréteg blokk izometrikus nézete

Ahhoz, hogy az O-grid megfelelően lekövesse a geometriát, szükség volt új vonalakra (4-10. ábra és 4-11. ábra), melyekhez az O-gridet hozzá lehetett rendelni (ellenkező esetben a görbületeknél az O-grid háló kicsúszott a geometrián kívülre).

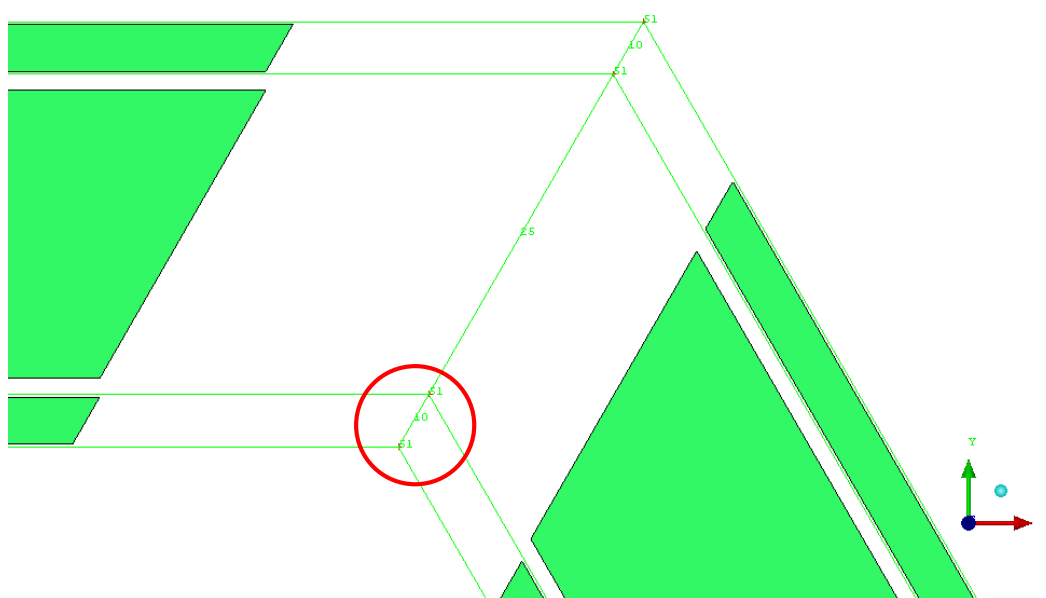


4-10. ábra: O-grid határréteg blokk és a hozzá tartozó geometria horizontális nézete

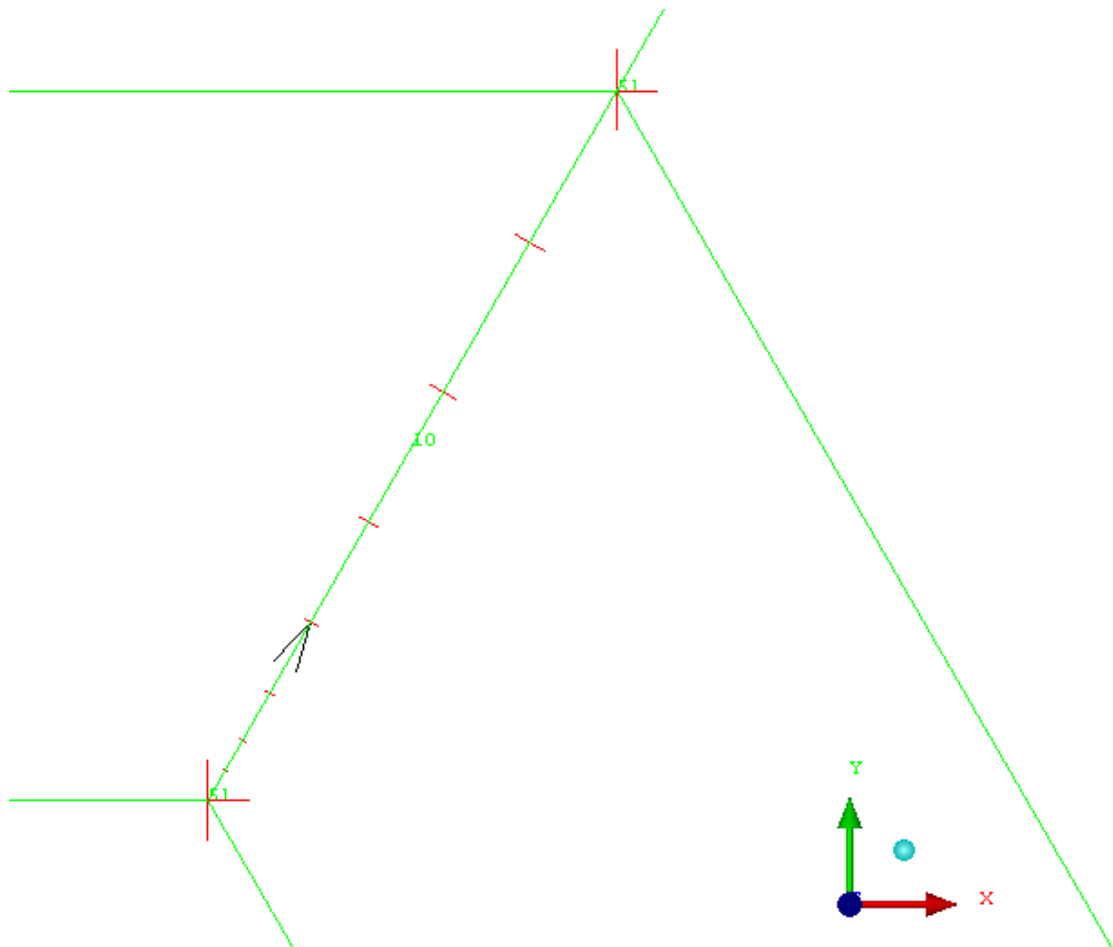


4-11. ábra: O-grid határréteg blokk és a hozzá tartozó geometria izometrikus nézete

A blokkstruktúra elkészítése után magát a hexaéder hálót kellett legenerálni. Ehhez szükség volt a blokkok élein (edge) beállítani a megfelelő csomópont (nódus) mennyiségeket (4-12. ábra), valamint ezek eloszlási függvényét az adott él mentén (4-13. ábra).



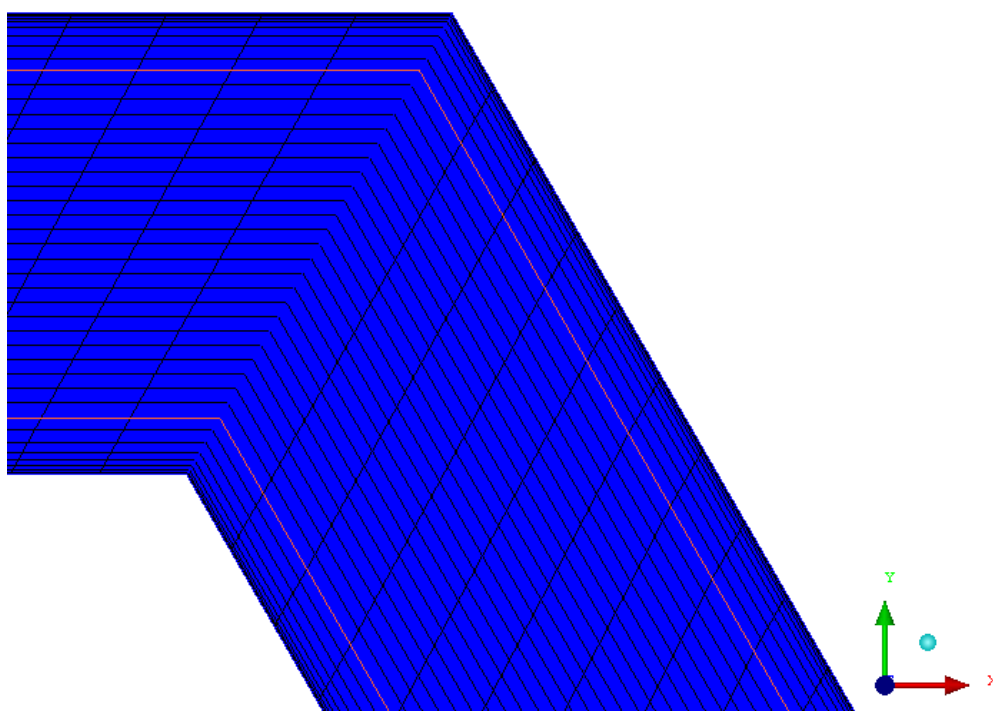
4-12. ábra: A blokkok élein (egde) lévő csomópontok száma



4-13. *ábra*: A csomópontok eloszlása az adott edge mentén (4-12. *ábra* pirossal bekarikázott része kinyújtva)

A 4-13. *ábra* zöld élén látható az adott él irányultsága (fekete nyíl mutatja), valamint láthatók az egyes csomópontok helyei (piros rovátkák az él mentén). Az alsó részen ezek sűrűbbek, a felső részen ritkábbak. Ennek az az oka, hogy az alsó részen az áramlási tér a távtartóval érintkezik, vagyis itt határréteg alakul ki, amit részletesen szeretnék vizsgálni, ezért kell itt a csomópontokat sokkal sűrűbbre venni. Az él tetején azért engedhető meg a nagyobb osztás, mert a határréteg háló ezen oldala nem szilárd fallal, hanem folyadékkal érintkezik (lásd 4-12. *ábra*), vagyis itt nincs határréteg.

Miután a megfelelő él paramétereket mindenhol beállítottam, a háló generálása következett.



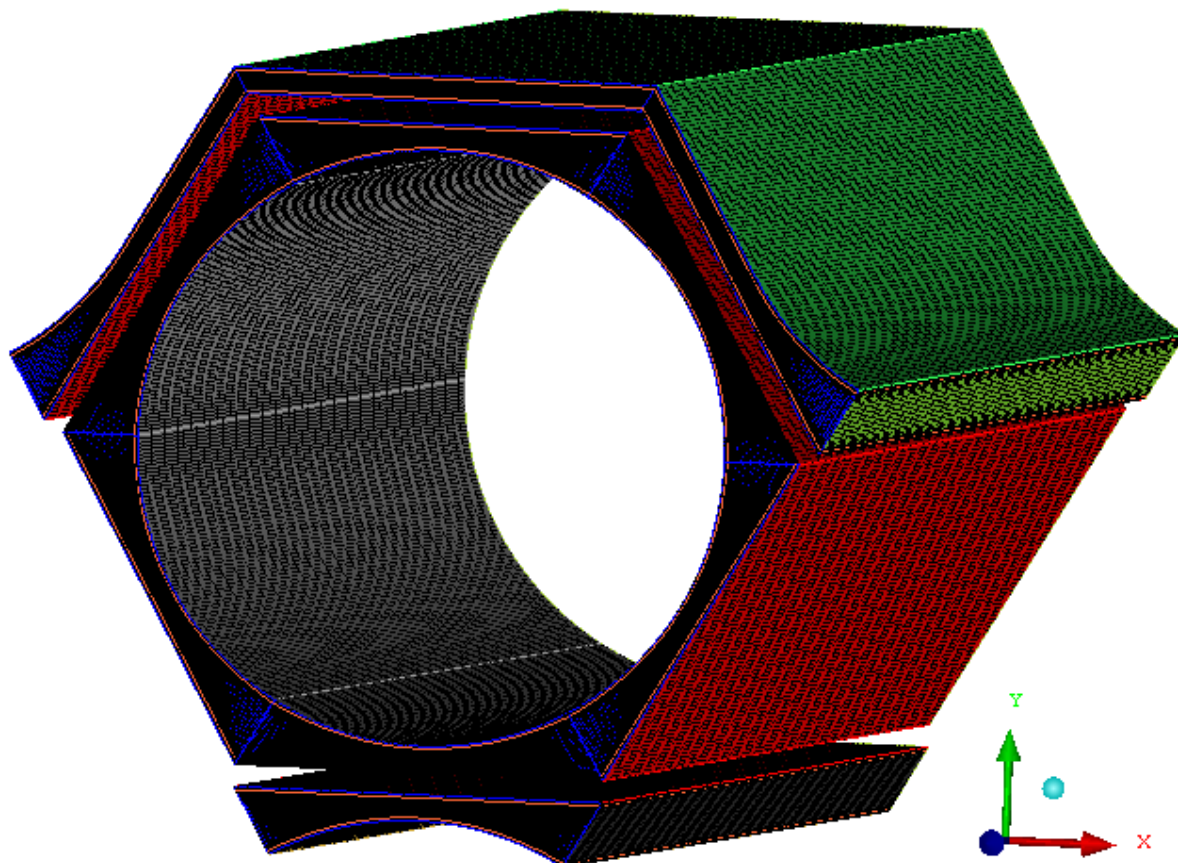
4-14. ábra: A határréteg háló

A 4-14. ábra mutatja a már korábbi ábrákról megismert geometria-részletre generált hálót (az O-grid határréteg határát narancssárga vonal jelzi). A két határrétegen megfigyelhető, hogy a csomópontok osztása a falaknál kicsi (vagyis a háló itt sűrűbb lesz, lásd 4-13. ábra), az áramlási tér belseje felé néző oldalon pedig nagyobb, egész pontosan akkora, hogy az áramlási tér belsejében levő osztástól ne térjen el jelentősen. Ez azért fontos, hogy a hálóban az egyes csomópontok közti távolságok fokozatosan, ne pedig hirtelen nőjenek, mert ez számítási hibához vezethet. Az áramlási tér belsejében pedig azért engedhető meg a ritkább osztás, mert itt nem alakulnak ki nagy gradienssel jellemezhető eloszlások, az áramlás nagyjából egyenletes.

Megjegyzés a hálógeneráláshoz: a végleges háló generálása előtt el kell végezni az úgynevezett hálófüggetlenség-vizsgálatot, ami azt jelenti, hogy ugyanarra a geometriára legalább három (de inkább több) különböző sűrűségű hálót generálunk, és az ezekkel végzett számításokat hasonlítjuk össze. Ahogy haladunk a sűrűbb hálók felé a vizsgált paraméterek egyre pontosabbak lesznek, azonban van egy határ, mely után hiába sűrítjük a hálót, az eredmény nem lesz pontosabb, az értékek konvergálnak. Ezen a ponton túl felesleges sűríteni a hálót, mert pontosabb eredményt nem kapunk, de a sűrűbb háló miatt

a számítás tovább tart. A hálófüggetlenség-vizsgálattal így optimalizálhatjuk a háló sűrűségét.

Ezt a vizsgálatot Kiss Attila tanár úr már korábban elvégezte, ezért mikor generáltam a hálót csak átvettem az általa javasolt paramétereket, a vizsgálatot én magam nem végeztem el.



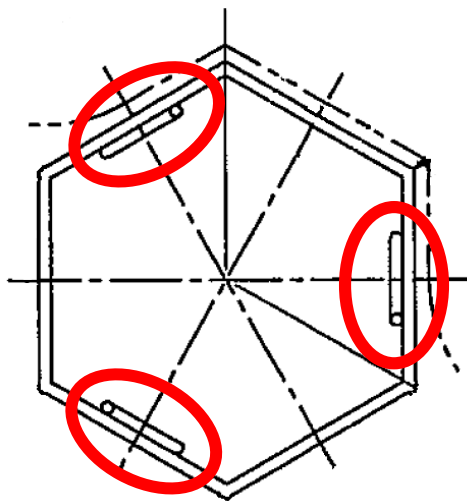
4-15. ábra: A P2-0 távtartó geometria hálójának izometrikus nézete

A 4-15. ábra mutatja a P2-0 geometriára generált háló (a határréteg háló itt is a narancssárga vonalakig tart).

A generált háló tulajdonságai:

- Elemek száma: 2.261.828 db,
- Csomópontok száma: 2.167.296 db.

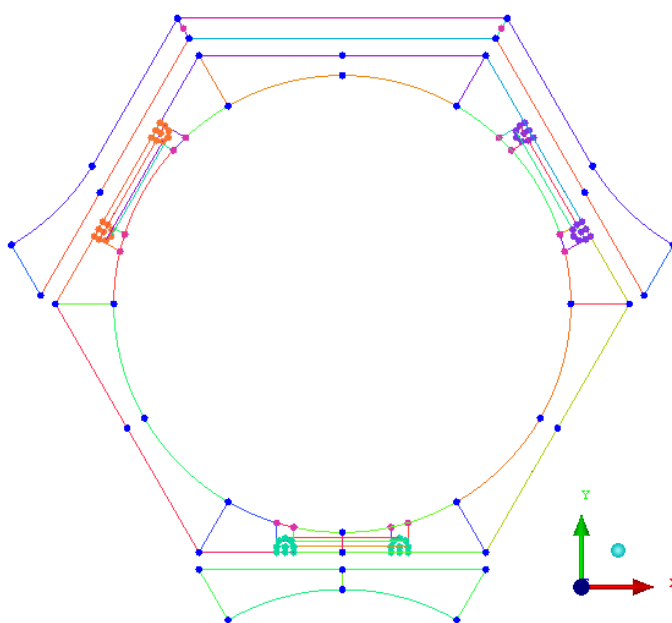
4.3. A közepes részletességű távtartó geometria (P2-1) bemutatása



4-16. ábra: A közepes részletességű távtartó geometria

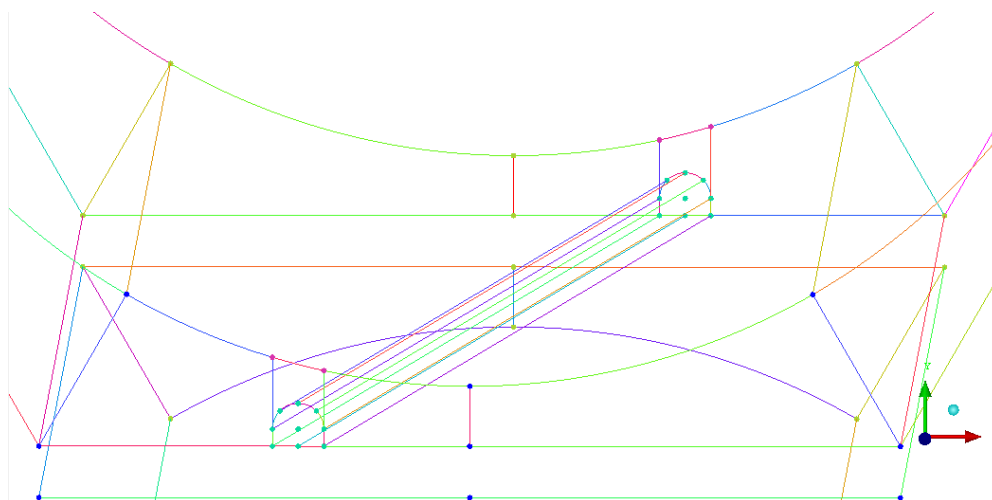
A közepes részletességű távtartó geometriát a 4-16. ábra szemlélteti. Ez annyiban tér el a legegyszerűbb geometriától (P2-0), hogy tartalmazza a három huzaldarabot, melyek a fűtőpálcát rögzítik a távtartórácson belül.

Maga a modell és a háló a P2-0 geometriából lett továbbfejlesztve, így mind a geometriának, a blokkstruktúrának és a generált hálónak csak azon részeit mutatom be, melyek változtak.



4-17. ábra: A P2-1 távtartó geometria horizontális nézete

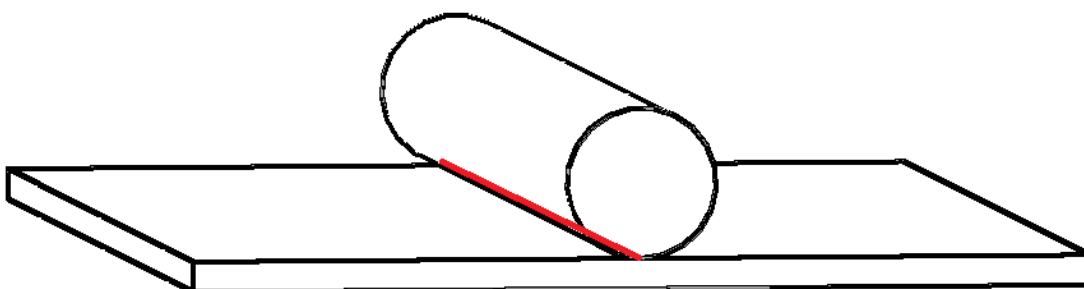
A 4-17. ábra látható a továbbfejlesztett geometria. A három huzal úgy helyezkedik el a fűtőpálca kerülete mentén, hogy a hatszögrács hat oldalából 1-1 oldal üresen marad a huzalok között (vagyis minden második oldalon van huzal).



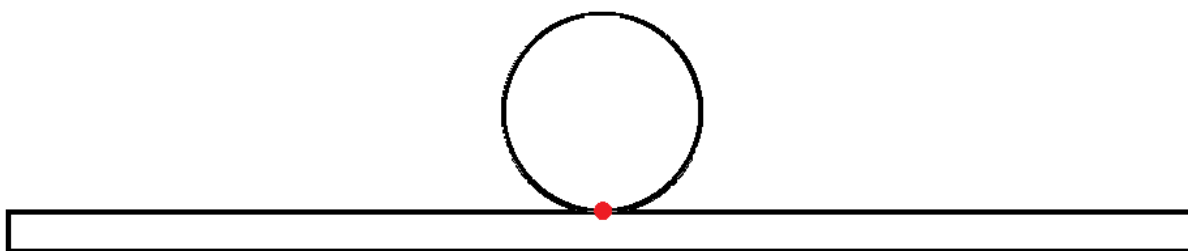
4-18. ábra: A huzal geometria

A 4-18. ábra mutatja a huzal geometriát, ahogy az az általam alkotott modellben szerepel. Ezt azért fontos kihangsúlyozni, mert a huzal esetében egyszerűsítéseket kellett alkalmaznom a valós geometriával szemben, mégpedig azért, mert a kód nem lett volna képes lekezelni a valós geometriát.

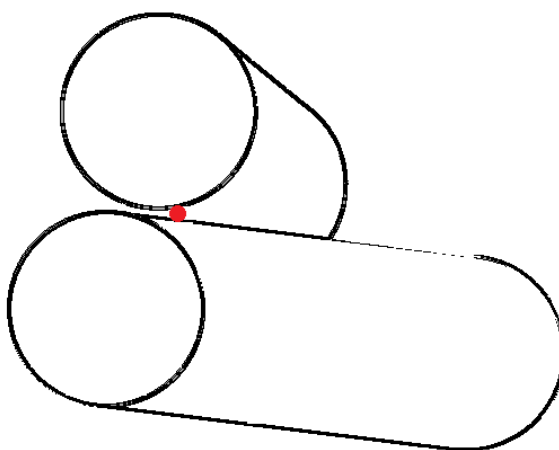
A valóságban a fűtőpalcát rögzítő huzal gyakorlatilag egy henger, mely mindössze egy vonal (pirossal jelölve) mentén érintkezik a távtartó hatszögrácsával (4-19. ábra és 4-20. ábra), az fűtőpalcával pedig mindössze egy ponton érintkezik (hiszen a pálca is egy henger, és ha két henger elfordulva érinti egymást, ott mindössze egy közös pont lesz, lásd 4-21. ábra).



4-19. ábra: Henger és sík izometrikus nézete



4-20. ábra: Henger és sík – szemből

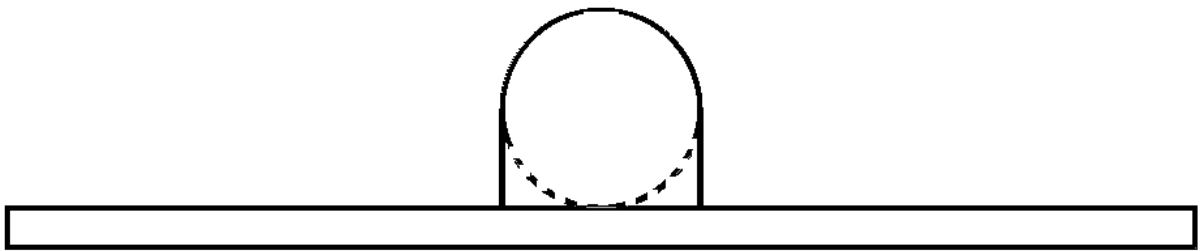


4-21. ábra: Két, egymással nem párhuzamosan érintkező henger felületeinek közös pontja

Egy ilyen elemre hálót generálni nem igazán lehet, ugyanis a henger és a sík találkozásánál nagyon torz alakú elemek keletkeznének, melyekkel a kód nem tud számolni, így a számítások le sem futnának. Ugyanez okozza a hibát a huzal és a fűtőpálca találkozásánál is, azzal a különbséggel, hogy itt a torz elemek nem egy vonal mentén, hanem csak az érintkezési pont körül alakulnának ki, azonban ez ugyanúgy rossz hatással van a hálógenerálásra, és futtathatatlanná tenné a számítást.

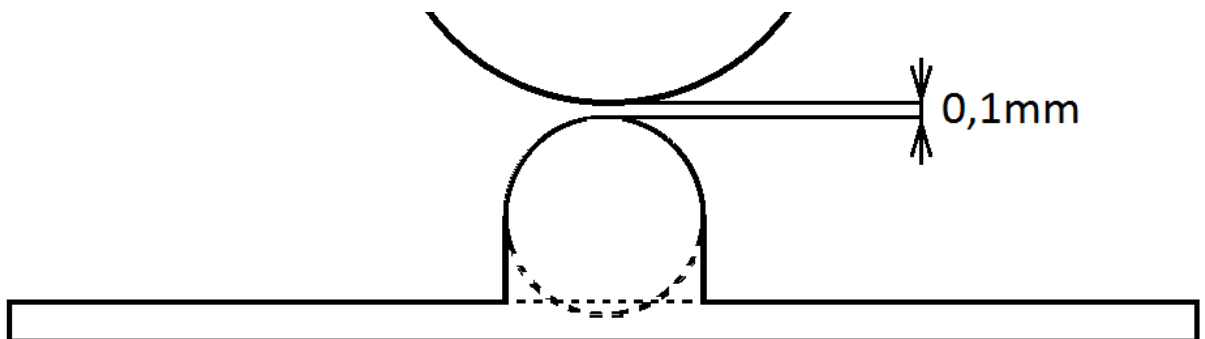
Ezen probléma kiküszöbölése érdekében született meg a 4-18. ábra által szemléltetett huzalgeometria.

A henger és a sík érintkezésének hibáját úgy oldottam meg, hogy a hengert lecseréltem egy boltív alapú hasábra (lásd 4-22. ábra), így hálógeneráláskor nem alakulnak ki torz elemek.



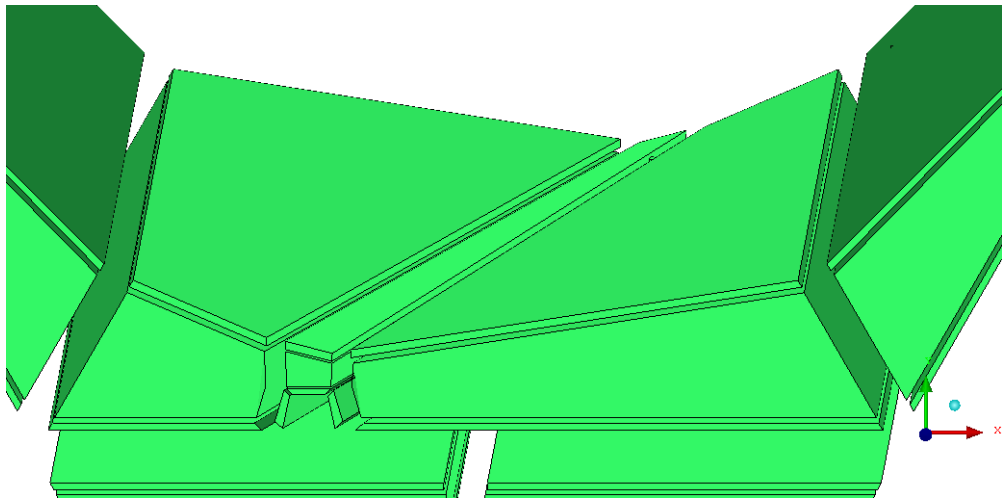
4-22. ábra: A henger átalakítása bóltív alapú hasábbbá

A huzal és a fűtőpálca érintkezésénél keletkező hibát úgy küszöböltem ki, hogy a huzal (mostantól már gyakorlatilag bóltív, azonban a továbbiakban is huzalként fogom hívni) magasságát lecsökkentettem. Így a henger és a fűtőpálca már egyáltalán nem érintkezik, vagyis nem lesz érintkezési pont, ami körül torz elemek alakulnának ki. Így persze a huzalok nem töltik be a funkciójukat (hiszen nem érintkeznek a fűtőpálcával, tehát elméletileg tartani sem tudják), azonban ott, ahol az érintkezési pontnak kéne lennie, a két felület között mindössze 0,1 mm az eltérés, vagyis nagyon kicsi, azonban ahhoz már elég, hogy ne okozzon hibát a számításban (lásd 4-23. ábra).



4-23. ábra: A henger geometriájának végső, a számítási modellbe bekerülő geometriája

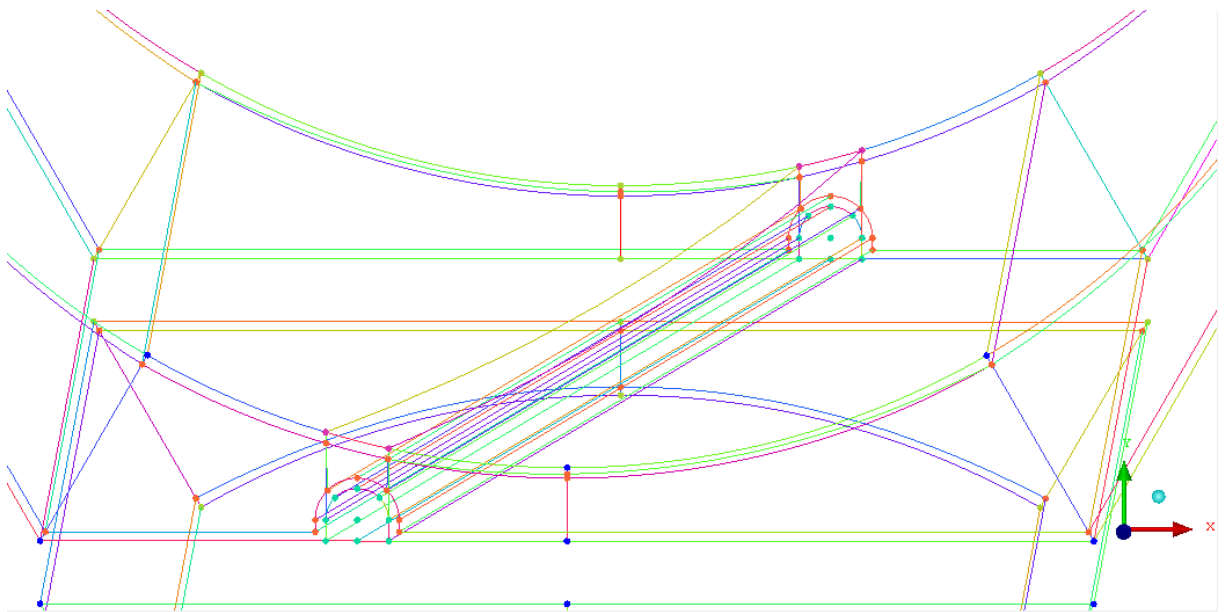
A huzalok geometriájának megalkotása után a blokkstruktúrát kellett átalakítani, hogy megfelelően lekövesse az új geometriát.



4-24. ábra: A blokkozás a huzalnál

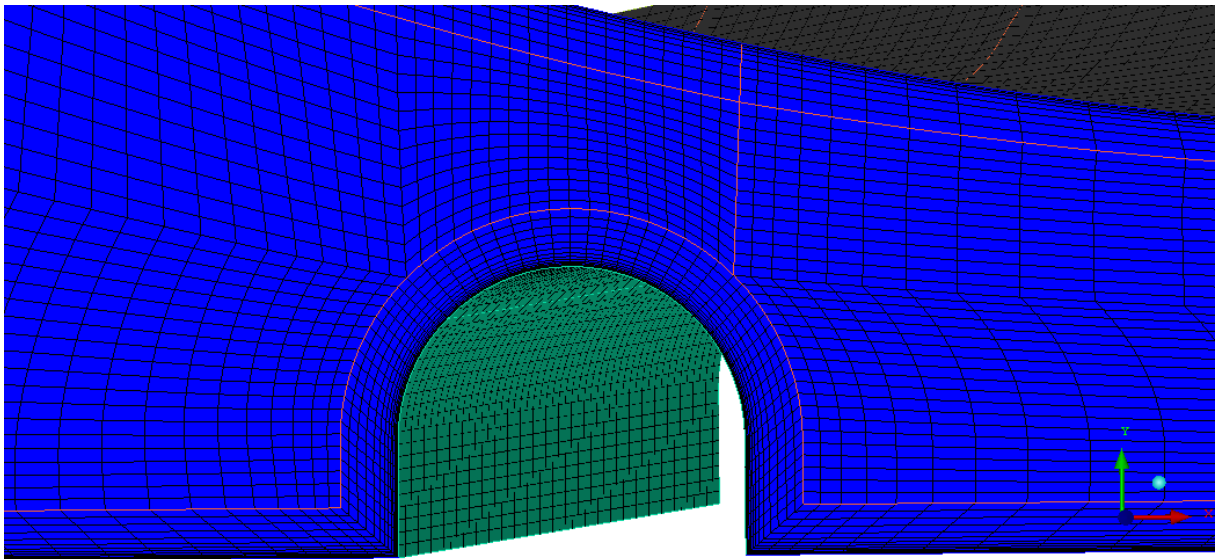
A 4-24. ábra mutatja a blokkozásban bekövetkezett változást. Az eredeti két blokkból az egyiket tovább daraboltam, így két nagy és egy kis blokkot kaptam, melyből a kis blokk került a huzal feletti részre. Az O-grid a C fűtőpálcával érintkező résznél lényegében nem változott, azonban a huzal körül ki kellett alakítani 3 új O-grid elemet, hogy a határréteg hálójával le lehessen követni a huzalt is.

Természetesen ez esetben is szükség volt a geometria új vonalakkal való kiegészítésére, melyekhez az O-gridet hozzá lehetett rendelni (lásd 4-25. ábra).



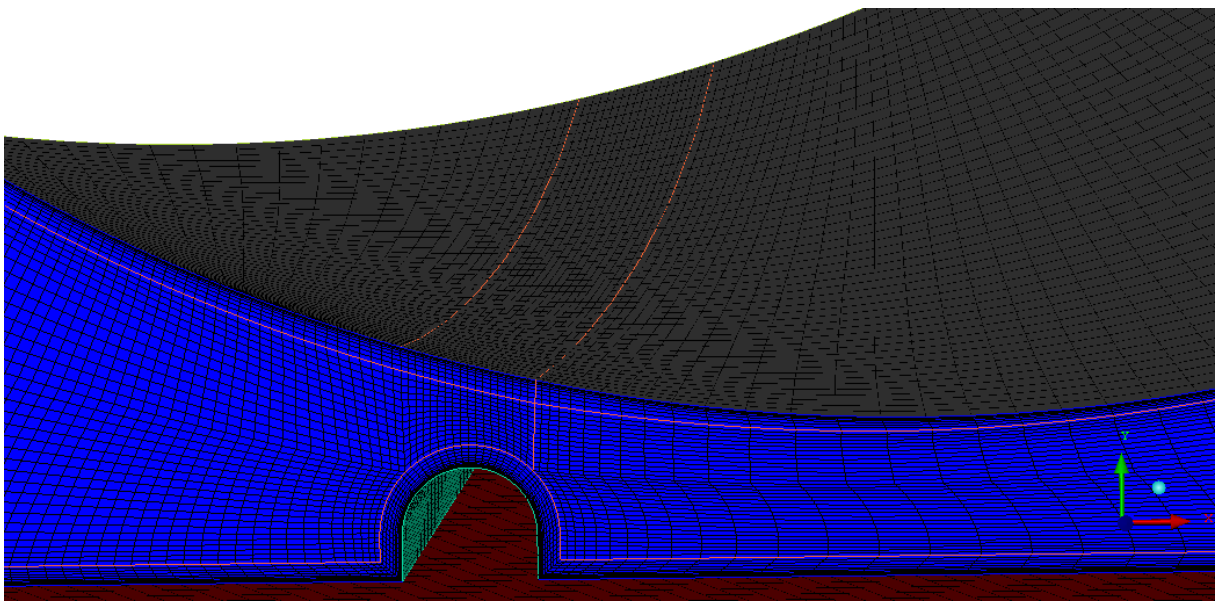
4-25. ábra: A geometria kiegészítése az O-grid miatt

Ez után legeneráltam a hálót.



4-26. ábra: A háló a huzalnál

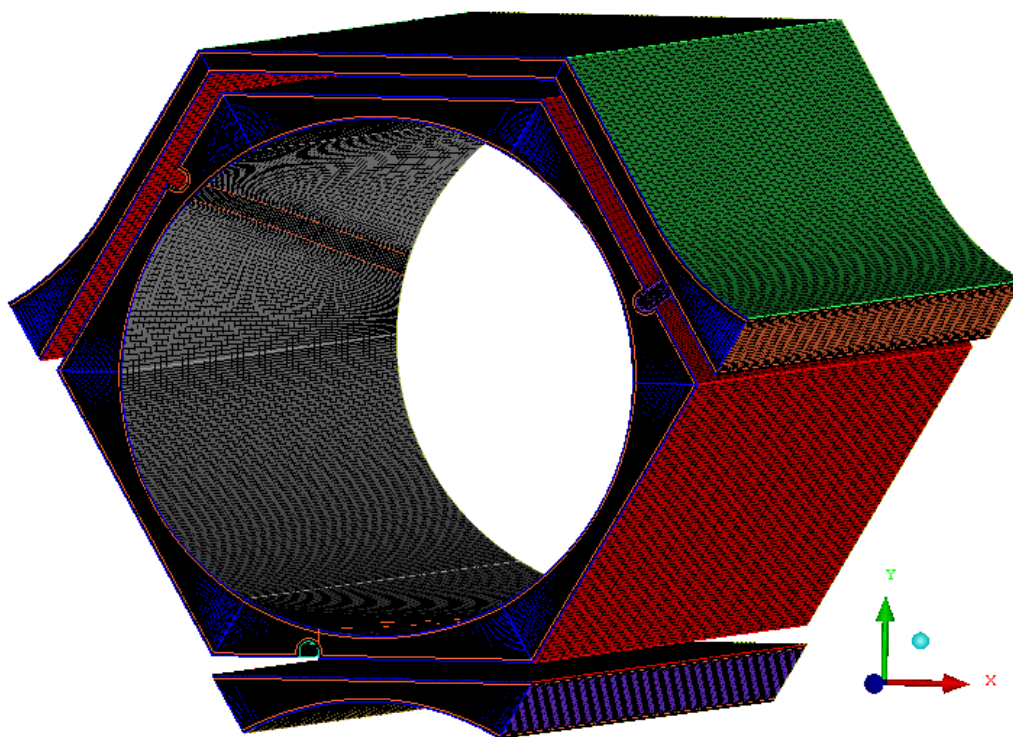
A 4-26. ábra szemlélteti, hogy a megfelelő él paraméterek beállítása után a határréteg háló szépen leköveti a huzalt, az elemek a falnál sűrűbbek, az áramlási tér közepe felé ritkulnak, majd a geometria túloldalán (a „C” fűtőpálca falánál) újra besűrűsödnek.



4-27. ábra: Háló a huzal tágabb környezetében

A 4-27. ábra a huzal tágabb környezetében generálódott hálót mutatja. Látható, hogy az elemek a huzal jobboldalán sokkal nagyobbak, mint a baloldalon. Ennek oka maga a hexaéder háló. Egy blokk szemközti oldalain csak azonos számú csomópont lehet, ha nem így volna, a blokkon belül elemek vesznének el vagy keletkeznének, ami nem lehetséges. Viszont itt trapéz alakú blokkokat kellett alkalmazni a huzal nem egyenes volta miatt, vagyis a két oldalsó bloknak a szemközti oldalai nem azonos hosszúságúak, viszont ugyanannyi csomópontot tartalmaznak. Ez az oka, hogy a rövidebb oldalon a csomópontok sűrűbben helyezkednek el (lásd a huzal baloldalán lévő háló) mint a hosszabb oldalon (lásd a huzal jobboldalán lévő háló). Ezzel sajnos csak annyit lehetett tenni, hogy a megfelelő él paraméterek beállításával úgy beállítani a csomópontok távolságát, hogy a szomszédos elemek méretei között ne legyen túl nagy különbség.

A 4-28. ábra mutatja a hálóval ellátott P2-1-es távtartó geometriát.

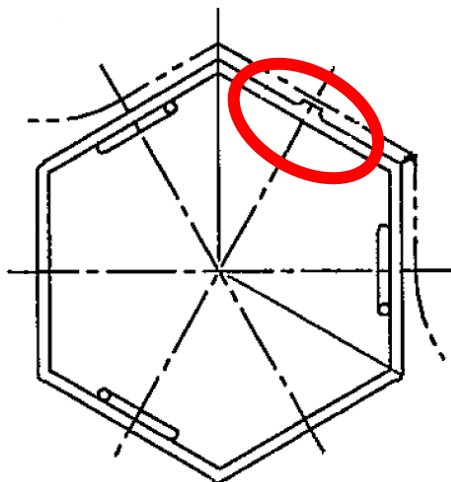


4-28. ábra: A P2-1 távtartó geometria hálójának izometrikus nézete

A generált háló tulajdonságai:

- Elemek száma: 2.403.415 db,
- Csomópontok száma: 2.298.570 db.

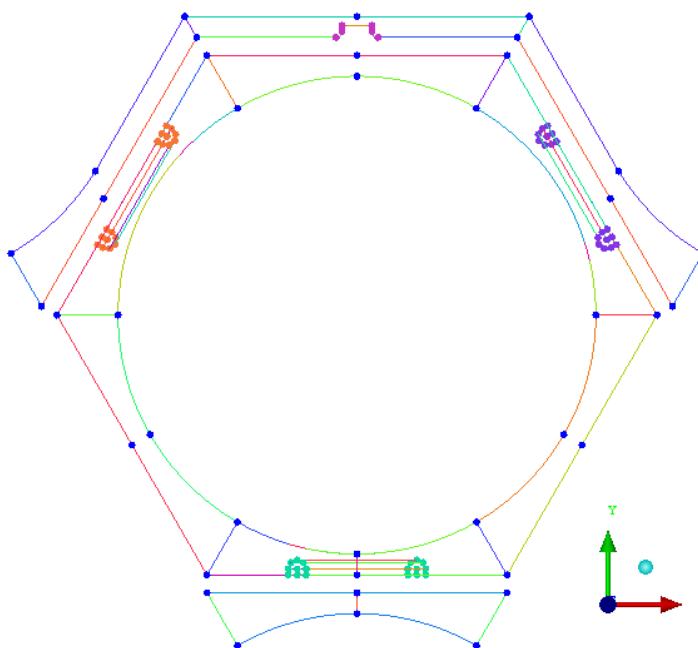
4.4. A legrészletesebb távtartó geometria (P2-2) ismertetése



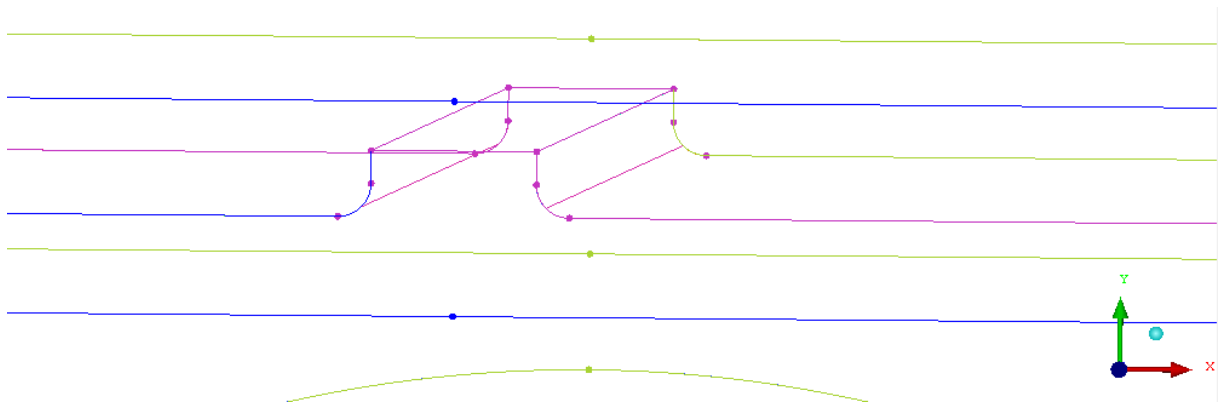
4-29. ábra: A legrészletesebb távtartó geometria

A 4-29. ábra mutatja a legrészletesebb távtartó geometriát, külön kiemelve a pozicionáló elemet. A P2-2 távtartó geometria tartalmazza a P2-1 geometriánál bemutatott huza-
lokat, valamint a rács külső részén lévő, a távtartórácsot a mért szakasz burkolatán belül pozicionáló elemet is.

A 4-30. ábra mutatja a P2-2-es távtartó geometria ICEM-ben megépített változatát, a 4-31. ábra pedig a pozicionáló elem geometriáját részletezi.

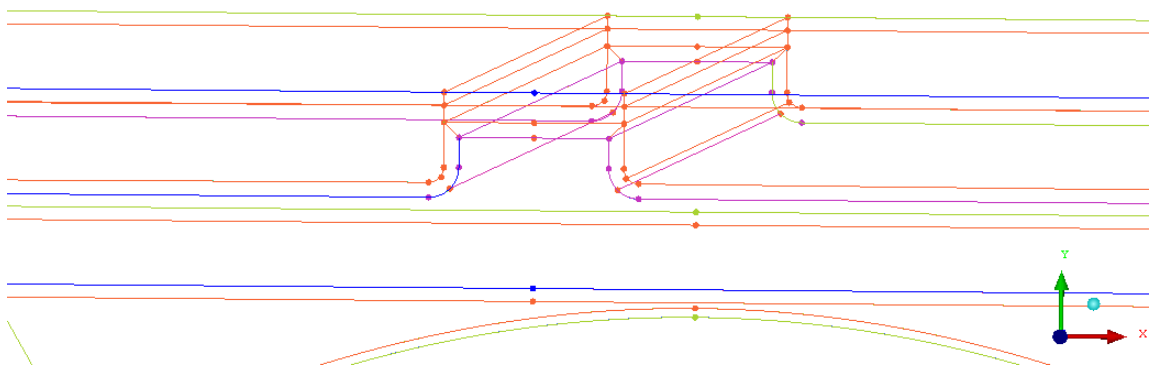


4-30. ábra: A P2-2 távtartó geometria fölül nézete



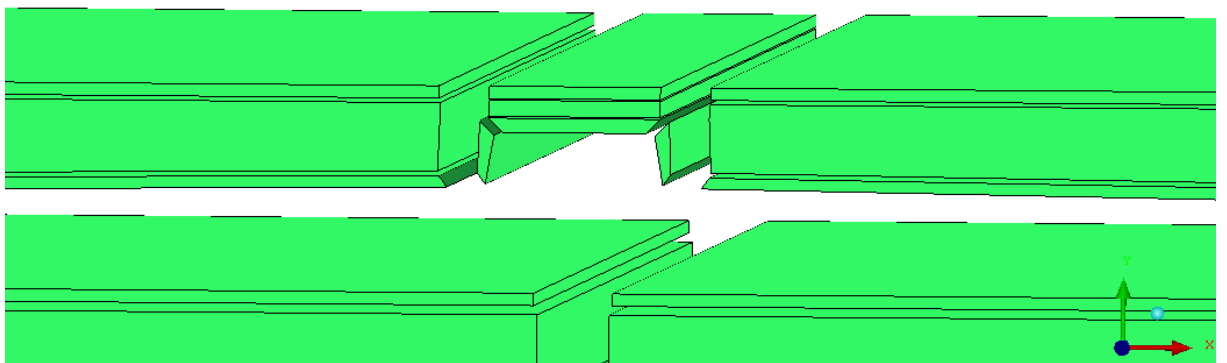
4-31. ábra: A távtartórácsot pozicionáló elem geometriájának izometrikus nézete

A huzalokkal ellentétben itt nem kellett változtatásokat alkalmaznom a geometrián, mert nem volt olyan rész, melynek hálózásakor torz elemek jöttek volna létre.



4-32. ábra: Az O-grid miatti geometria módosítás

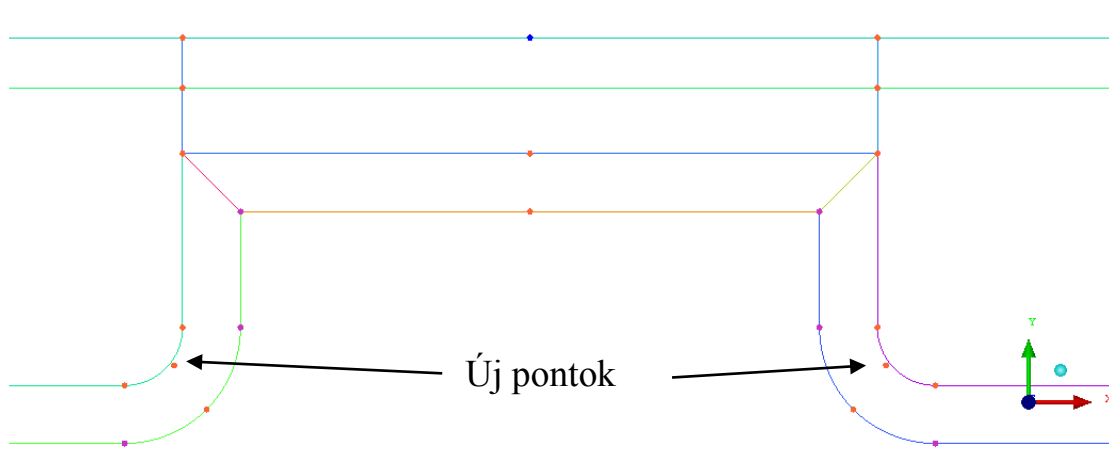
A határréteg háló miatt ez esetben is hozzá kellett adni a geometriához (lásd 4-32. ábra).



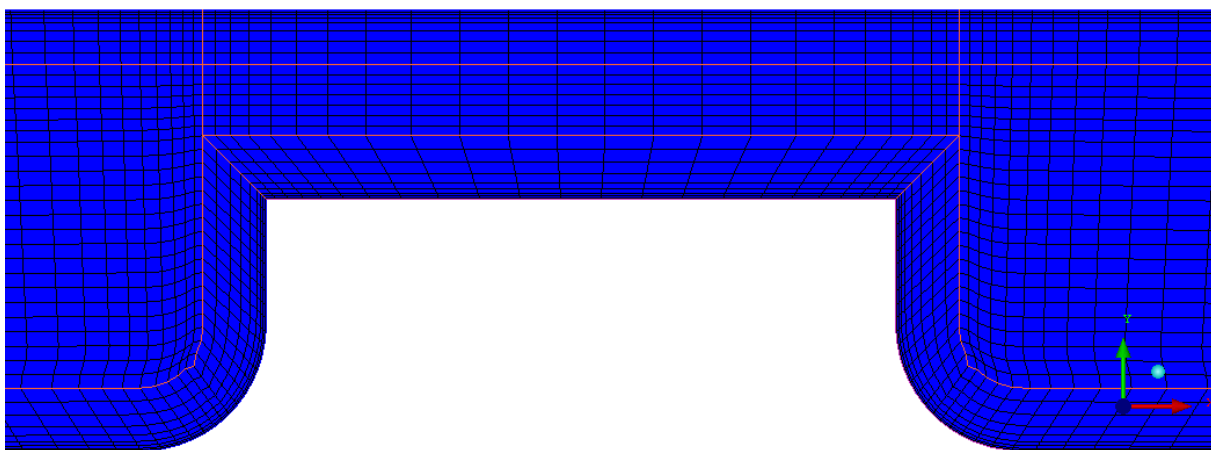
4-33. ábra: A blokkstruktúra

A 4-33. ábra szemlélteti a pozicionáló elem blokkolását. A felső áramlási csatornához tartozó blokkot három darabba vágtam, melyek közül a középső került az elem fölé, a két nagyobbik blokk pedig a maradék részeket foglalta el. Hasonlóan a huzalokhoz, az O-grid itt is leköveti az elemet, hogy a mellette kialakuló határréteget vizsgálni lehessen.

A háló generálásában egyedül a lekerekítés jelentett gondot, ugyanis a két nagyobb blokk alsó, a lekerekítés melletti sarkainál torz elemek jöttek létre. Ezt úgy oldottam meg, hogy egy újabb pontot adtam a geometriához, és a blokk sarkát ehhez rendeltem hozzá (lásd 4-34. ábra).



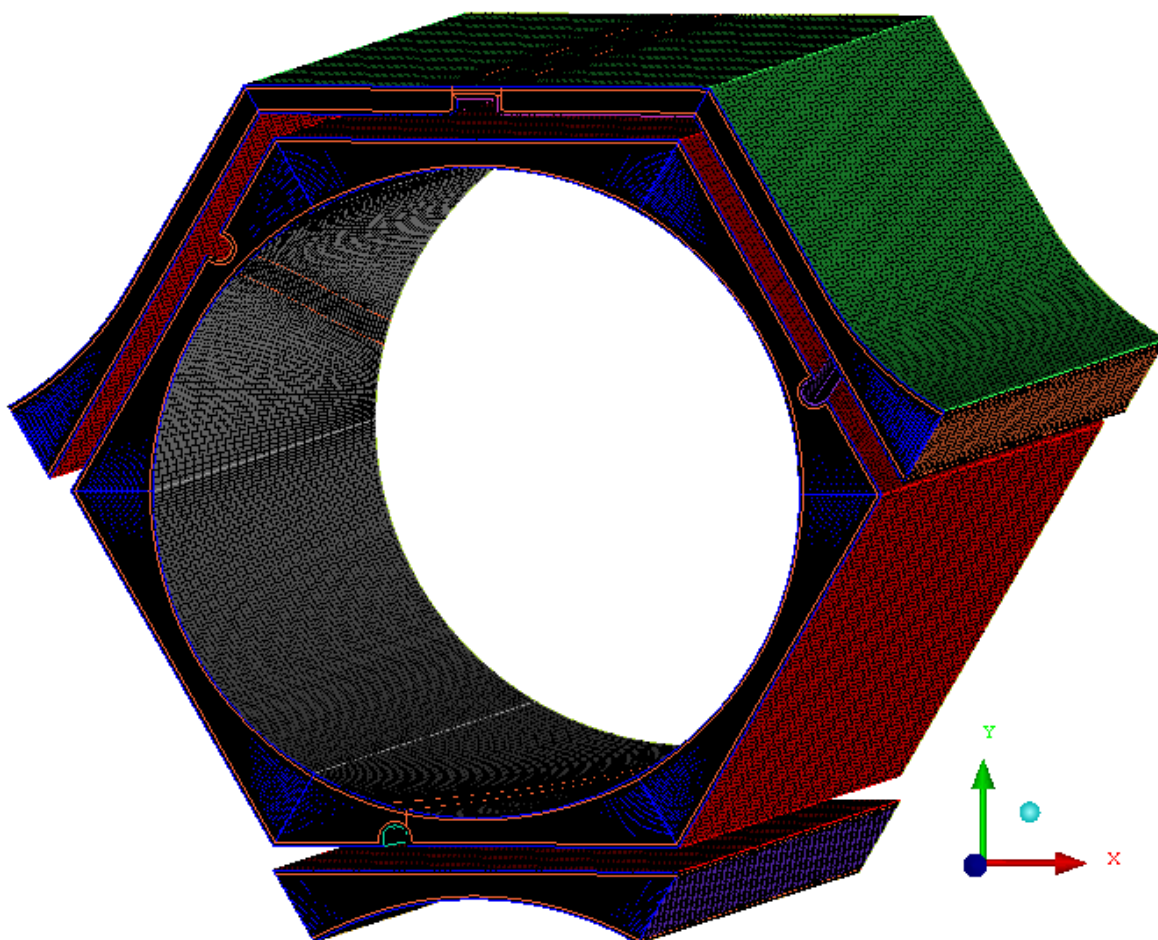
4-34. ábra: Új pontok a geometriában a torzult hálóelemek kiküszöbölésére



4-35. ábra: A távtartót pozicionáló elem hálójának elől nézete

A 4-35. ábra szemlélteti, hogy a nagy blokkoknak a lekerekítések felé eső sarkainál még mindig elég torz elemek találhatók, azonban ezek már elég jók ahhoz, hogy a kód számolni tudjon velük.

A 4-36. ábra mutatja a P2-2-es távtartó geometria kész hálóját.



4-36. ábra: A P2-2 távtartó geometria hálója

A generált háló tulajdonságai:

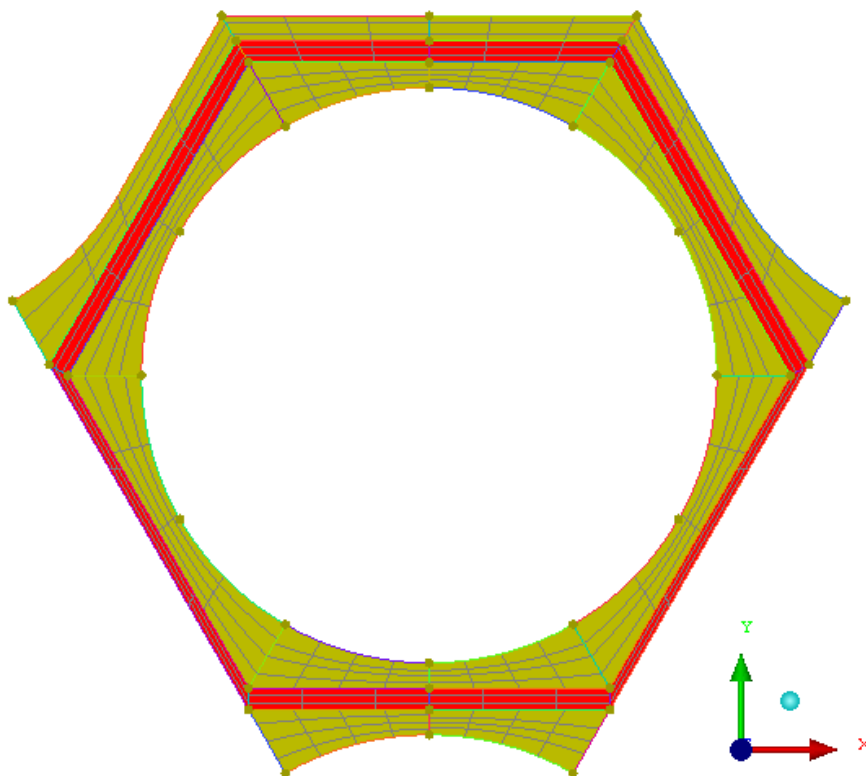
- Elemek száma: 2.454.271 db,
- Csomópontok száma: 2.345.541 db.

4.5. A bevezető szakasz (P1) geometriájának bemutatása

A valóságban a távtartórács nem önmagában áll, hanem a mért szakaszban foglal helyet. Ez azt jelenti, hogy mire a közeg a távtartóhoz ér, már kialakult áramlási sebességprofilal rendelkezik. Ilyen profilt nem könnyű beállítani peremfeltételnek, ezért kell a bevezető szakaszt alkalmazni, melyben ki tud alakulni a sebességprofil még az előtt, hogy a közeg a vizsgált térrészbe (vagyis a távtartórács geometriába) ér.

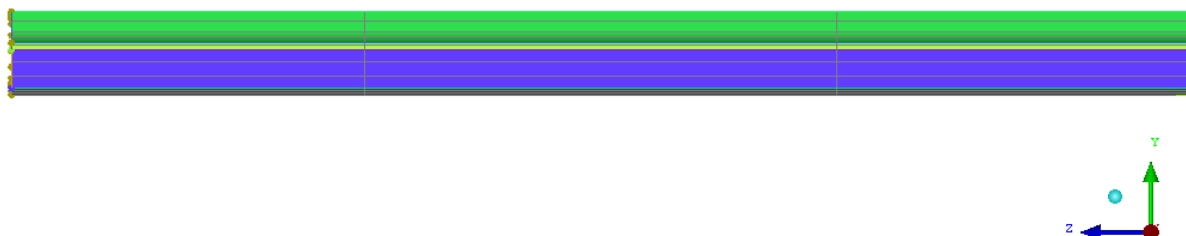
Ennélfogva a bevezető szakaszt is a lehető legtöbb odafigyeléssel kell lemodellezni, hogy a profil, mely benne kialakul, a lehető legpontosabb legyen. Emiatt ugyanúgy alkalmazni kell a határréteg hálót a falak mellett, valamint a szakaszt kellően hosszúra kell modellezni, hogy a profil biztosan kialakult legyen.

A bevezető szakasz geometriáját Kiss Attila tanár úrtól vettem át. A hossza 150 mm, ezen nem változtattam semmit, a blokkstruktúrát azonban hozzáigazítottam a távtartó geometriáknál ismertetett blokkstruktúrához, valamint a hálót is úgy készítettem el, hogy a két geometria csatlakozási felületénél (interface) az elemek méretei ne térjenek el egymástól túlságosan.



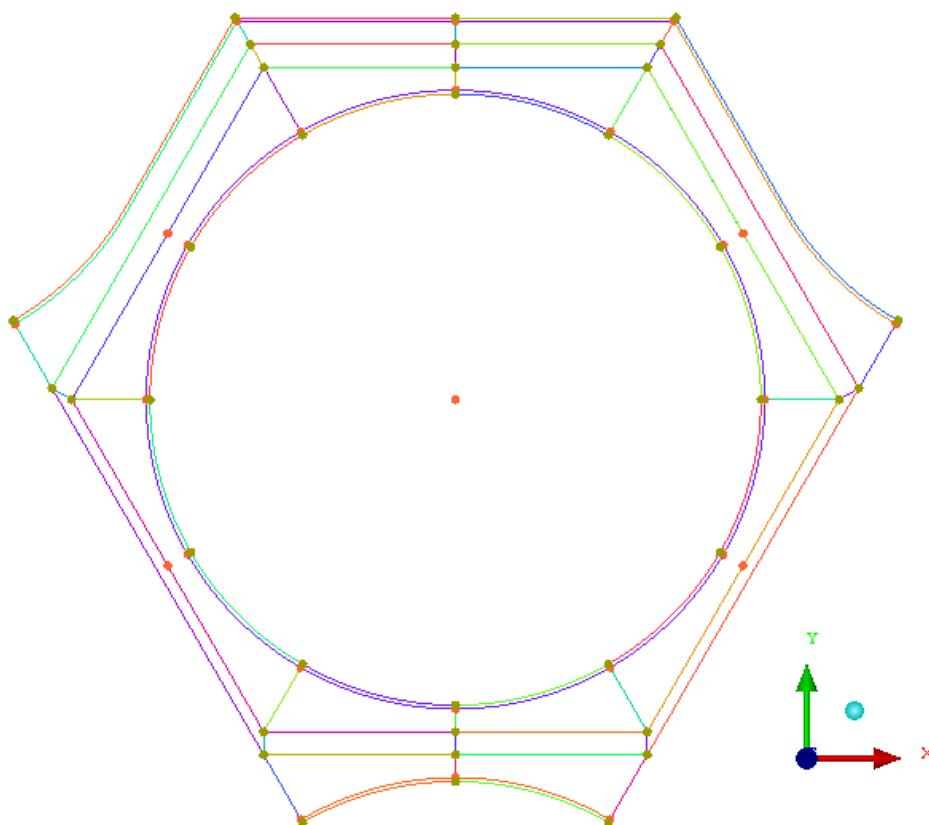
4-37. ábra: A P1 geometria horizontális nézete

A 4-37. ábra szemlélteti a geometriát föntről. A piros keret a távtartórácsot szimbolizálja, azonban itt maga a távtartó még nincs jelen, tehát a piros rész is az áramlási térhez tartozik; közeg áramlik benne.



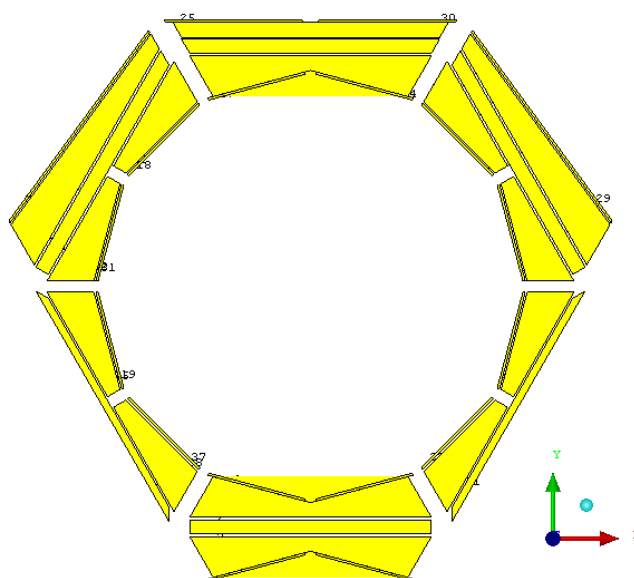
4-38. ábra: A P1 geometria axiális nézete

A 4-38. ábra szemlélteti, hogy ez az elem sokkal hosszabb, mint a P2-es geometriák. Míg azok 25 mm hosszúak voltak axiális irányban, a bevezető szakasz 150 mm-es.



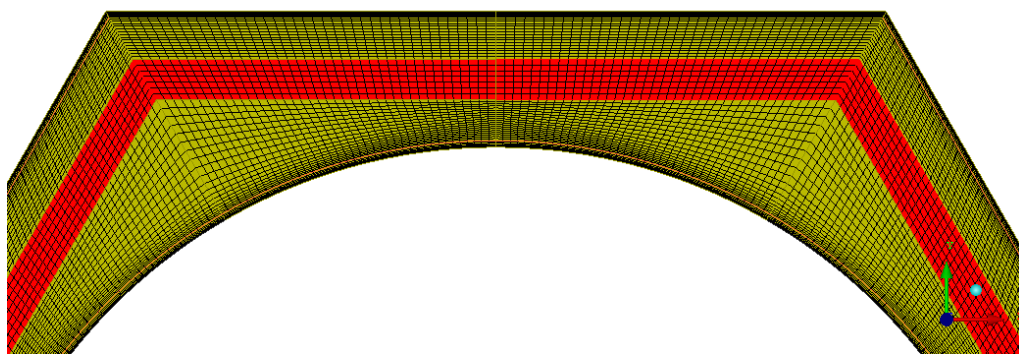
4-39. ábra: A geometria módosításai az O-grid miatt

A 4-39. ábra azt mutatja, hogy milyen plusz elemeket kellett a geometriához adnom az O-grid megfelelő hozzárendeléséhez. Látható, hogy jelen esetben csak az „A” és „C” pálcák falainál, valamint a mért szakasz burkolatánál kellett határréteg hálót készíteni, hiszen csak itt van merev fal, ami mellett a határréteg kialakul.



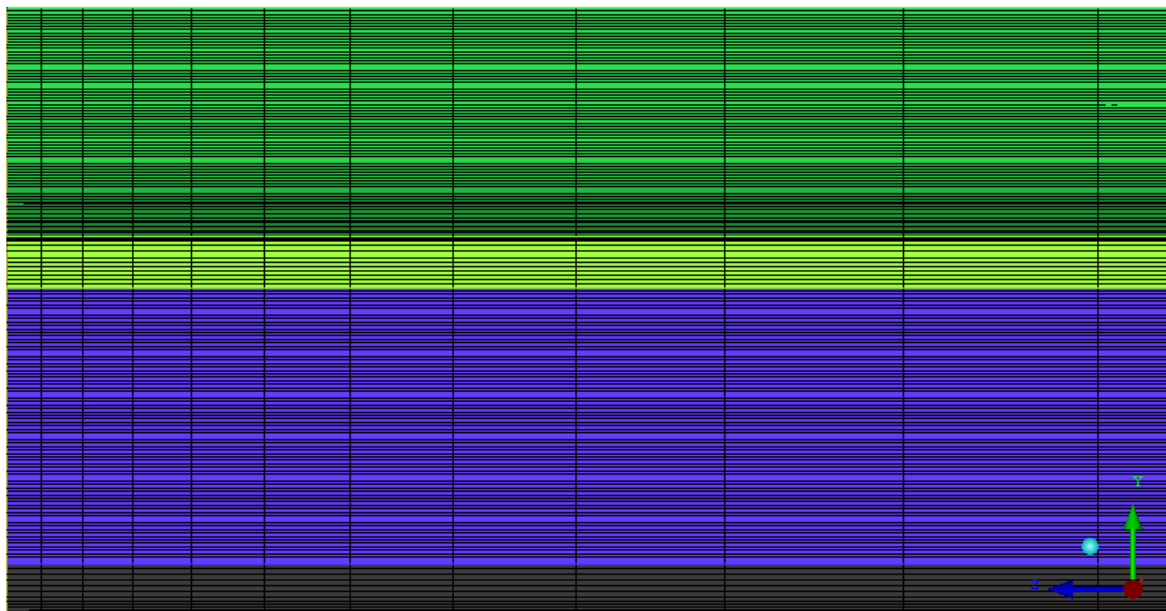
4-40. ábra: A P1 blokkstruktúrája

A 4-40. ábra mutatja a P1 blokkstruktúráját. Megfigyelhetők az O-grid blokkok a 4-39. ábra ismertetett helyeken, valamint látható, hogy a távtartó helye külön blokkokat kapott. Erre (és a geometriában a távtartó helyének külön jelölésére) megint csak azért volt szükség, hogy a geometriák egymás között jobban átjárhatók legyenek (ha ebből a blokkstruktúrából kivesszük a távtartó helyén lévő blokkokat, rögtön megkapjuk a P2-0 távtartó geometria profilját – a határréteg blokkozást leszámítva).



4-41. ábra: A P1 határréteg háló fölül nézete

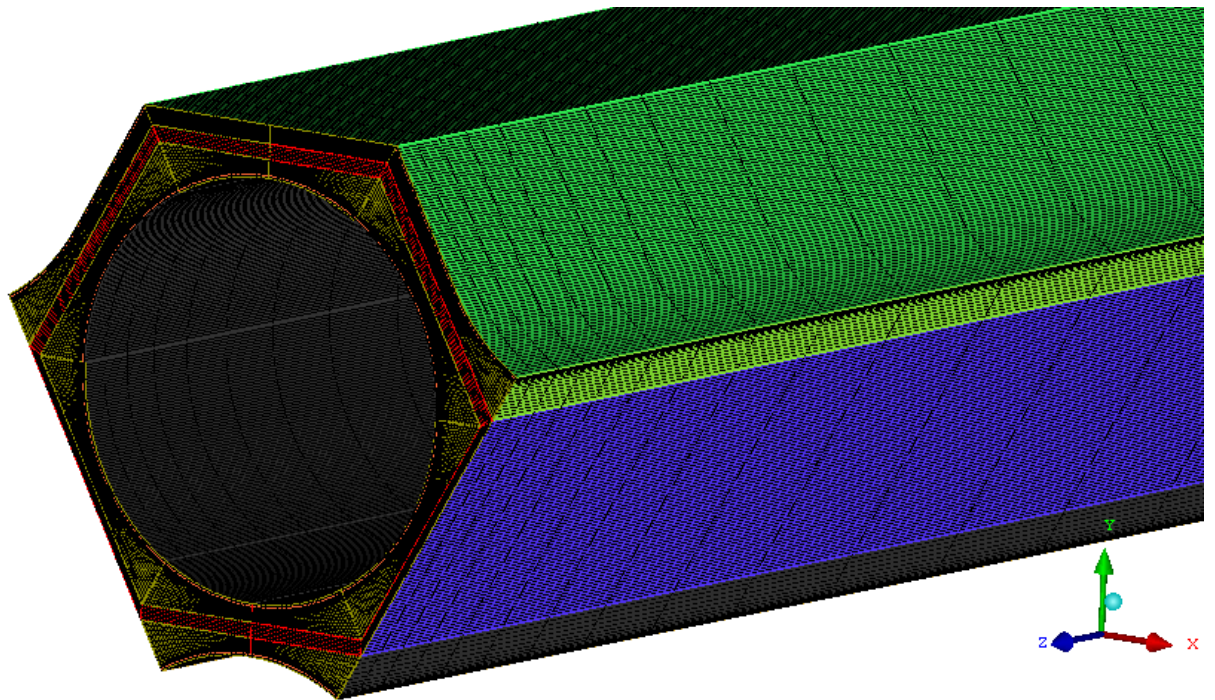
A 4-41. ábra szemlélteti a már legenerált hálót. Megfigyelhető, hogy a távtartót jelképező piros részen nincs határréteg háló, hiszen ez is az áramlási tér része, itt nem alakul ki határréteg.



4-42. ábra: A P1 háló oldal nézete

A 4-42. ábra mutatja a hálót oldalnézeti irányból. Látható, hogy a háló bal oldalán sokkal rövidebbek az elemek, mint a jobb oldalon. Ennek az az oka, hogy a bevezető szakasz bal oldalához csatlakozik az éppen vizsgált P2-es geometria, melynek axiális irányban sűrűbb a hálója, vagyis a bevezető szakasz hálójának is ehhez kell igazodnia. Felmerül a kérdés, hogy akkor miért nem egyenletes a P1 szakasz axiális hálózása. Azért, mert a P1 a maga 150 mm-ével egy relatíve nagy geometria. Ha az axiális irányú háló a teljes axiális hossz mentén olyan sűrű lenne, mint a P2-es hálók, a számítás a nagy rács-méret miatt sokkal tovább tartana, feleslegesen. Az is bőven elég, ha a bevezető szakasz-nak csak a P2-es geometria felé eső részén sűrítjük be a hálót. Így az áramlási profil ugyanúgy kialakul a bevezető szakaszban, a két geometria csatlakozásánál a háló elemek méretei között nem lesz jelentős eltérés, ráadásul a háló méretét sem kellett megnövelni, ami a számítás idő- és gépigényességének kedvez.

A 4-43. ábra mutatja a P1 geometriára legenerált hálót.



4-43. ábra: A P1 háló izometrikus nézete

A generált háló tulajdonságai:

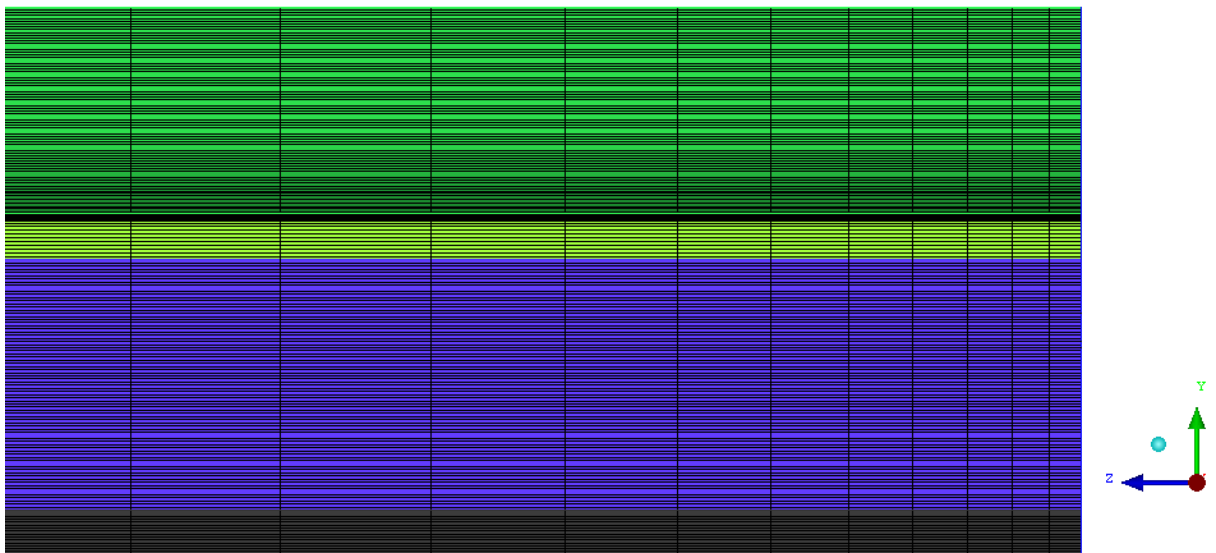
- Elemek száma: 1.366.014 db,
- Csomópontok száma: 1.308.048 db.

4.6. A kivezető szakasz (P3) geometriájának bemutatása

A bevezető szakasz azért kell, hogy az áramlási profil kialakulhasson, mielőtt a közeg a vizsgált térrészbe ér. A kivezető szakaszra hasonló okok miatt van szükség. Miután a vizsgált térrészbe ér a közeg, az áramlási profil megváltozik (hiszen ott a távtartórács, mely megváltoztatja a profilt, valamint nyomásesést okoz). A vizsgált térrész elhagyása után a távtartó okozta zavarok még jelen vannak az áramlásban. Ezek lehetnek örvények vagy az áramlási profilban okozott változások. Hogy ezeket is vizsgálni lehessen, szükség van egy kivezető szakaszra, melynek a távtartórácsához közel eső részében vizsgálhatóak a rács közvetlen hatásai (például az esetleges örvények), a távtartótól távolabbi részeken pedig az új kialakult áramlási profil vizsgálható (mekkora távolság kell az új profil kialakulásához, az új profil milyen mértékben tér el a távtartó előtti kialakult áramlási profiltól, stb.).

A kivezető szakasz geometriája szinte teljes mértékben megegyezik a bevezető szakasz geometriájával, az egyetlen különbség, hogy axiális irányban 275 mm hosszú. Magát a geometriát szintén Kiss Attila tanár úrtól vettem át, csak a blokkozásba nyúltam bele a határréteg háló kialakítása miatt, mely teljes mértékben azonos a bevezető szakaszon is látható határréteg hálójával.

Az egyedüli említésre méltó eltérés a bevezető szakasszal szemben (a két geometria eltérő axiális hosszán kívül) az axiális háló sűrítése. Mivel megint csak nagy geometriáról van szó, az axiális irányú rétegek számát igyekeztem csökkenteni, azonban a távtartóhoz közel eső részen megint csak sűríteni kellett az elemeket. Míg a bevezető szakasz esetén ez a sűrítés a távtartó geometria előtti részen történt, addig a kivezető szakasz esetében a távtartó geometria utáni részen kellett sűríteni (lásd 4-44. ábra).



4-44. ábra: A P3 háló axiális nézete

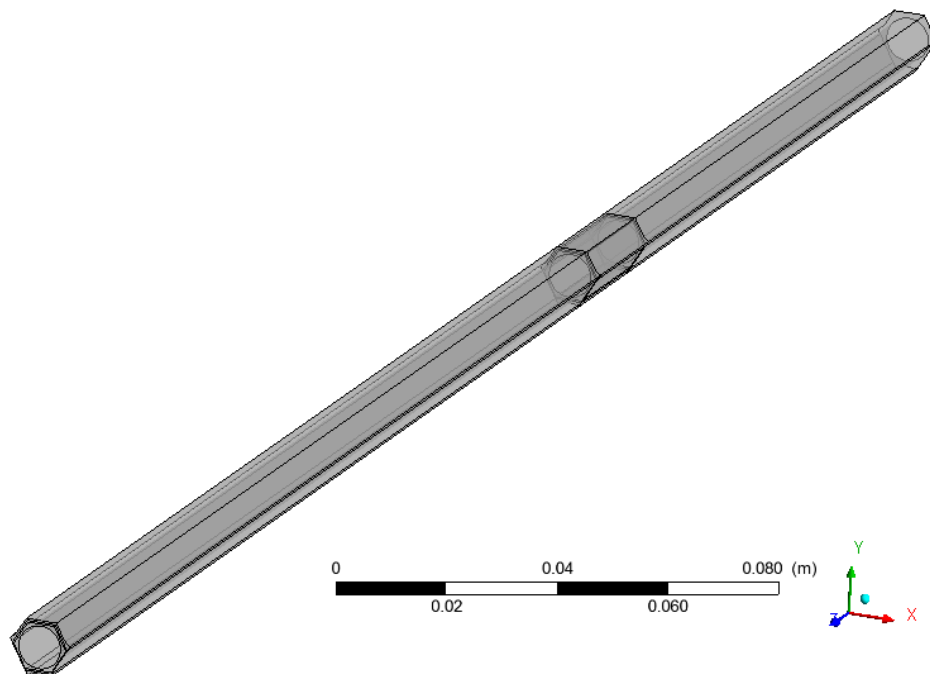
A generált háló tulajdonságai:

- Elemek száma: 2.692.613 db,
- Csomópontok száma: 2.606.810 db.

4.7. A megépített CFD modellek bemutatása

A távtartó geometriák megépítése után magát a CFD modellt kellett összeállítani. Ehhez az ANSYS CFX-Pre 14.5 programot használtuk.

Első lépésként be kellett olvasni a három szükséges hálót: a bevezető szakaszét, a távtartórácsét és a kivezető szakaszét (lásd: 4-45. ábra).



4-45. ábra: Az összeállított CFD modell geometriája

Ez után be kellett állítani az anyagi jellemzőket, a peremfeltételeket, kezdeti feltételeket, az iterációk számát, leállítási feltételként a reziduális értékeket, a turbulencia modellt, a referencia nyomást, a turbulens és az advekción tagok sémáit, az analízis típusát, monitor pontokat és az ezekben monitorozott értékeket (ezeknek a számítás futása alatt volt szerepe). A számításokhoz összesen 12 modell készült, melyeknél ezen paraméterek legtöbbje megegyezett, éppen ezért először a modellek közötti különbségeket szeretném kiemelni, és csak ez után ismertetni a pontos beállításokat.

A 12 modell között három fő különbség van. Az első a geometria; mindegyik távtartó geometriához 4-4 számítási modell készült. Az azonos geometriákhoz tartozó modellek közötti különbség elsősorban az alkalmazott turbulencia modell.

Az analízis típusa lehet *steady state* (állandó állapotú) vagy *transient* (tranzien). Steady state esetben a modell nem veszi figyelembe az időfüggő tagokat a megoldott egyenletekben, ennél fogva nem tart annyira sokáig, mint egy tranziens számítás. Az adott geometriához tartozó négy számítási modell közül három steady state volt, egy pedig tranziens.

A turbulencia modellek közül az alábbiakkal dolgoztunk:

- **k- ϵ** : ez egy elsőrendű, ϵ bázisú, robosztus, jól konvergáló turbulencia modell, mely nagyjából helyes áramképet ad vissza, azonban csak izotróp turbulenciával dolgozik. A modell általában megfelelő a legtöbb esetben, azonban ha például határréteg leválás van, másik modellt kell alkalmazni [2].
- **SST (Shear Stress Transport)**: a modell sokkal jobb fal melletti felbontást eredményez mint a k- ϵ modell, ezért pontos határréteg számításokhoz alkalmazható (repülőgép aerodinamikai számításokhoz fejlesztették ki, ahol a k- ϵ modell túl optimista becsléseket adott, mely a mérnöki gyakorlatban nem megengedhető). ω bázisú modell [2].
- **SSG Reynolds Stress**: az előző kettővel ellentétben ez már egy másodrendű turbulencia modell, mely sokkal pontosabb, azonban matematikailag sokkal komplexebb, vagyis sokat veszít a robosztusságából (míg a k- ϵ és SST modellek két egyenlettel dolgoznak, addig az SSG modell további 6 transzport egyenletet tartalmaz). ϵ bázisú Reynolds feszültség turbulencia modell [2].
- **BSL (Baseline) Reynolds Stress**: szintén másodrendű turbulencia modell, azonban az SSG modellel ellentétben a BSL modell ω bázisú, mely a határréteg leválás pontosabb megbecsülését teszi lehetővé. Anizotróp turbulenciával dolgozik [2].

Mindhárom geometria esetén először a k- ϵ turbulencia modellt alkalmazó számításokat futtattuk le, steady state esetre, a modell jó konvergáló képessége és robosztussága miatt. Az így kapott számítási eredményeket felhasználva kezdeti feltételként végeztük a következő számítást az SST modellel, szintén steady state esetre. Az SST modellel végzett számítások eredményeit szintén kezdeti feltételként használtuk fel az SSG modelles számításhoz, még mindig steady state esetre. Végül lefuttattuk a számítást a BSL turbulencia modellel is, a kezdeti feltételeket az SSG modell számítási eredményeiből véve, azonban a számítás típusa itt már tranziens volt. Az így kapott eredményeket tekintettük végső eredményeknek, melyek kiértékelését a 6. fejezetben fogom ismertetni.

A 12 modell többi paramétere megegyezett, ezeket az alábbiakban ismertetem.

Anyagjellemzők:

A modellben egyetlen anyag, az SCW (Supercritical water) szerepelt (mivel a határoló falaknak nem kell anyagjellemzőket adni). Mivel ilyen anyag nincs a beállítások között, ezért nekünk kellett létrehozni azt az IAPWS (International Association for the Properties

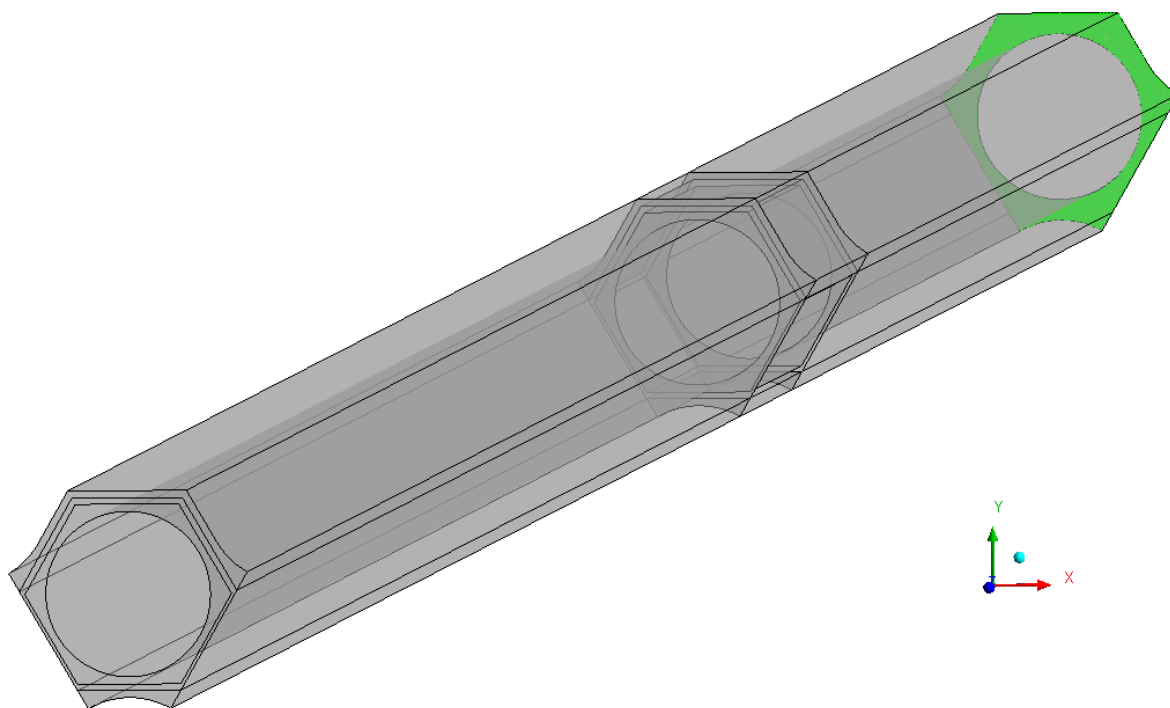
of Water and Steam) könyvtárból. Mivel az A1-es izotermikus esettel dolgoztam (a peremfeltételeket lásd 2-1. táblázat) az értékgenerálást csak az ott szereplő értékek körül adtuk meg (10-100 °C és 240-260 bar), 2000 pontban, az extrapolációt megengedve a hőmérsékletértékekre és a nyomásértékekre is. A folyadék hőmérséklete az A1 esetben ismertetett 24,2 °C. Ebben az esetben az anyagi jellemzők táblázatos megadásával csupán a nyomásfüggésüket akartuk modellezni, amely az irodalom alapján ([3], [4]) bizonyos körülmények között fontos lehet.

Referencia nyomás:

Referencia nyomásnak 25 MPa-t vettünk fel, mert az A1-es esetben ennyi a belépő közeg nyomása is.

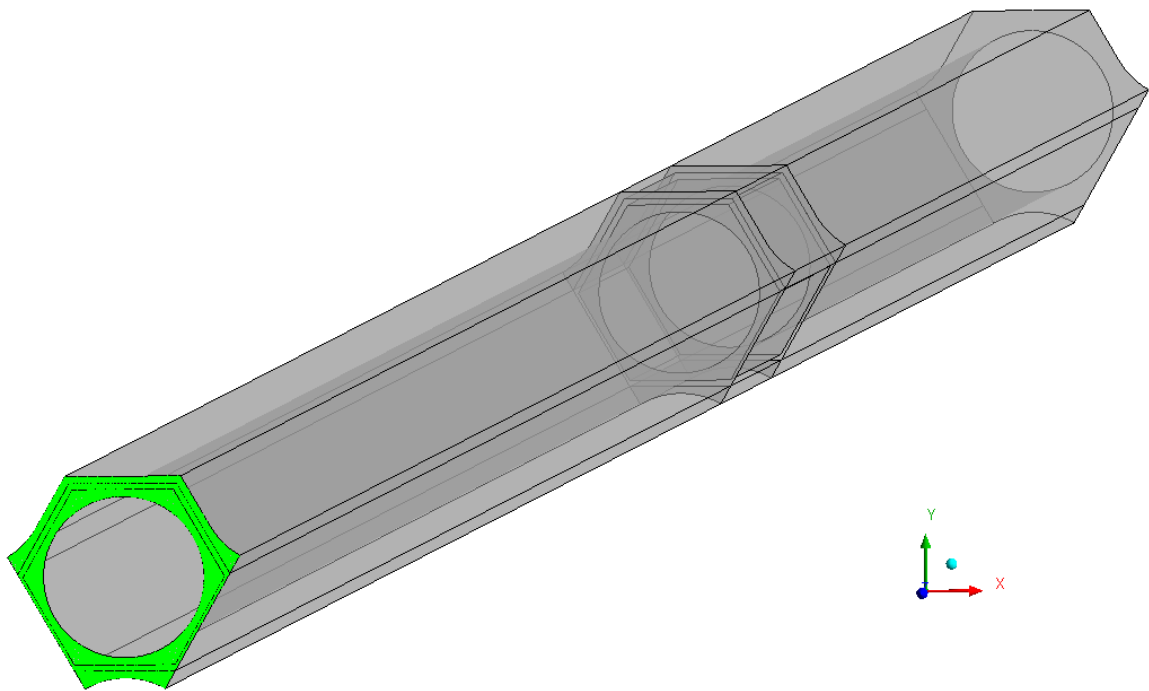
Peremfeltételek:

- Inlet: belépési peremfeltételnek tömegáramot adtunk meg. Az A1-es esetre ismert a tömegáram az egész geometriára, ezt elosztottuk 6-al, hogy megkapjuk a tömegáramot a geometria 1/6-ára. Így peremfeltételnek 0,0730345 kg/s értéket állítottunk be (lásd 4-46. ábra).



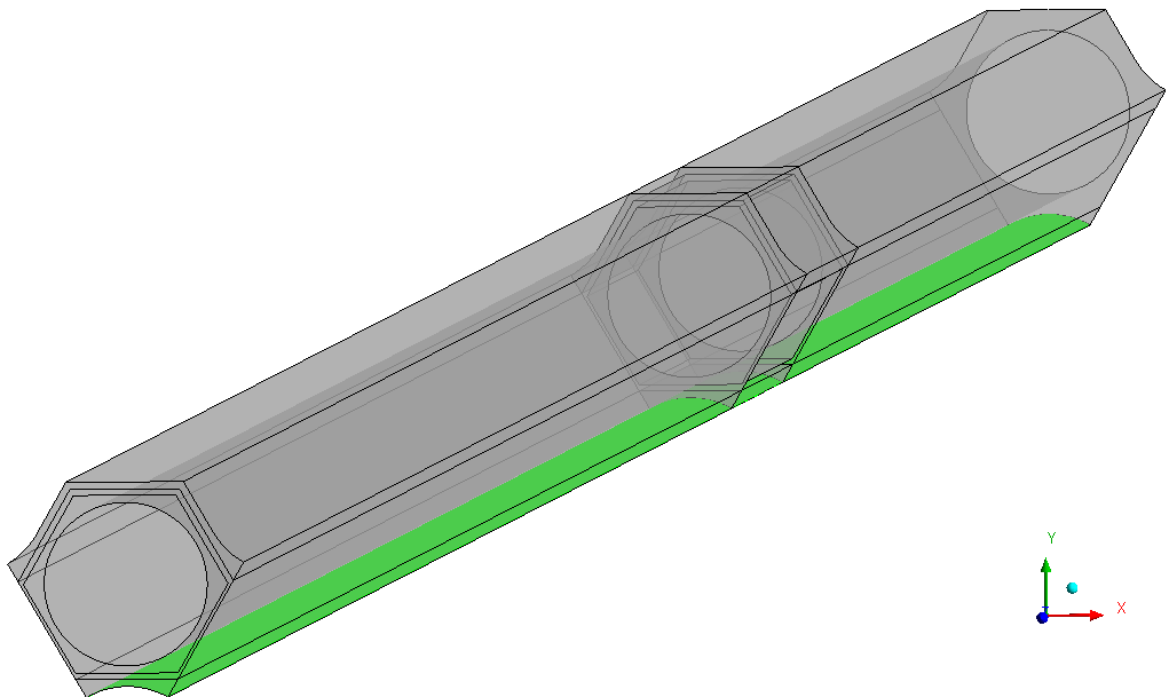
4-46. ábra: Inlet

- Outlet: kilépési peremfeltételnek relatív nyomást adtunk meg, melynek értéke 0 Pa (lásd 4-47. ábra).

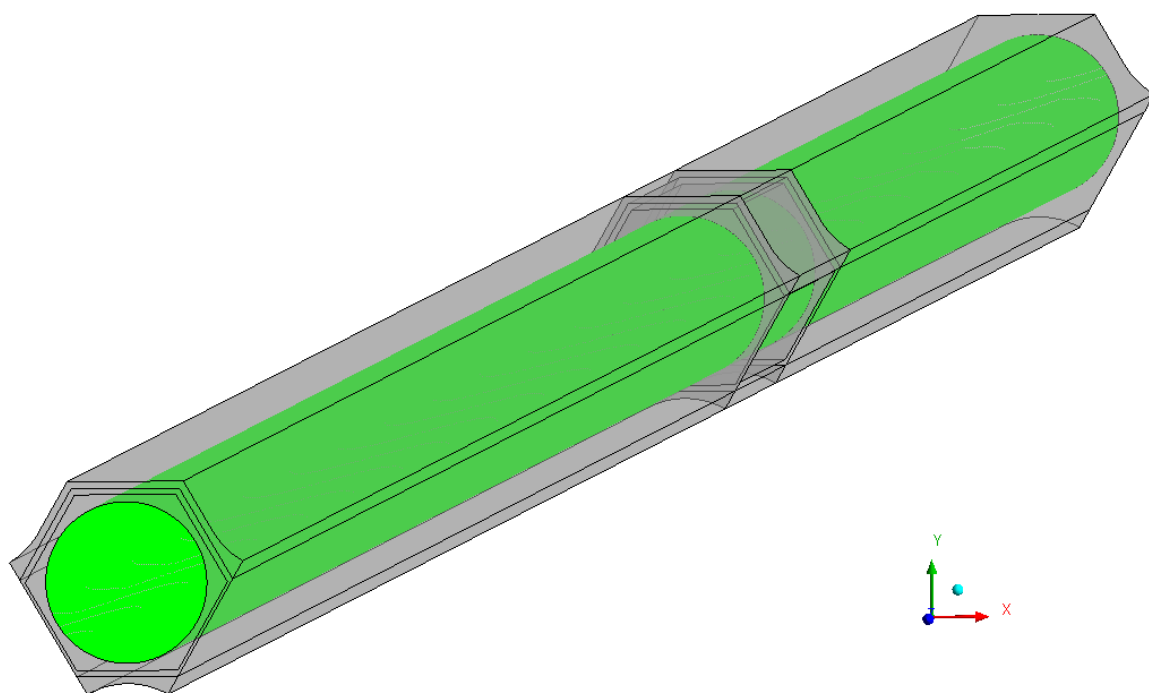


4-47. ábra: Outlet

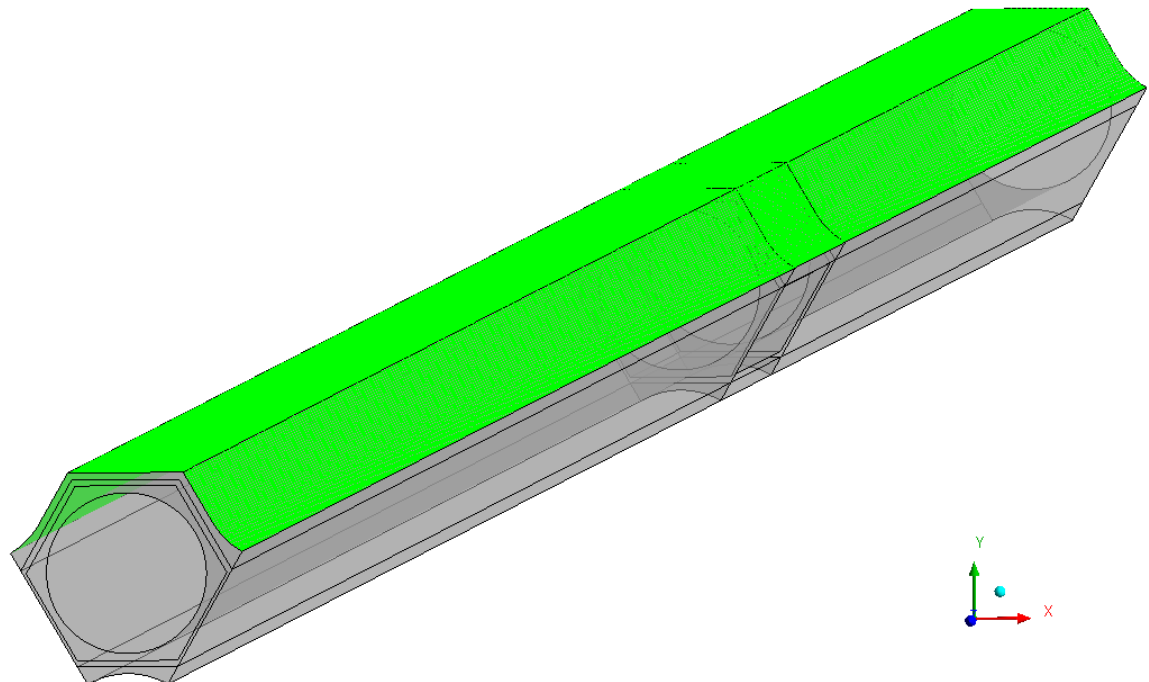
- Adiabatikus falak: a falak esetében („A” és „C” fűtőelem pálcák falai (4-48. ábra és 4-49. ábra), a mért szakasz burkolata (4-50. ábra), valamint a távtartó (4-51. ábra)) „No-slip wall” peremfeltételt alkalmaztunk, vagyis közvetlenül a falnál a folyadék sebessége 0 a falhoz képest.



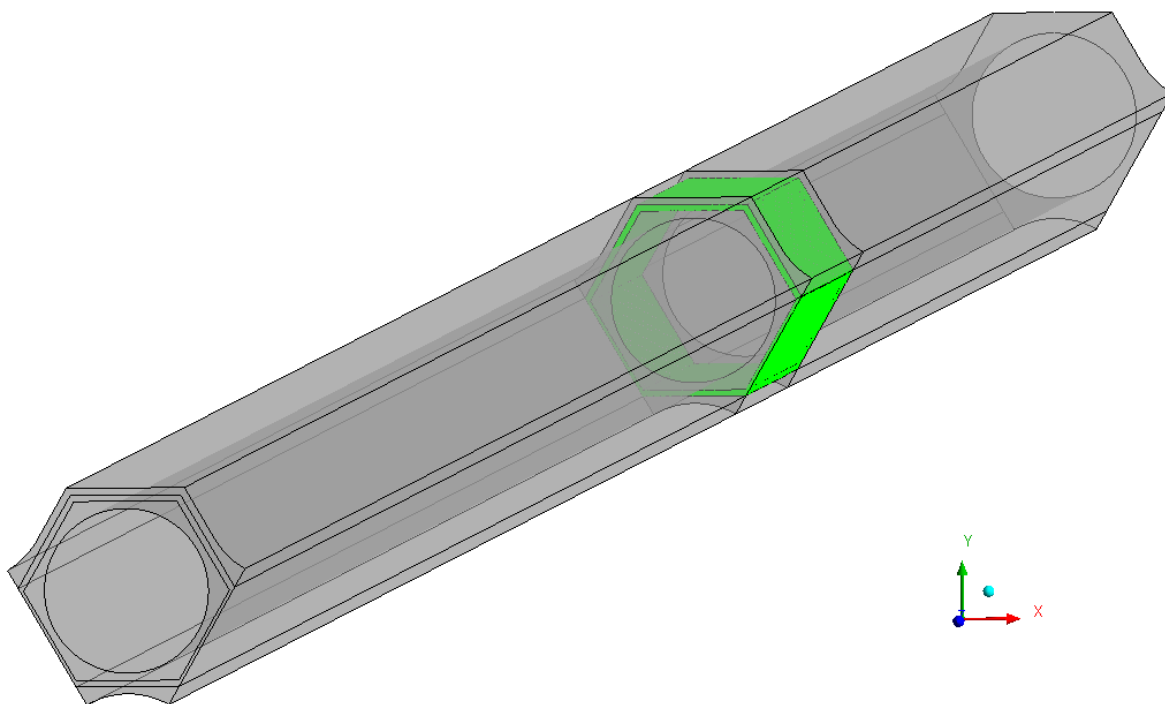
4-48. ábra: "A" fűtőelem fala



4-49. ábra: "C" fűtőelem fala

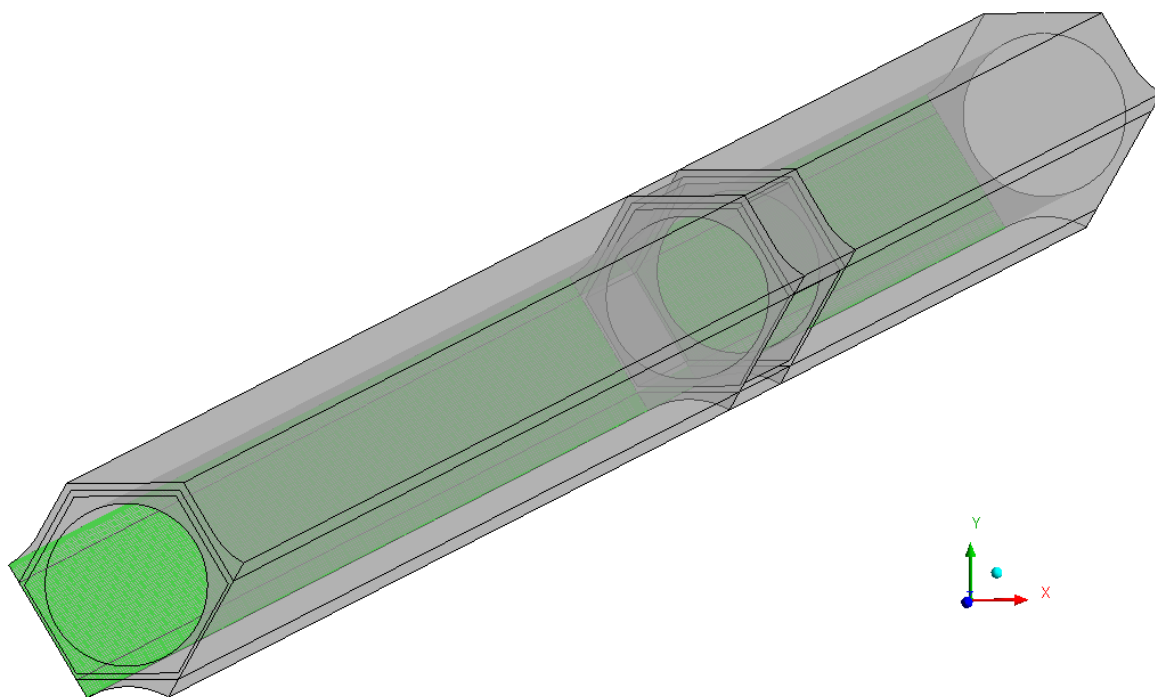


4-50. ábra: Mért szakasz burkolata

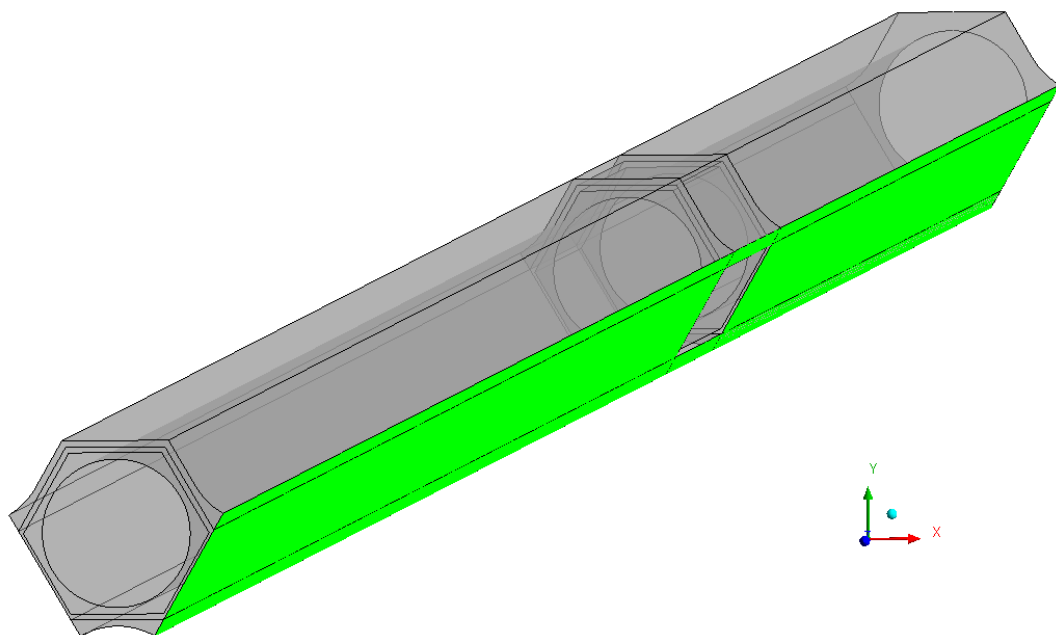


4-51. ábra: Távtartó fal

- Szimmetria peremfeltétel: a geometria két oldalára szimmetria peremfeltételt helyeztünk el (4-52. ábra és 4-53. ábra).



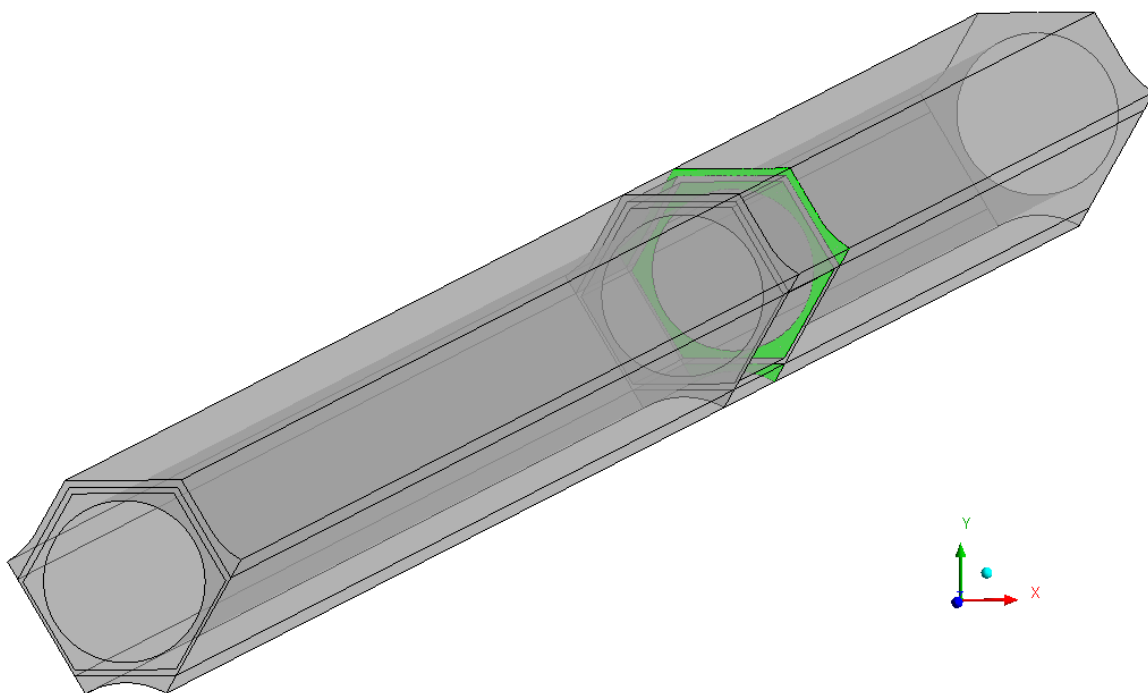
4-52. ábra: Első szimmetria perem



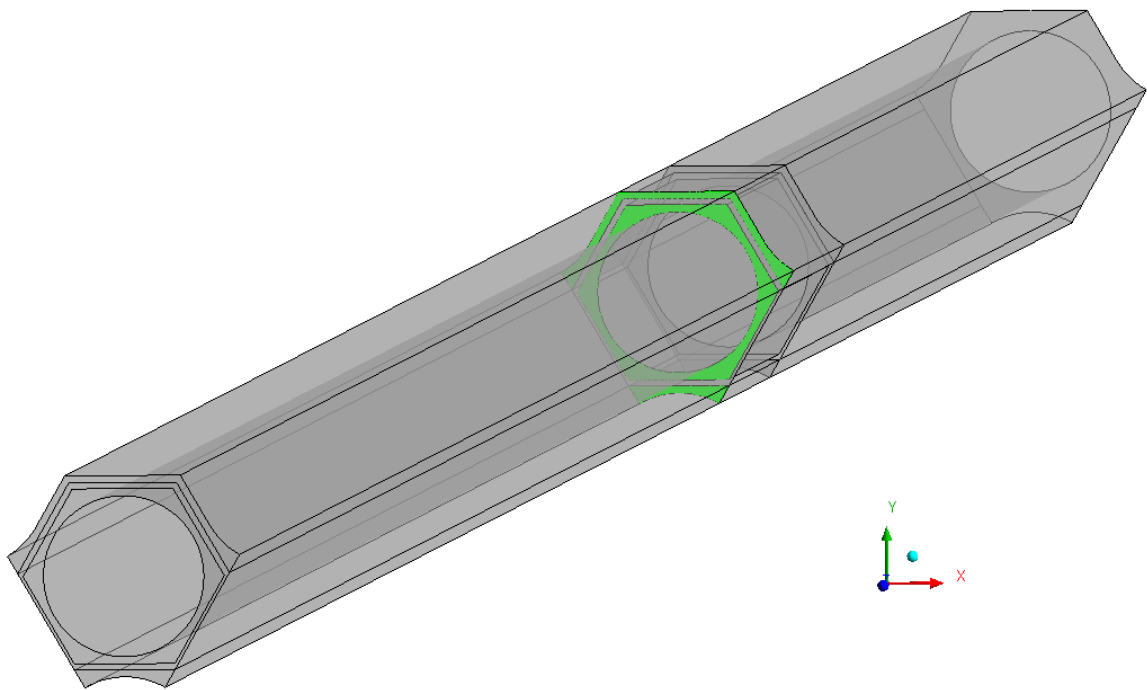
4-53. ábra: Második szimmetria perem

Interface-k:

Mivel a geometria 3 különböző részből (bevezető szakasz, távtartó geometria, kivezető szakasz) áll, ezért az egyes részek határain biztosítani kell a megfelelő összeköttetést, amit interface alkalmazásával tehetünk meg (lásd 4-54. ábra és 4-55. ábra). GGI típusú (General Grid Interface) interfészt használtunk.



4-54. ábra: P1 és P2 közti interface



4-55. ábra: P2 és P3 közti interface

Iterációk száma:

Az iterációk számát minimum 200-ra és maximum 2000-re állítottuk be.

A turbulens és advekciós tagok numerikus sémája:

Mindkét esetben az úgynevezett *High Resolution* másodrendű sémát alkalmaztuk.

Analízis típusa:

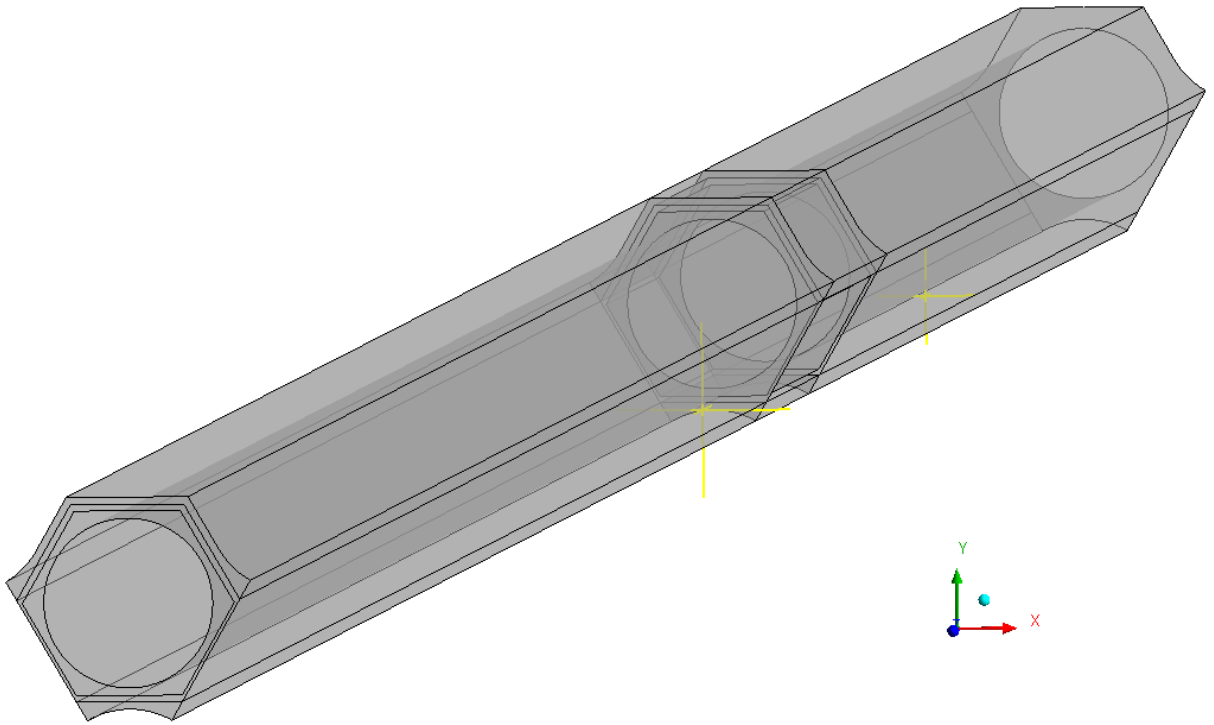
A tranziens esetben a teljes eltelt idő 0,2 s, az időlépések nagysága pedig 0,001 s.

Reziduális értékek:

Reziduális célértéknek 10^{-6} -ont állítottunk be. Ez azt jelenti, hogy futás közben a program vizsgálja, hogy mennyire konvergál a számítás, és ha eléri a beállított reziduális értéket, a számítás automatikusan leáll (feltéve, hogy a minimálisan beállított iterációk számát már elérte a számítás).

Monitor pontok:

A modellben két monitor pontot vettünk fel, az első a $(0; 0,00425; 0,075)$, a másodikat a $(0; 0,00425; 0,18)$ pontban (lásd 4-56. ábra). A két ponton monitoroztuk a hőmérséklet, nyomás, turbulens kinetikus energia és sebesség értékeket.



4-56. ábra: Monitor pontok pozíciói

Megjegyzés a modellek elnevezéséhez: mivel itt már nem külön-külön a távtartó geometriákról, hanem a teljes megépített modellekről beszélünk, fontos, hogy megkülönböztessük a kettőt.

- A P2-0 távtartó geometriát tartalmazó modell: Sp0 (Sp mint *spacer*)
- A P2-1 távtartó geometriát tartalmazó modell: Sp1
- A P2-2 távtartó geometriát tartalmazó modell: Sp2

Pár szó a számítások futtatásáról:

A számításokat egy tanszéki PC-n végeztük el, melynek paraméterei a következők:

- Core i5-2500 CPU @3,30 GHz,
- 16 GB RAM,

- 64 bit-es Windows 7 operációs rendszer,
- AMD Radeon HD 6700 Series.

A számítások futása 4 szálon történt, a számítási időket a 4-1. táblázat mutatja.

4-1. táblázat: A BSL tranziens számítások futási ideje

Számítás	Futási idő
Sp0, BSL, tranziens	16 h, 28 min, 46 s
Sp1, BSL, tranziens	14 h, 11 min, 56 s
Sp2, BSL, tranziens	14 h, 17 min, 20 s

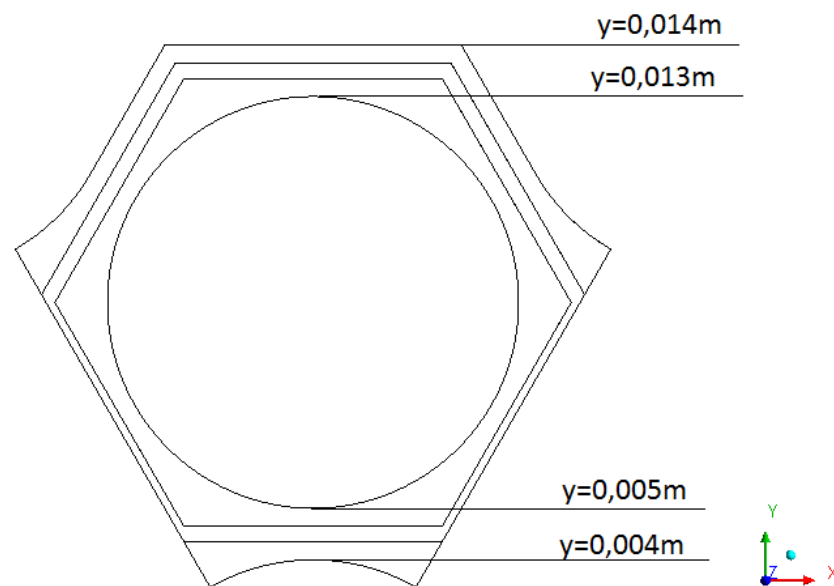
5. A KAPOTT EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

Ebben a fejezetben a három különböző részletességű távtartó geometriával megépített CFD modellek eredményeit mutatom be.

5.1. Az eredmények kiértékelése

A 12 számításból csak a három BSL Reynolds Stress turbulencia modellel elvégzett, tranziens számítás eredménye került kiértékelésre. Az adatok kigyűjtéséhez az Ansys CFX saját script nyelvét használtam, a manuális adatgyűjtés ugyanis nagyon sokáig tartott volna.

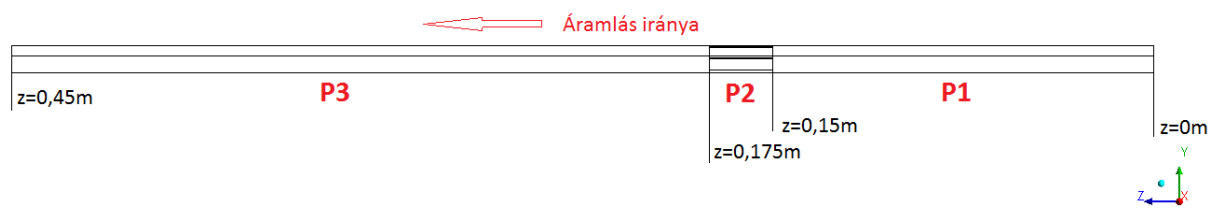
A script segítségével $y = 0,004$ m-től $y = 0,005$ m-ig és $y = 0,013$ m-től $y = 0,014$ m-ig 0,02 mm-es lépésközzel vettem ki adatokat (lásd 5-1. ábra).



5-1. ábra: Adatkivétel y mentén

Az axiális (z) irányú lépések a következőképpen alakultak (lásd 5-2. ábra):

- $z = 0$ mm és $z = 100$ mm között 20 mm-es lépésköz
- $z = 100$ mm és $z = 140$ mm között 10 mm-es lépésköz
- $z = 140$ mm és $z = 180$ mm között 5 mm-es lépésközzel
- $z = 180$ mm és $z = 450$ mm között 10 mm-es lépésközzel



5-2. ábra: Adatkivétel a z tengely mentén

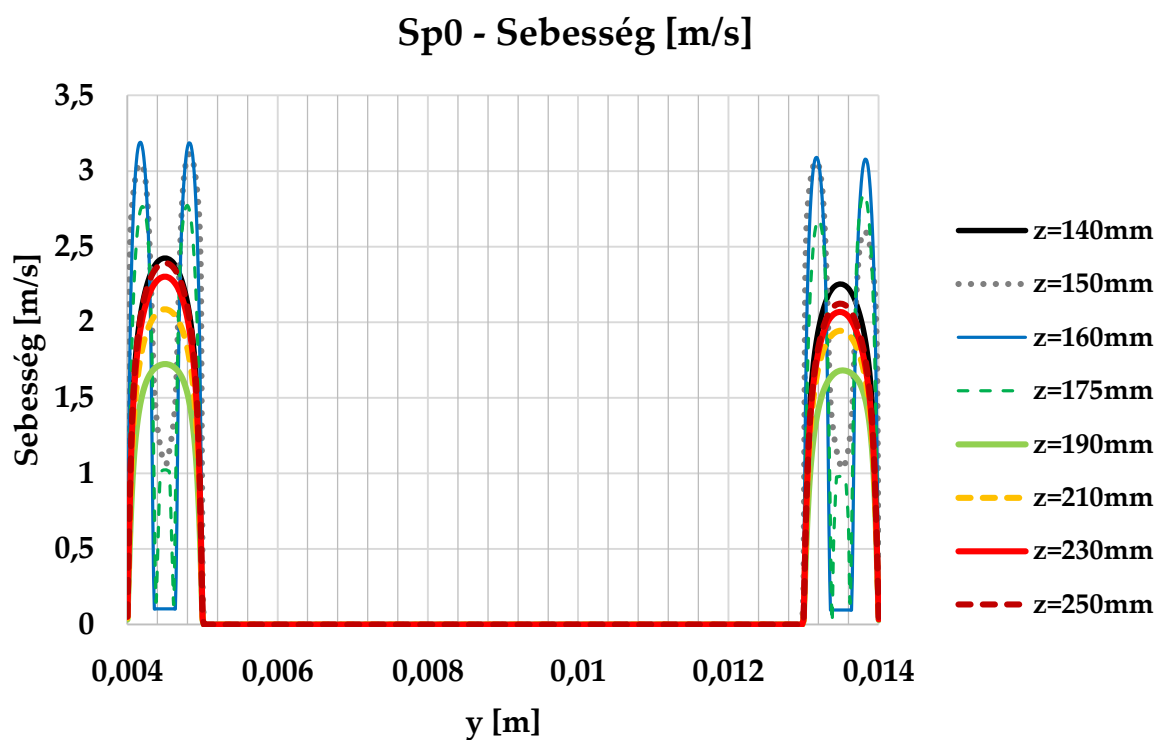
A kivett adatok a következők voltak:

- Sebesség (Velocity)
- Sebesség u irányú komponense (Velocity u)
- Sebesség v irányú komponense (Velocity v)
- Sebesség w irányú komponense (Velocity w)
- Fali nyírófeszültség (Wall shear)
- Turbulens kinetikus energia (Turbulent kinetic energy)
- Sebesség abszolút helicitása (Velocity.Absolut Helicity)
- Sebesség állandó Q (Velocity.Invariant Q)
- Nyomás (Pressure)
- Reynolds feszültség uu komponense (Reynolds Stress uu)
- Reynolds feszültség uv komponense (Reynolds Stress uv)
- Reynolds feszültség uw komponense (Reynolds Stress uw)
- Reynolds feszültség vv komponense (Reynolds Stress vv)
- Reynolds feszültség vw komponense (Reynolds Stress vw)
- Reynolds feszültség ww komponense (Reynolds Stress ww)

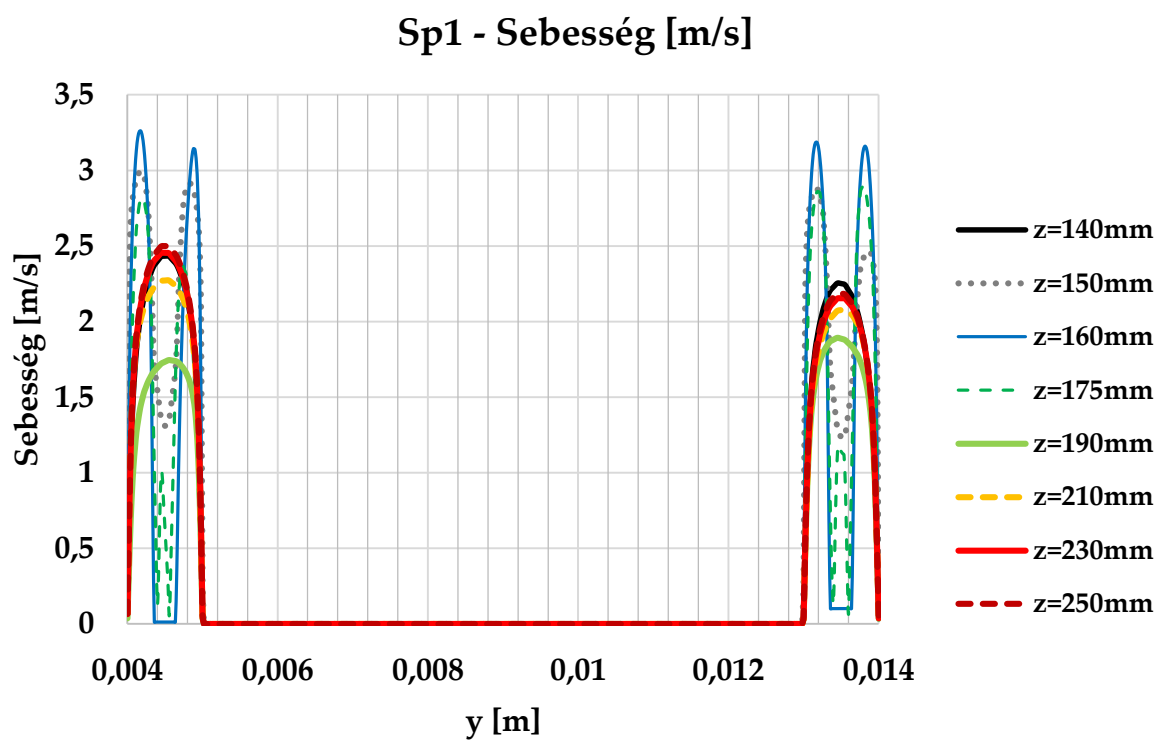
Ez nagyon sok adat, azonban ezek közül nem kerül minden kiértékelésre a továbbiakban.

5.2. A sebességprofilok vizsgálata

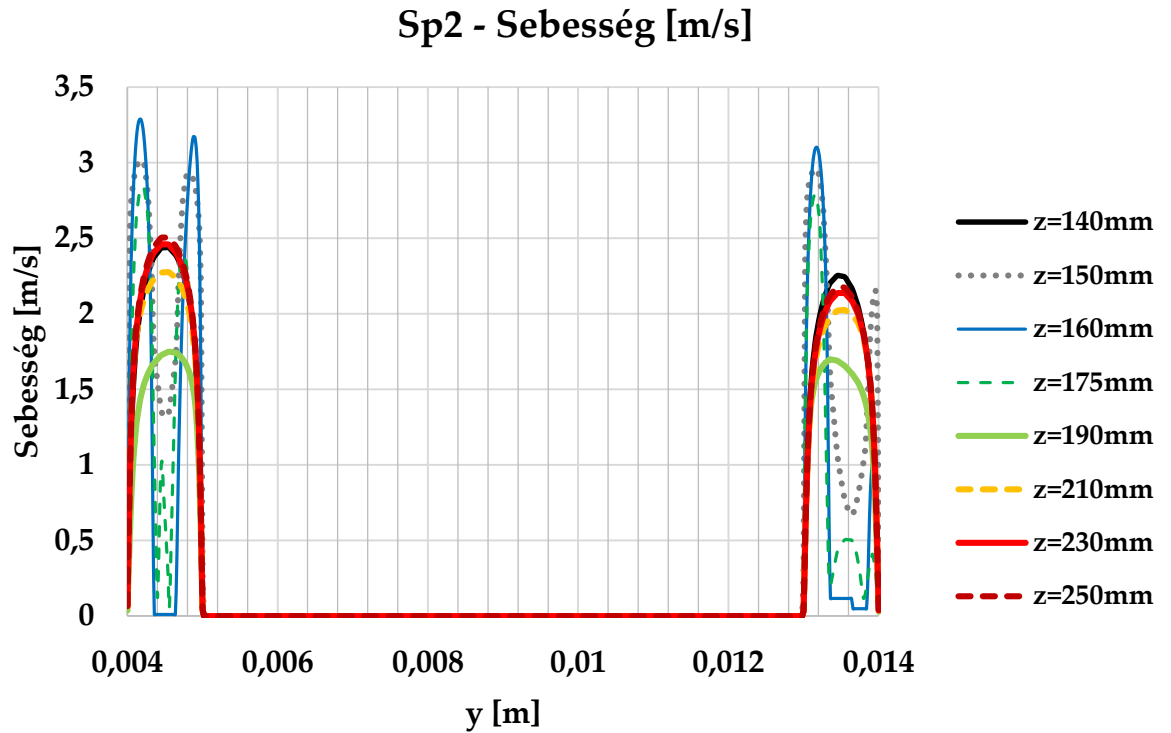
A változók különböző axiális pozícióból kivett eloszlásainak az összehasonlításával a távtartó áramlásra gyakorolt hatása vizsgálható. Ez legjobban a sebesség és turbulens kinetikus energia eloszlásaival szemléltethető.



5-1. diagram: y menti sebességeloszlás Sp0 távtartó geometria esetén



5-2. diagram: y menti sebességeloszlás Sp1 távtartó geometria esetén



5-3. diagram: y menti sebességeloszlás Sp2 távtartó geometria esetén

Az 5-1. diagram, 5-2. diagram és 5-3. diagram mutatja a sebesség y menti eloszlását az Sp0, Sp1 és Sp2 esetekre. A legelső, $z = 140$ mm menti eloszlás egy jól kialakult, turbulens sebességprofil mutat az alsó ($y = 0,004$ m-től $y = 0,005$ m-ig) és felső ($y = 0,013$ m-től $y = 0,014$ m-ig) szubcsatornában, ezért ezt vesszük alap sebességprofilnak.

A távtartó $z = 150$ mm-nél kezdődik, itt az alsó és felső sebességprofilok szétesnek, a $z = 160$ mm-hez és $z = 175$ mm-hez tartozó profiloknál megfigyelhető, hogy a távtartó miatt leszűkülő (és két részre esett) keresztmetszetű szubcsatornában az áramlás sebessége megnő, ahogy az a kontinuitási egyenletből (5.1) következik.

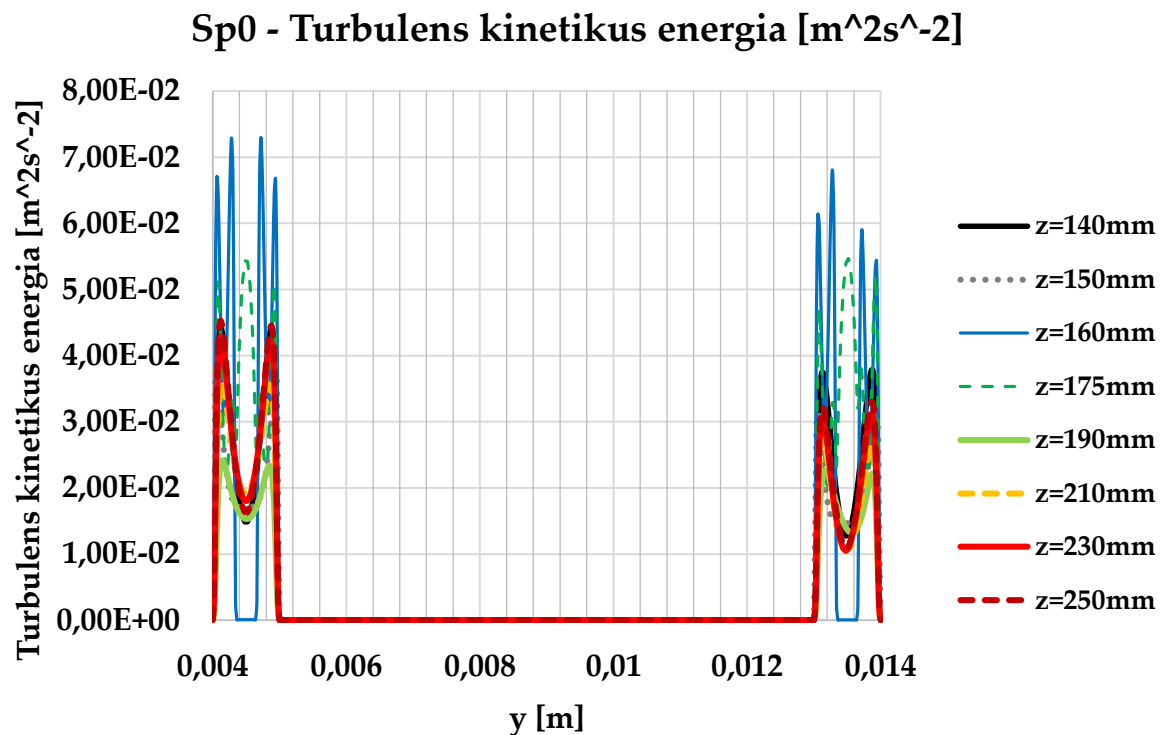
$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (5.1)$$

A $z = 190$ mm-hez tartozó sebességprofilnál megfigyelhető a távtartó okozta két csúcs eltűnése. A $z = 210$ mm-hez tartozó sebességprofil már megközelíti az eredeti,

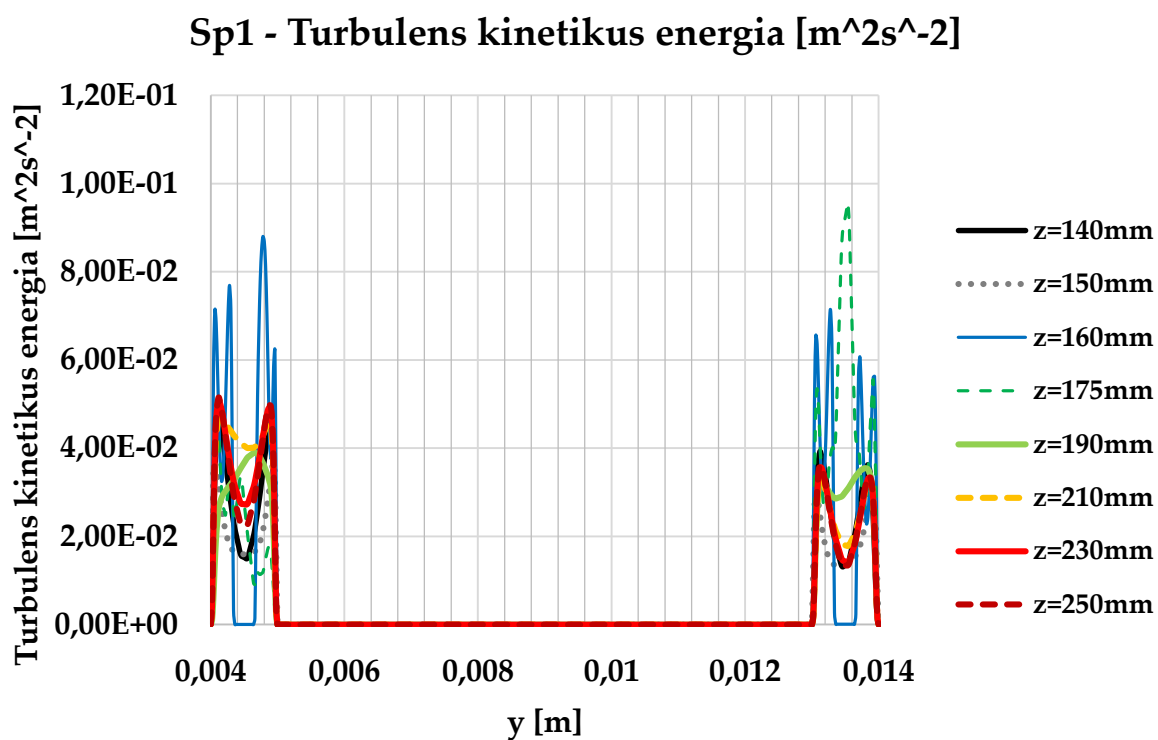
$z = 140$ mm-hez tartozó profilt, $z = 250$ mm-nél pedig már szinte alig figyelhető meg különbség a $z=140$ mm-es alap profilhoz képest.

Ez alapján elmondható, hogy a távtartó hatására megváltozott sebességprofil nagyjából 75 mm alatt nyeri vissza eredeti, a zavartalan áramláshoz tartozó alakját.

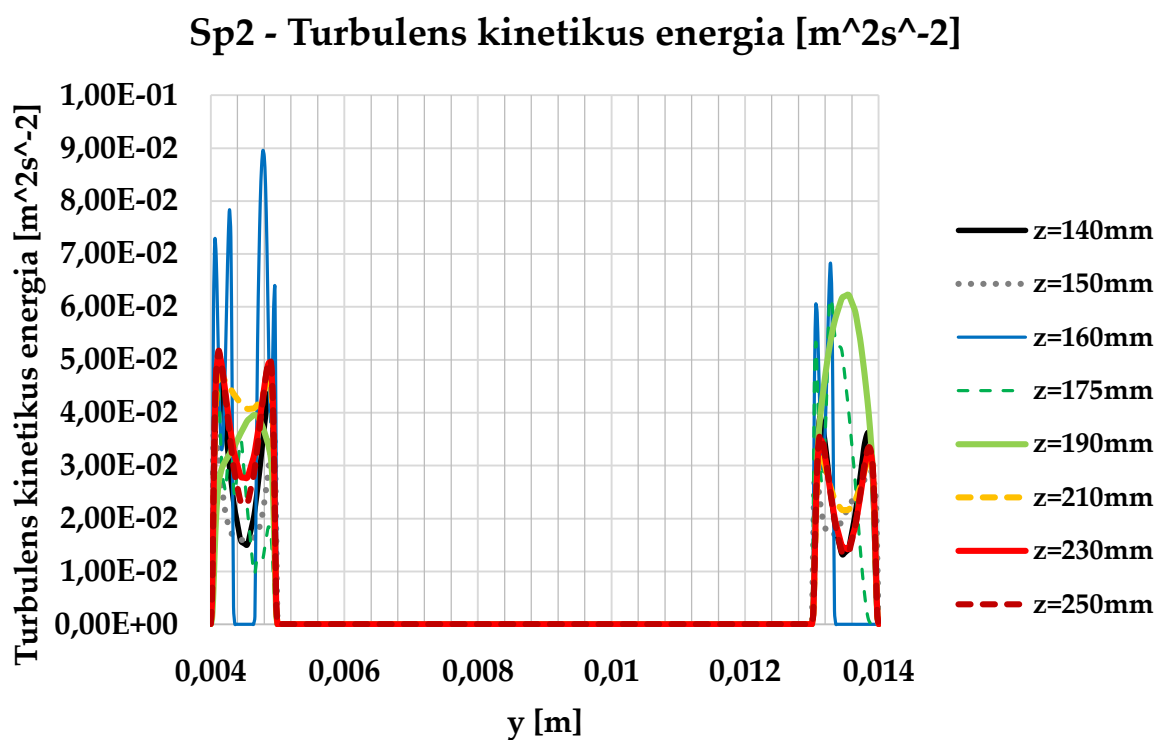
5.3. Turbulens kinetikus energia profilok vizsgálata



5-4. diagram: y menti turbulens kinetikus energia eloszlás Sp0 esetén



5-5. diagram: y menti turbulens kinetikus energia eloszlás Sp1 esetén



5-6. diagram: y menti turbulens kinetikus energia eloszlás Sp2 esetén

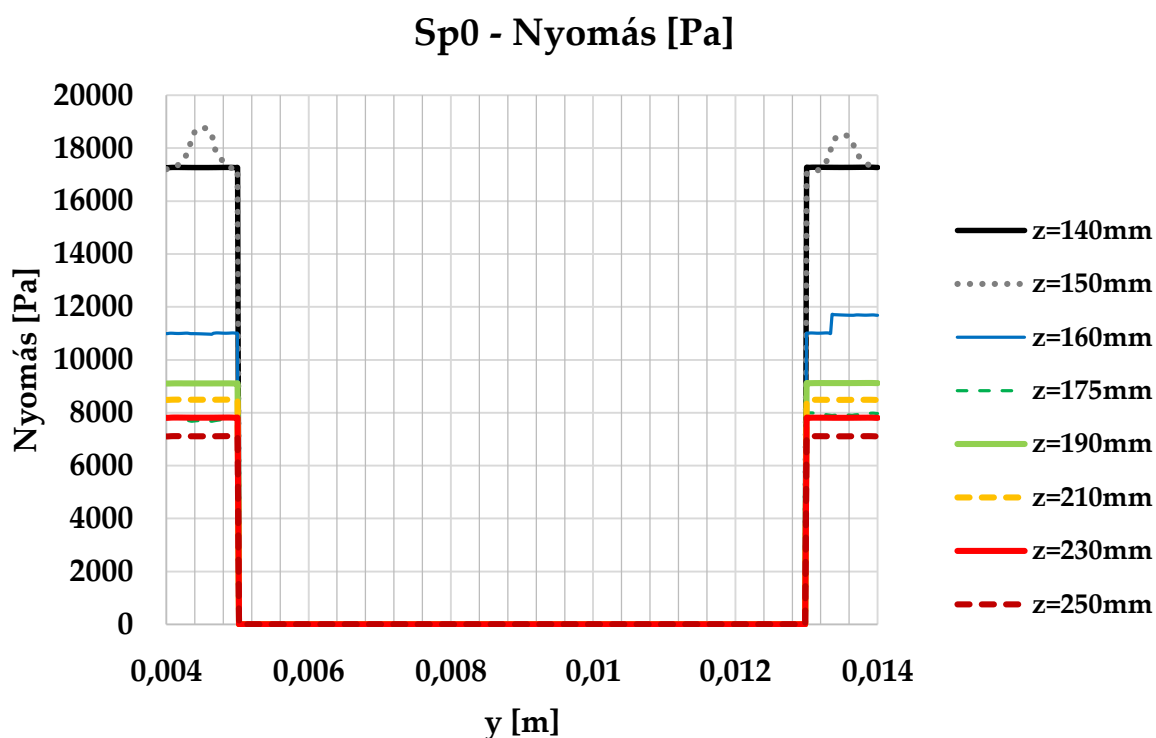
Az 5-4. diagram, 5-5. diagram és 5-6. diagram mutatja a turbulens kinetikus energia y menti eloszlását.

Akárcsak a sebességprofilok, a turbulens kinetikus energia profilok is azt mutatják, hogy a profil a távtartó elhagyása után nagyjából 75 mm múlva nyeri vissza eredeti vagy közel eredeti alakját.

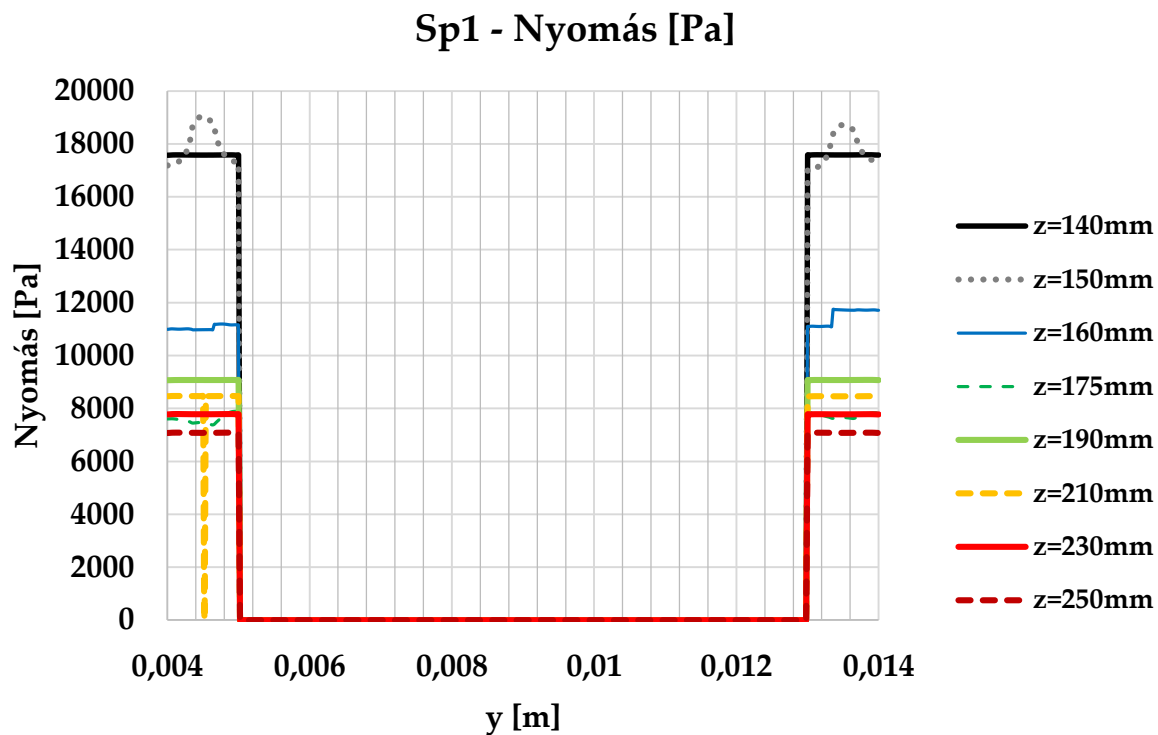
5.4. Nyomáseloszlás vizsgálata

Az 5-7. diagram, 5-8. diagram és 5-9. diagram az y menti nyomáseloszlást mutatja a három különböző modell esetén. A távtartó kezdeténél ($z = 150$ mm) kis nyomáscsúcs figyelhető meg (torlóponthi nyomás), majd ahogy a közeg belép a távtartóba egy nagy nyomásesés látható. A távtartó elhagyása után a nyomásesés mértéke is csökken, ahogy az várható volt.

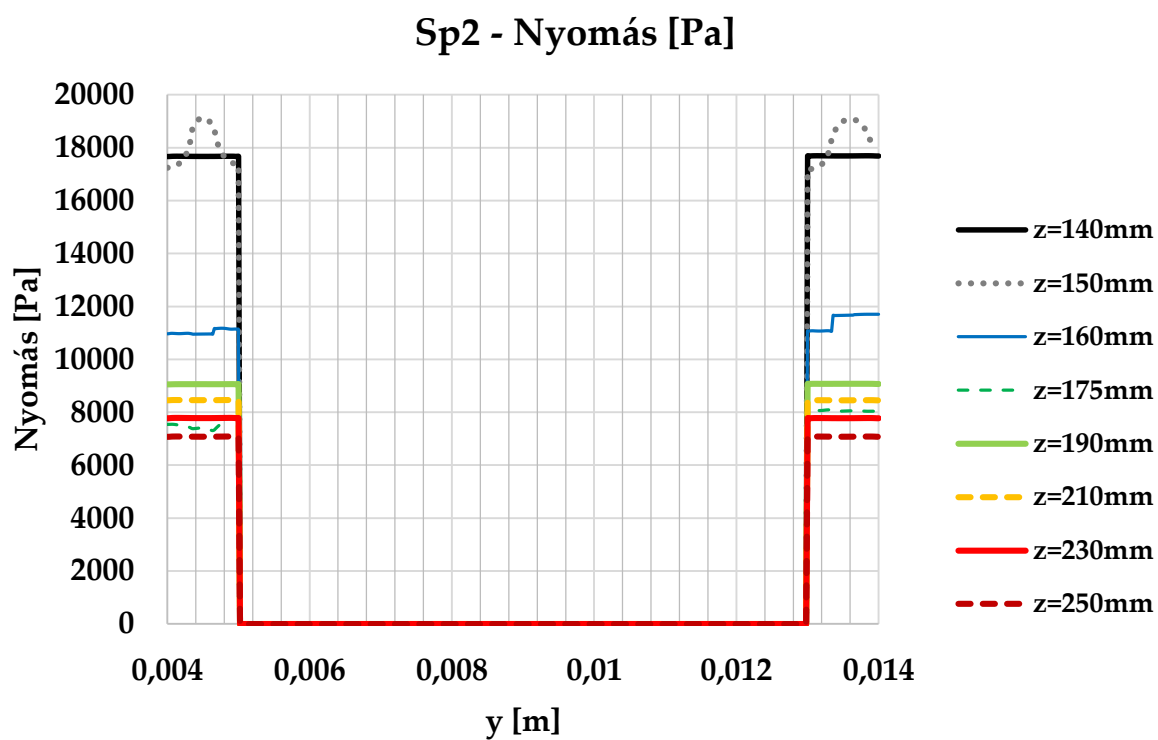
Az is megfigyelhető, hogy nyomásesés szempontjából a három különböző modell között nincs lényeges különbség, vagyis ebből a szempontból mindegy, melyik geometriát használjuk.



5-7. diagram: y menti nyomás eloszlás Sp0 esetén



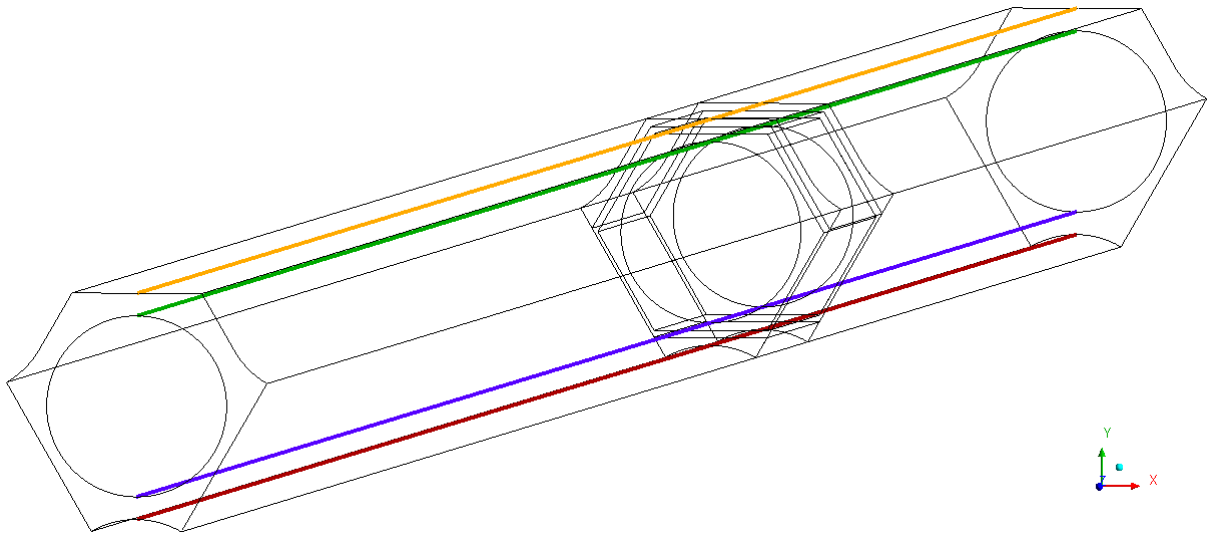
5-8. diagram: y menti nyomás eloszlás Sp1 esetén



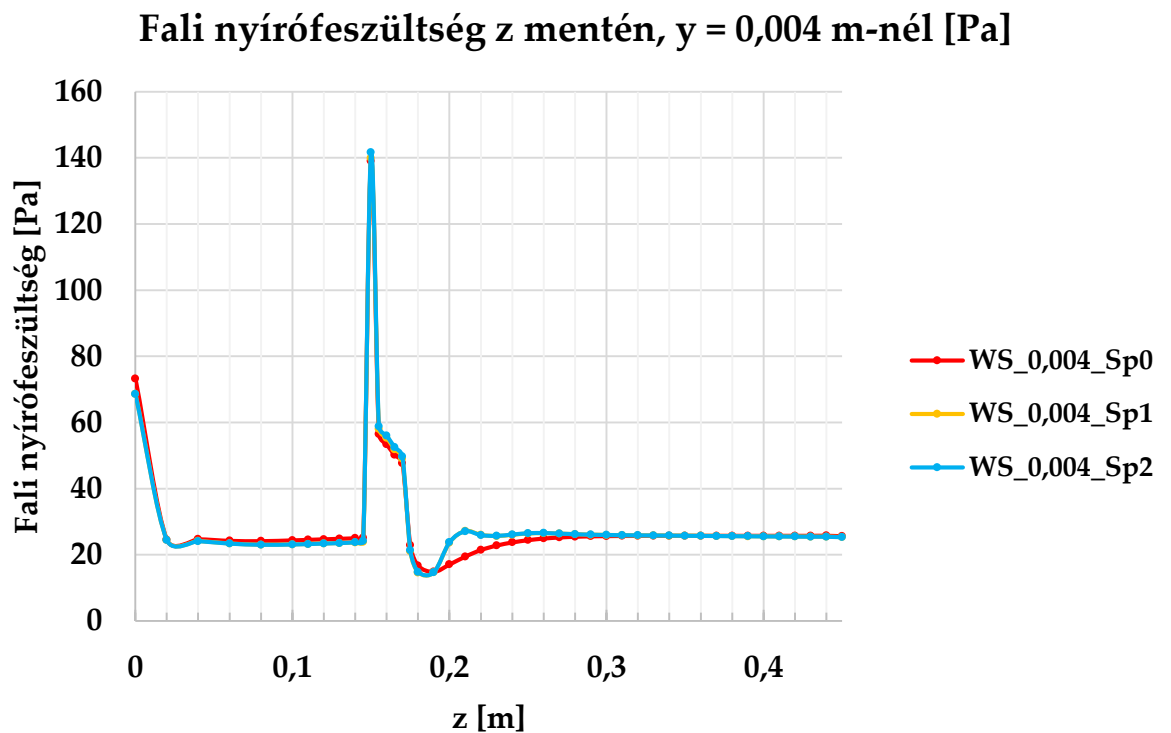
5-9. diagram: y menti nyomás eloszlás Sp2 esetén

5.5. Fali nyírófeszültség vizsgálata

A fali nyírófeszültség értékeket az 5-3. ábra: A fali nyírófeszültség adatok kivételi helyei 5-3. ábra látható vonalak mentén vettem ki.

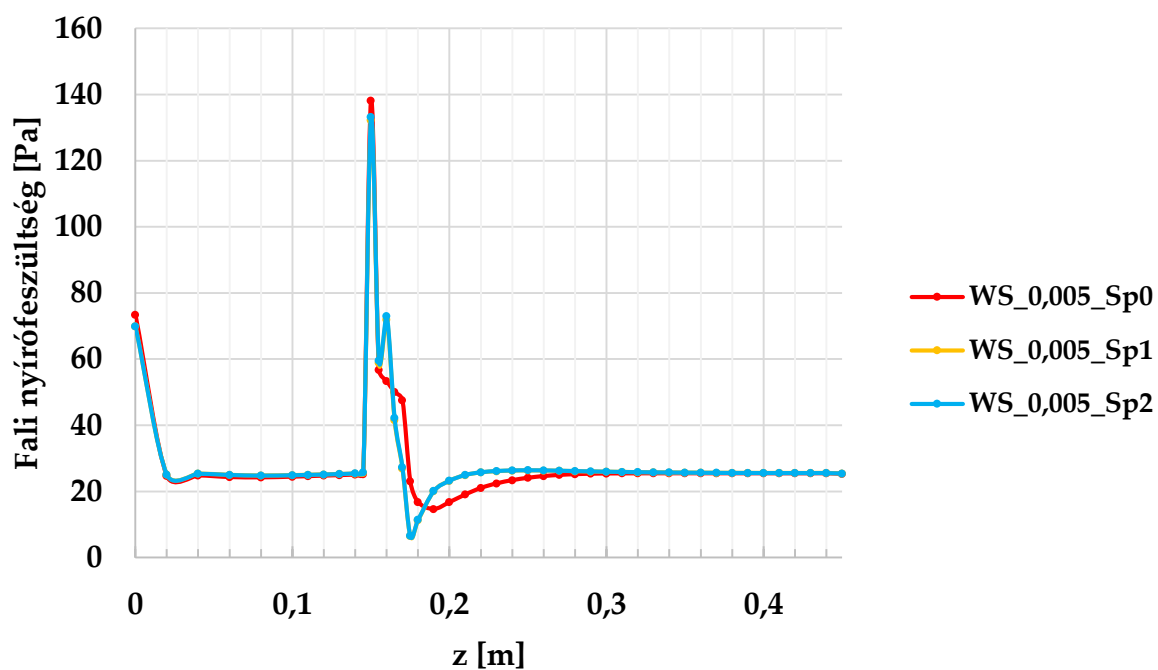


5-3. ábra: A fali nyírófeszültség adatok kivételi helyei



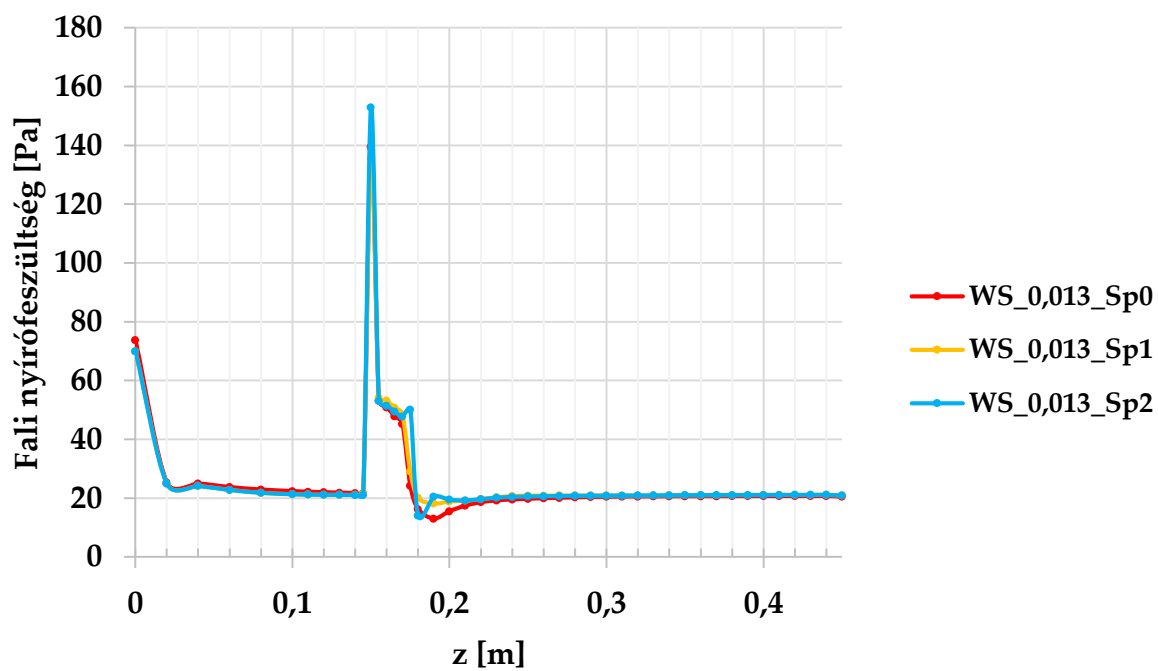
5-10. diagram: Fali nyírófeszültségek z mentén, $y = 0,004$ m-nél

Fali nyírófeszültség z mentén, $y = 0,005$ m-nél [Pa]

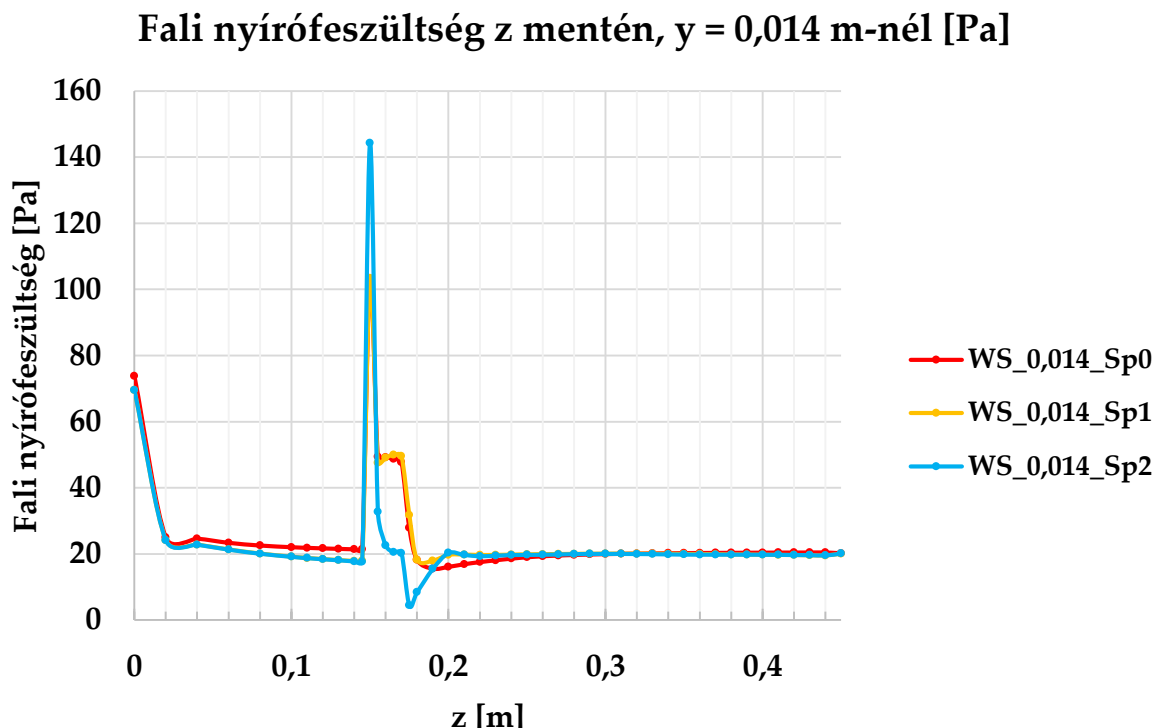


5-11. diagram: Fali nyírófeszültségek z mentén, $y = 0,005$ m-nél

Fali nyírófeszültség z mentén, $y = 0,013$ m-nél [Pa]



5-12. diagram: Fali nyírófeszültségek z mentén, $y = 0,013$ m-nél



5-13. diagram: Fali nyírófeszültségek z mentén, $y = 0,014$ m-nél

Az 5-10. diagram, 5-11. diagram, 5-12. diagram és 5-13. diagram mutatja a fali nyírófeszültség z menti eloszlását a három különböző modell esetén.

Látható, hogy a három modell esetén eltérések vannak. Az 5-10. diagramon látható, hogy a három modell között alig van különbség, azonban Sp1 és Sp2 gyakorlatilag teljesen együtt mozog. Ugyanez figyelhető meg az 5-12. diagramon, azzal a különbséggel, hogy $y = 0,013$ m-nél már Sp1 és Sp2 is minimálisan eltér egymástól. Az 5-11. diagramon már eltérés figyelhető meg az Sp0 és az Sp1-Sp2 megegyező eloszlásai között. Ennek oka, hogy az Sp1 és Sp2 esetben már ott van a három távtartó huzal, amelyek azonos eloszlást eredményeznek, ami nyilvánvalóan eltér az Sp0 huzalnélküli geometriájában kialakuló eloszlástól. Az 5-13. diagramon látható, hogy a pozicionáló elem nagy hatással van a fali nyíróerőre, ahol Sp0 és Sp1 esetén lokális maximumot látunk, ott Sp2 esetén lokális minimum van, valamint ahol Sp0 és Sp1 esetén nagyjából stabilizálódik a fali nyírófeszültség értéke, ott Sp2 esetén egy globális minimum látható.

Ez bizonyítja, hogy a geometriák közti apróbb eltérések igenis befolyásolják az áramlást.

5.6. Távtartó geometria választása az eredmények alapján

A fali nyírófeszültségek változása nagyon jól mutatja, hogy a három különböző távtartó geometria eltérő hatást gyakorol az áramlásra, továbbá a sebesség- és turbulens kinetikus energia profilok alapján megállapítható, hogy a távtartó áramlásra gyakorolt hatása nagyjából 75 mm után tűnik el; ekkorra a profil nagyjából visszanyeri a zavartalan áramláshoz tartozó profilt. Ez azt jelenti, hogy a távtartó utáni 75 mm-en belül a távtartónak van hatása az áramlásra, vagyis az itt lévő termoelemek méréseit befolyásolhatja a távtartó áramlást megzavaró hatása. Elvileg helyesebb döntést lehetett volna hozni, ha a B1 vagy B2-es fűtött esetet vizsgáljuk meg a geometriaérzékenység szempontjából. Erre a bonyolultabb és előre láthatóan időigényesebb modellezés miatt nem került sor. Maradt a gyorsabban kivitelezhető izotermikus esetre elvégzett geometriaérzékenység vizsgálat.

Összesen 7 olyan termoelem van (T7, T13, T19, T25, T38, T40 és T41 – a termoelemek elnevezésével kapcsolatban lásd 9.1-es melléklet), mely beleesik ebbe a távtartó utáni 75 mm-be, vagyis ahhoz, hogy az ezeken a pontokon mért értékek a lehető legpontosabbak legyenek, a végső számítási modellbe a legrészletesebb, vagyis a P2-2-es távtartó geometria beépítése javasolt.

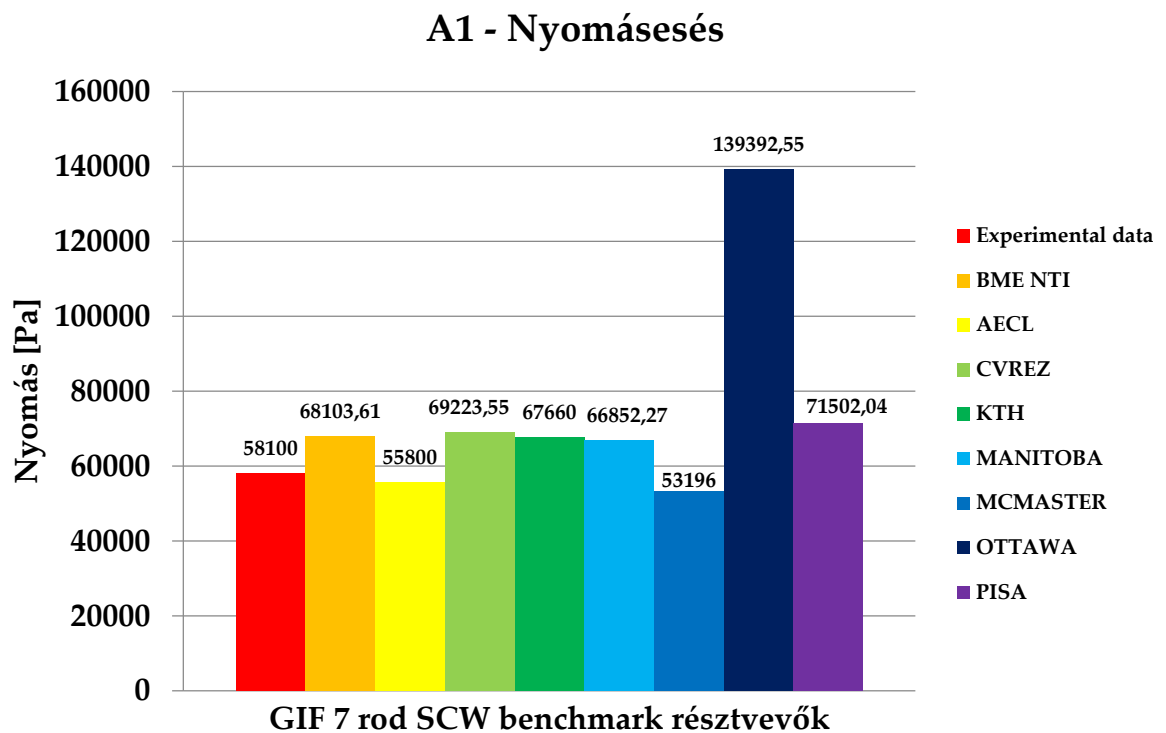
6. KÖZREMŰKÖDÉSEM A VÉGSŐ SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK KI-ÉRTÉKELÉSÉHEZ

A benchmark feladat kiszámításában összesen 10 intézmény vett részt, köztük a BME NTI is. A feladat az A1 esetre a nyomásesés meghatározása volt (2-1. táblázat), míg a B1 és B2 esetekre (2-2. táblázat) a különböző hőmérsékletek meghatározása az egyes mérési pontokban. Nem minden intézmény küldött be eredményt minden feladatra.

Feladatom a mérési eredmények és a különböző intézetek eredményeinek összehasonlítása volt.

6.1. Az A1-es eset

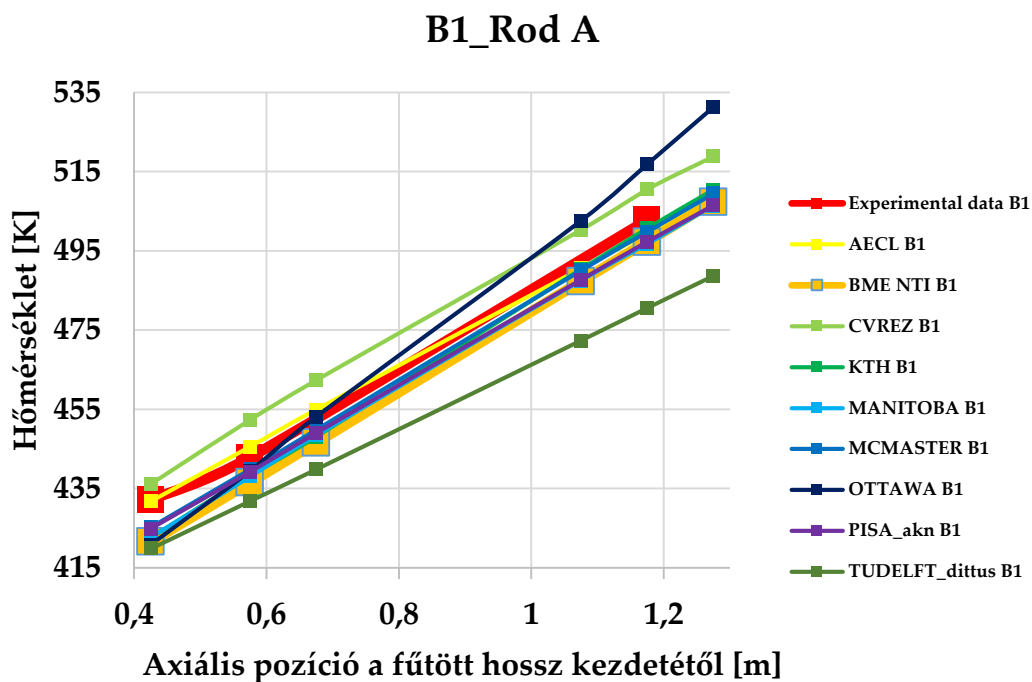
Az A1-es esetben a mérési geometriában keletkező nyomásesés meghatározása volt a cél.



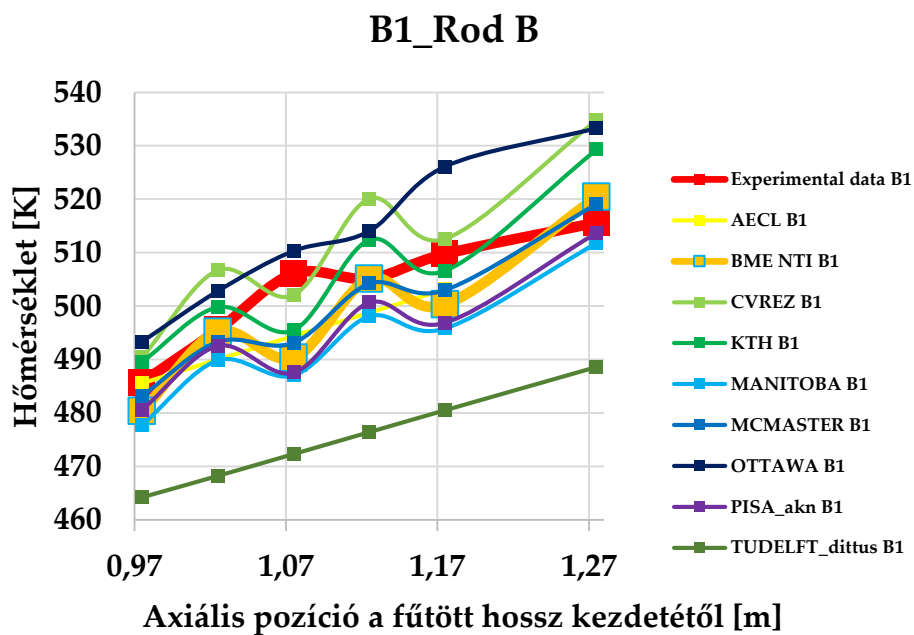
6-1. diagram: Nyomásesések az A1 esetben

A 6-1. diagramon látható, hogy a résztvevők többsége fölé becsülte a mérési geometriában történő nyomásesést.

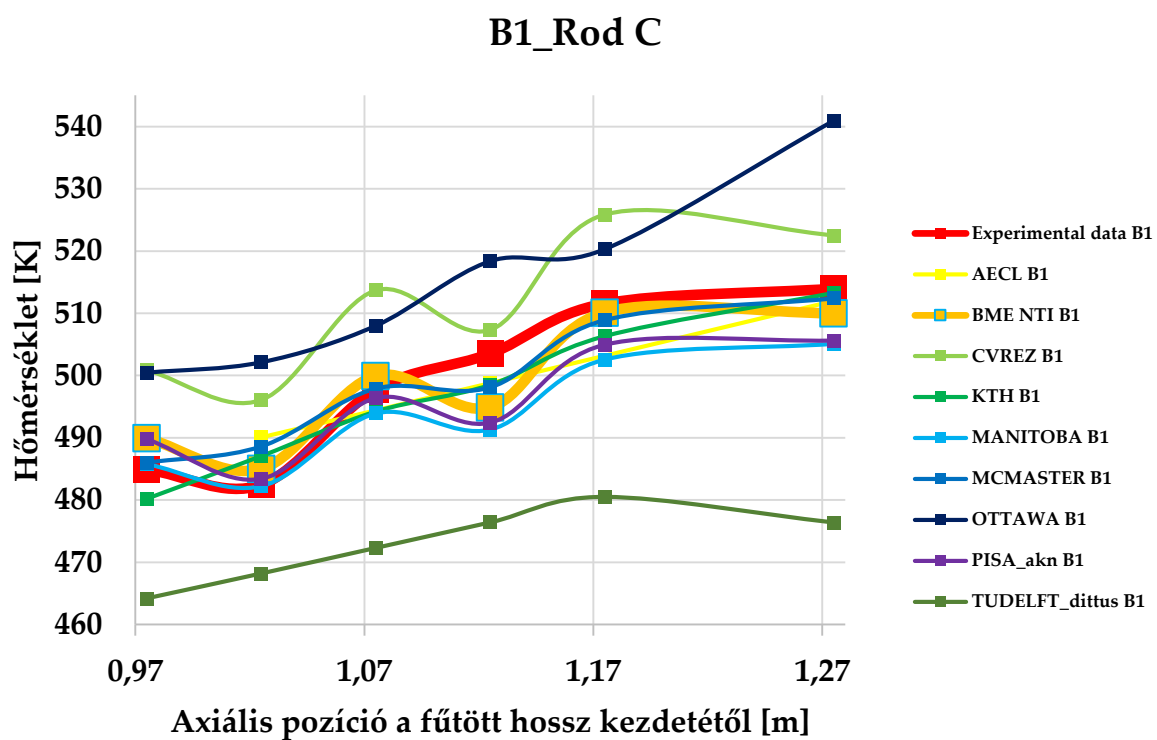
6.2. A B1-es eset



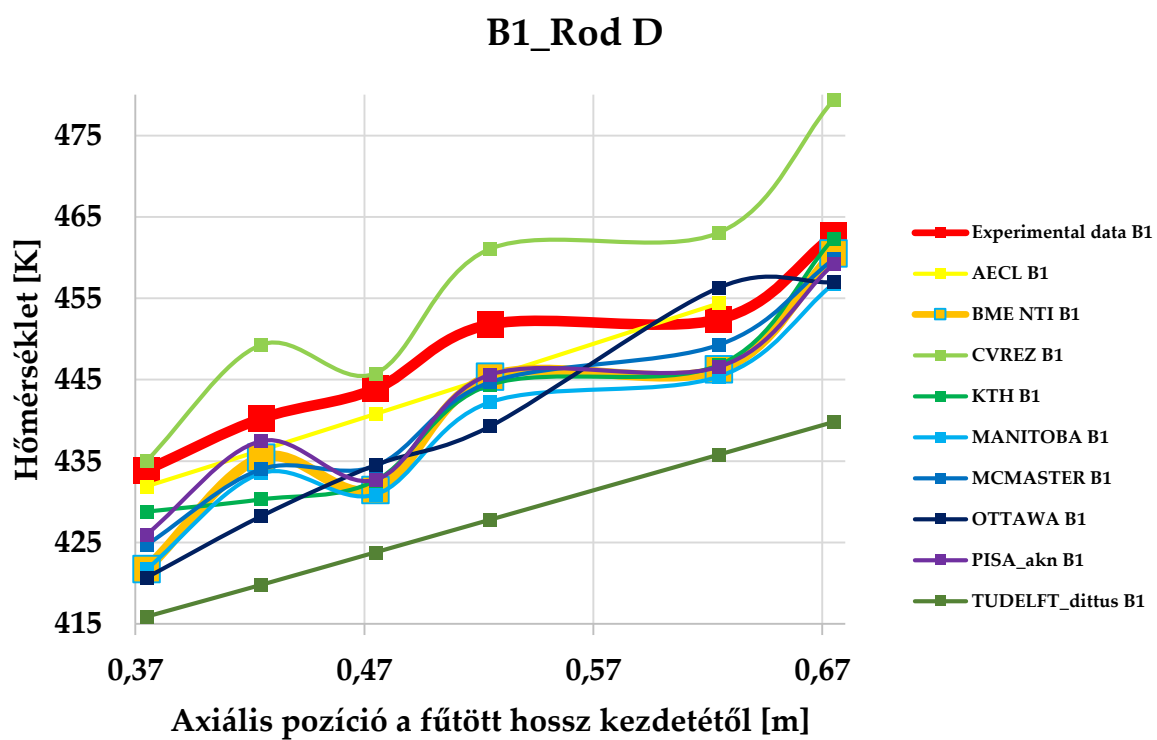
6-2. diagram: Az "A" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B1-es eset



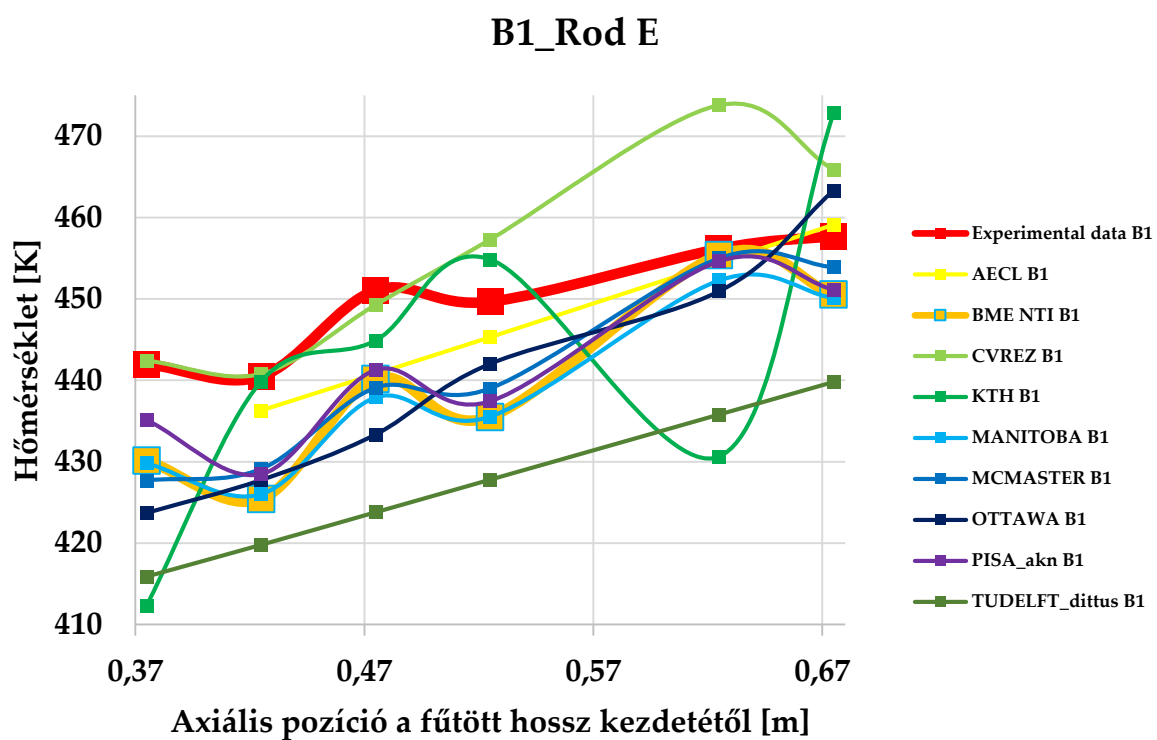
6-3. diagram: A "B" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B1-es eset



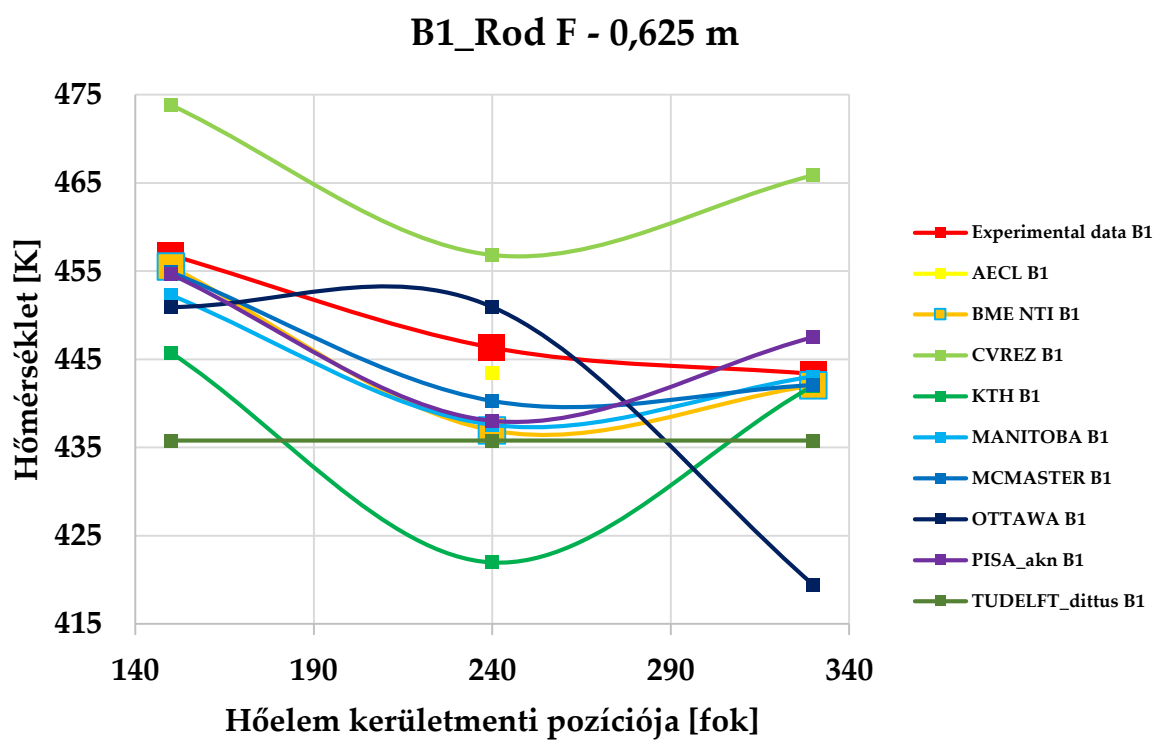
6-4. diagram: A "C" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B1-es eset



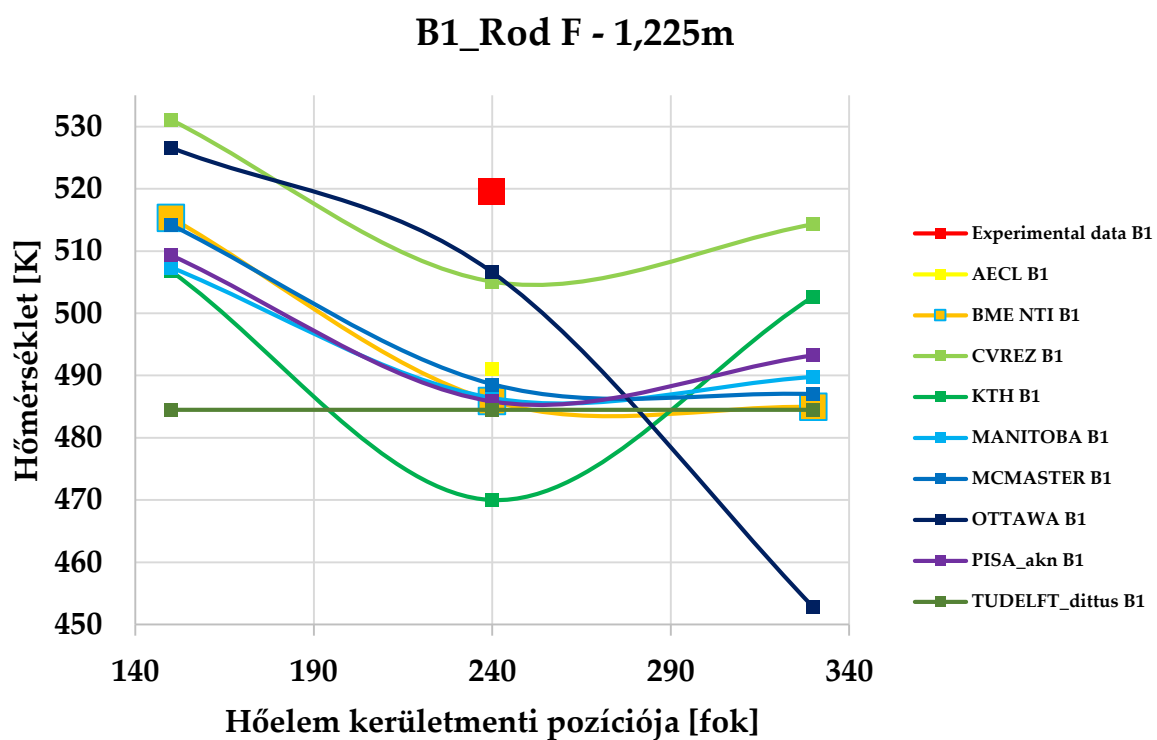
6-5. diagram: A "D" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B1-es eset



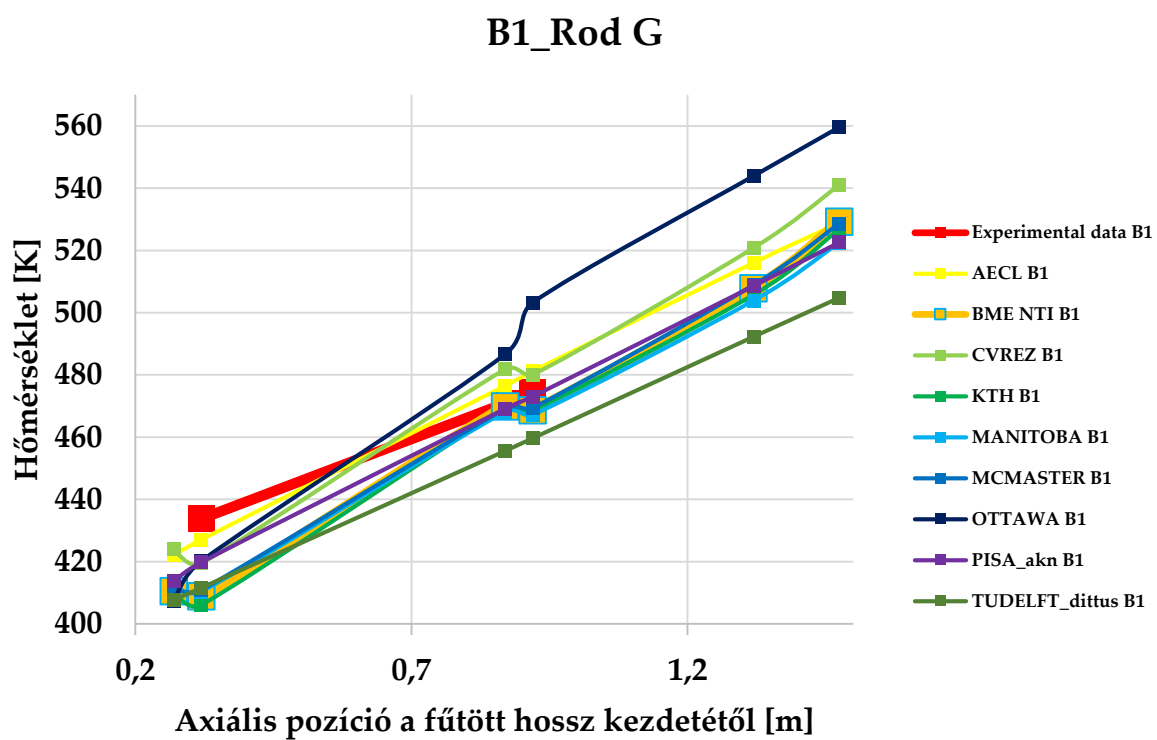
6-6. diagram: Az "E" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B1-es eset



6-7. diagram: Az "F" fűtőelemen mért hőmérsékletek 0,625 m magasságban, B1-es eset



6-8. diagram: Az "F" fűtőelemen mért hőmérsékletek 1,225 m magasságban, B1-es eset



6-9. diagram: A "G" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B1-es eset

A 6-2. diagramtól 6-9. diagramig láthatók a különböző fűtőelemeken mért (illetve számított) hőmérsékletek. A diagramokon megfigyelhetők az értékek közti különbségek, valamint a trendek is. A mért értékek szimbólumainak magassága megegyezik a mérési hiba tartományával.

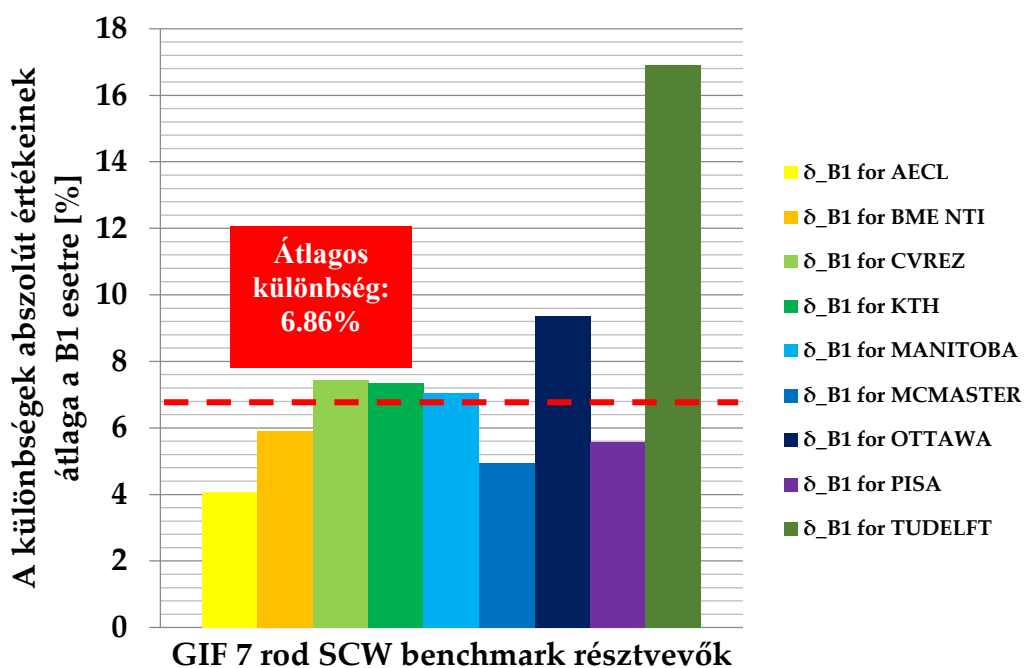
A hibaszámítás az (6.1) összefüggést használtam fel:

$$\delta = \left| \frac{T_{\text{exp}} - T_{\text{CFD}}}{T_{\text{ki}} - T_{\text{be}}} \right| \cdot 100\% \quad (6.1)$$

Ahol:

- δ : az eltérés abszolút értéke %-ban,
- T_{exp} : az adott termoelemhez tartozó mérési eredmény,
- T_{CFD} : az adott termoelemhez tartozó számított eredmény,
- T_{ki} : kilépési hőmérséklet,
- T_{be} : belépési hőmérséklet.

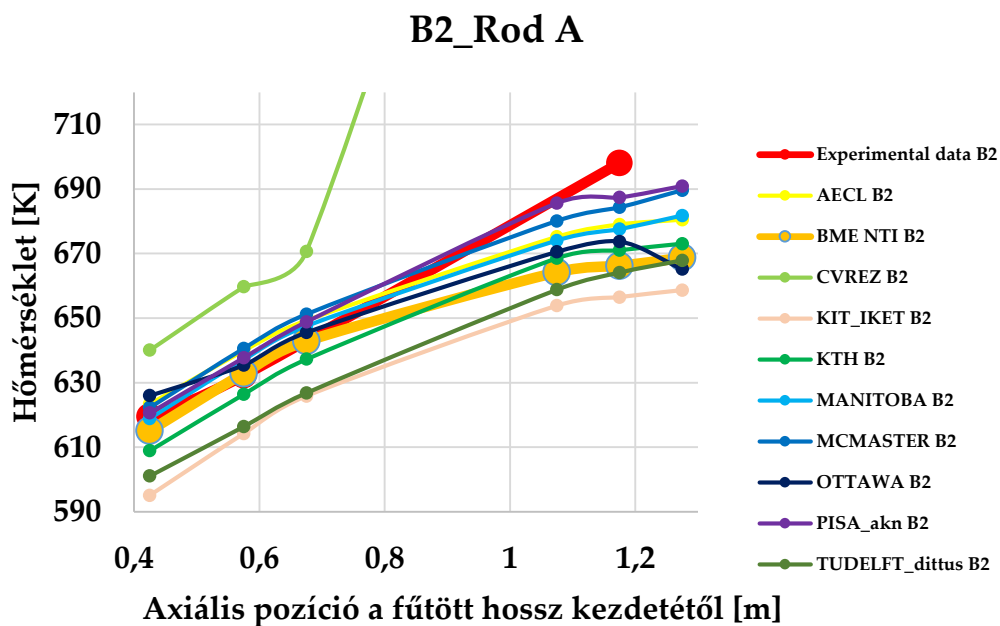
A belépési hőmérséklet (T_{be}) a 2-2. táblázatban szereplő 353,58 K. A kilépési hőmérséklet (T_{ki}) azonban nem volt elérhető, így azt a saját számításunkból vettük ki, feltételezve, hogy ez közelítőleg helyes érték. Így a kilépési hőmérséklet 484,234 K lett, és minden résztvevő eredményeinek kiértékelésénél ezzel az értékkel számoltam.



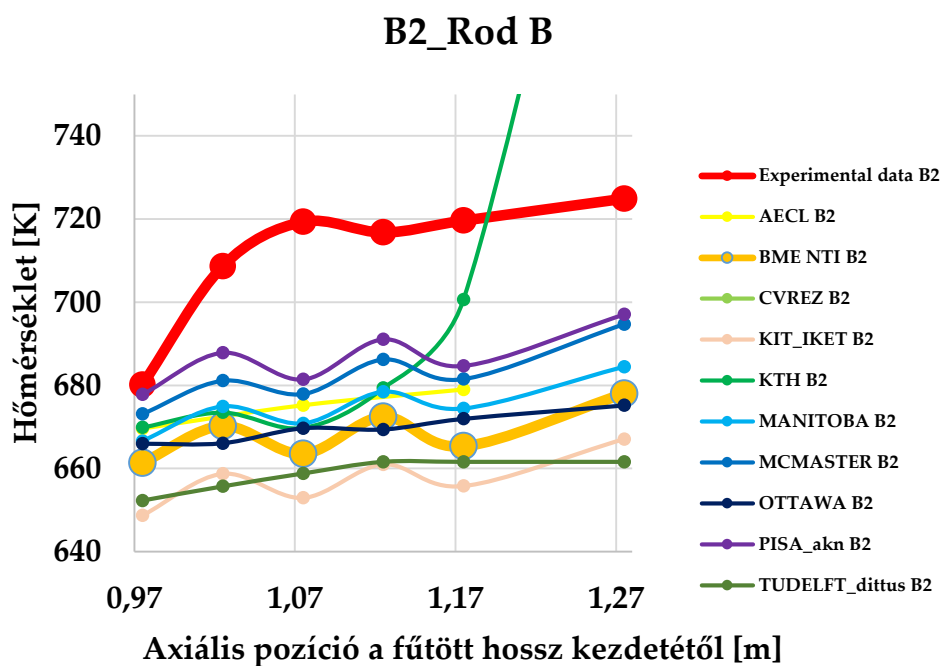
6-10. diagram: A különbségek abszolút értékeinek átlaga a B1 esetre

A 6-10. diagram alapján megállapítható, hogy a BME NTI a 4. legpontosabb eredményt szolgáltatta.

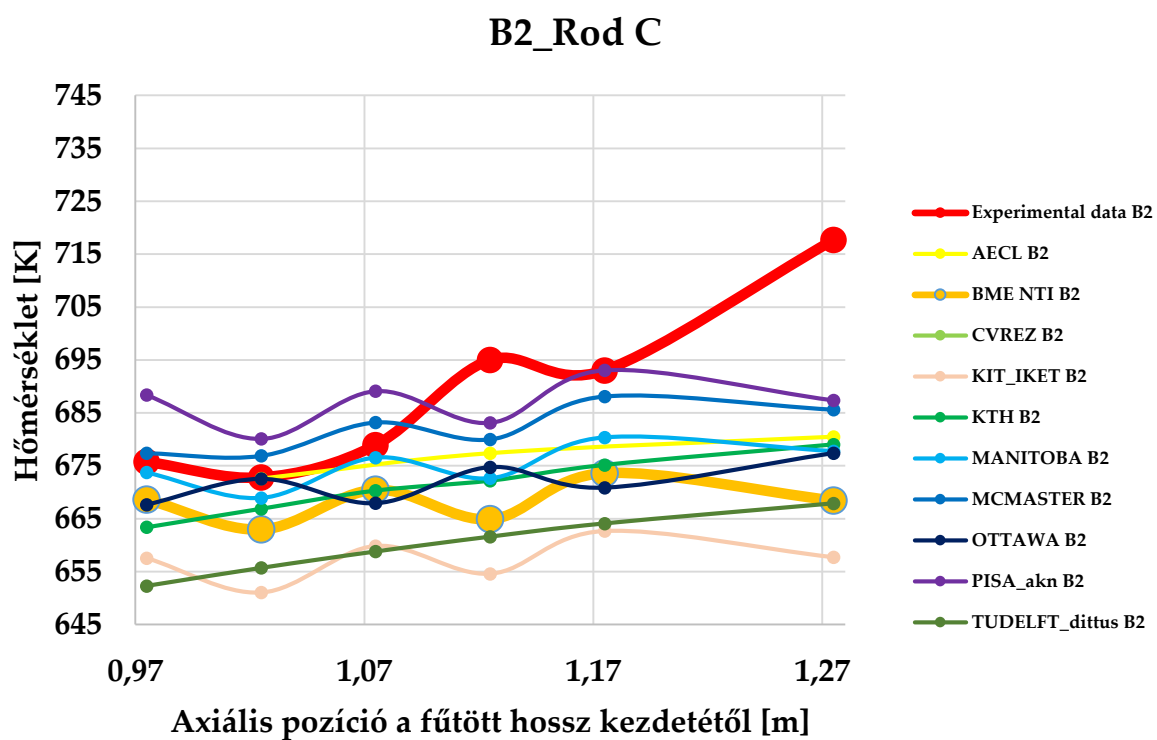
6.3. A B2-es eset



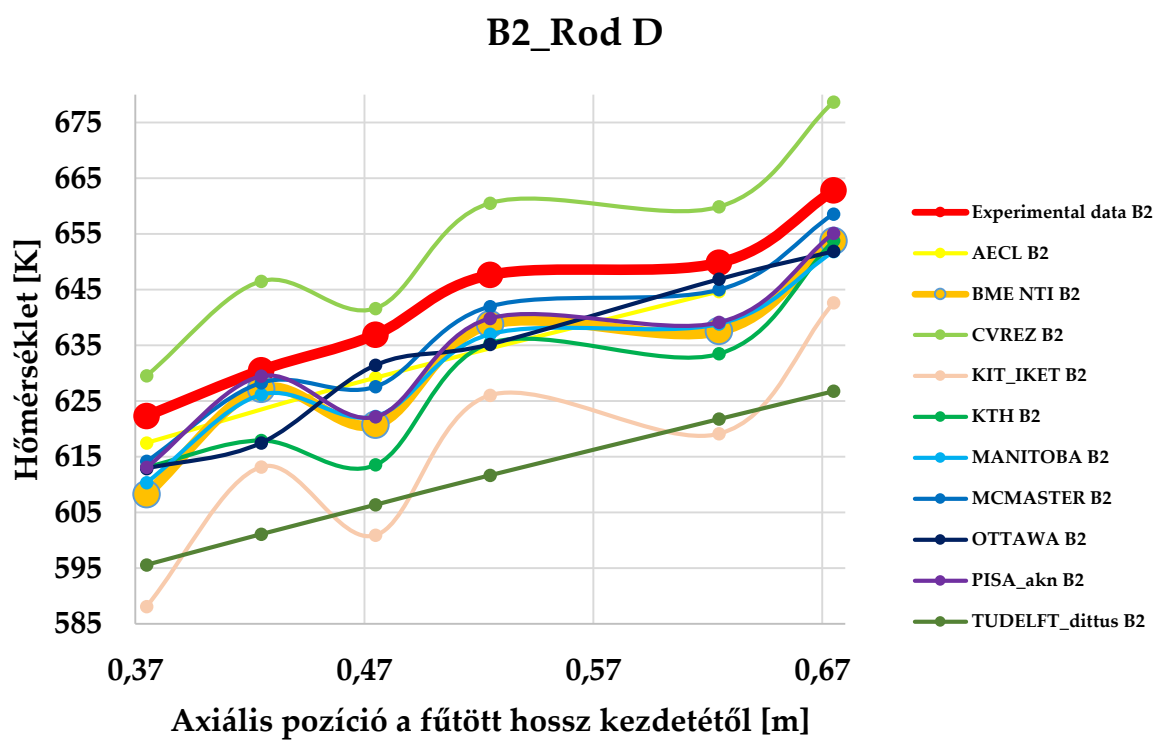
6-11. diagram: Az "A" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B2-es eset



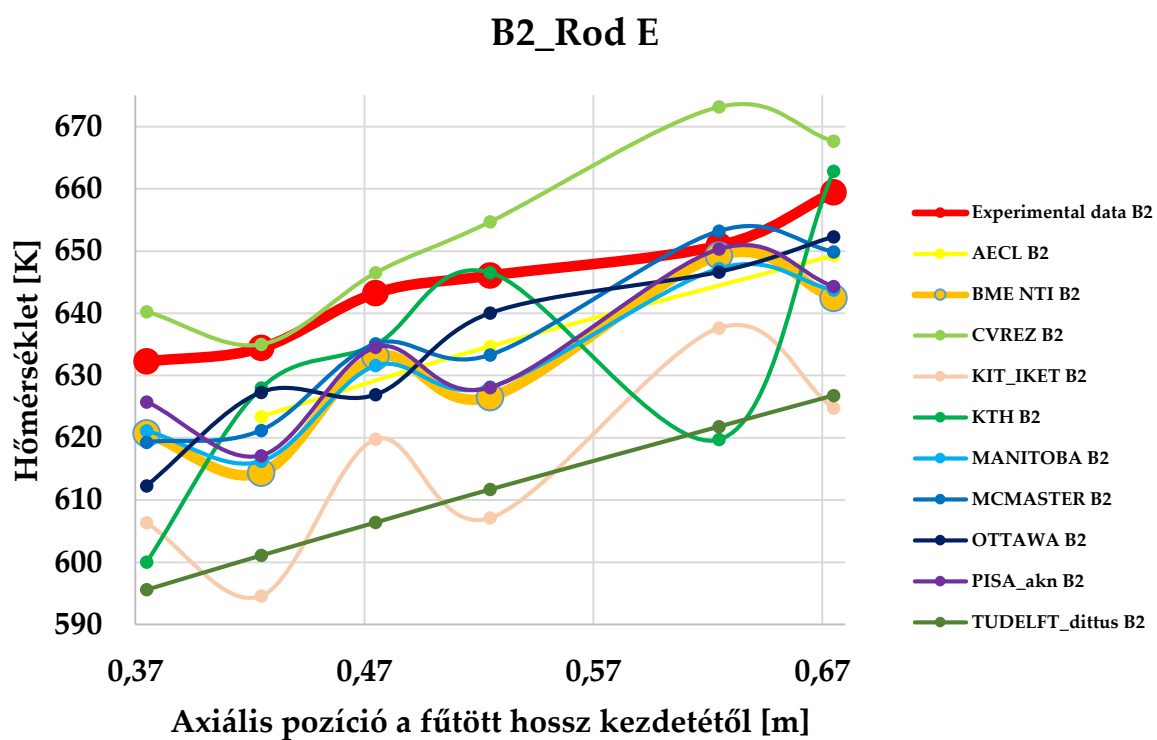
6-12. diagram: A "B" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B2-es eset



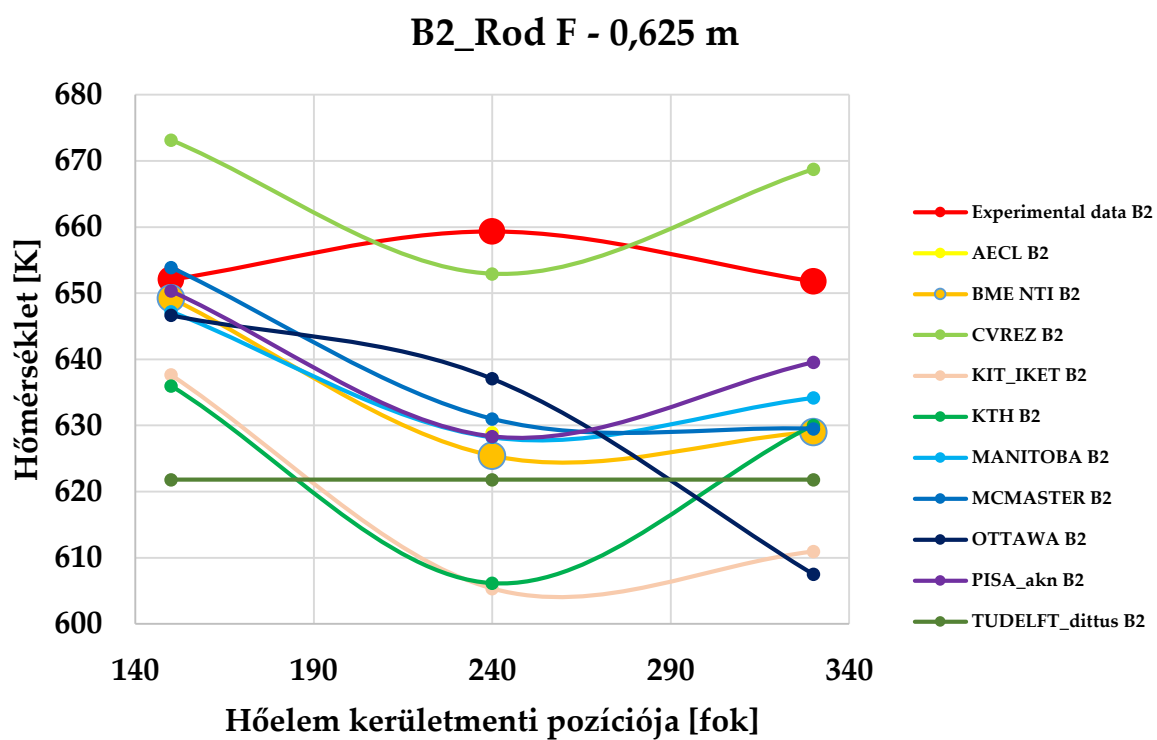
6-13. diagram: A "C" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B2-es eset



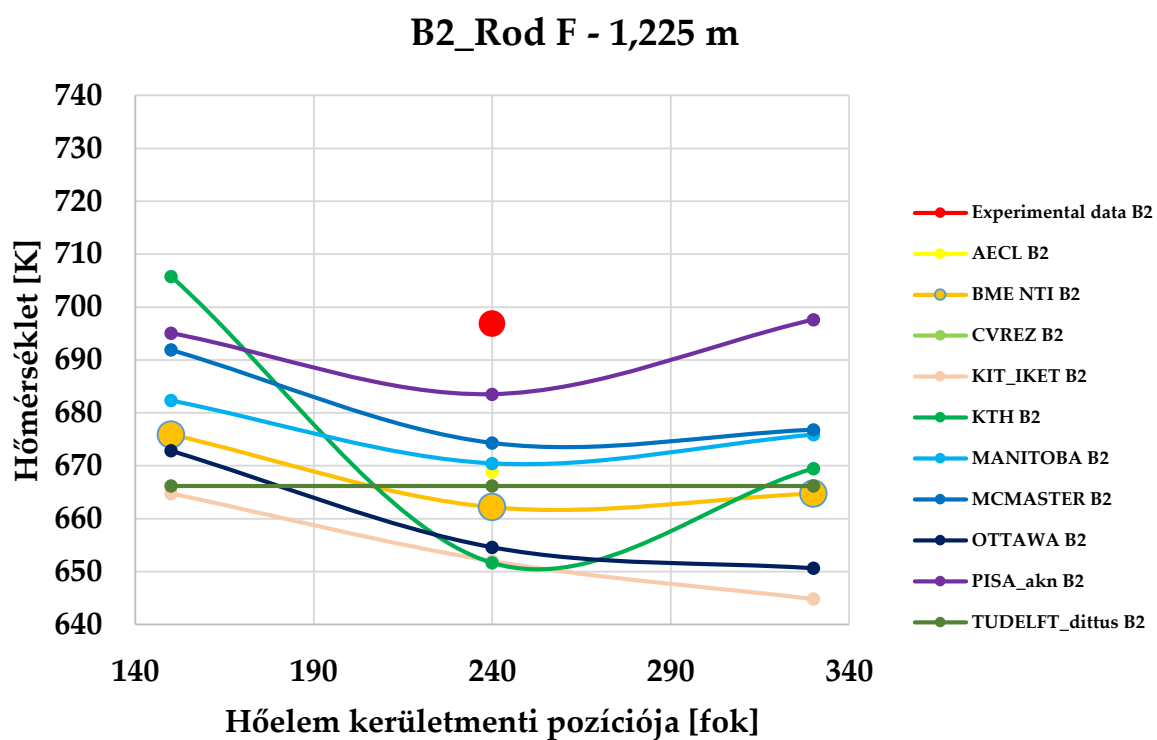
6-14. diagram: A "D" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B2-es eset



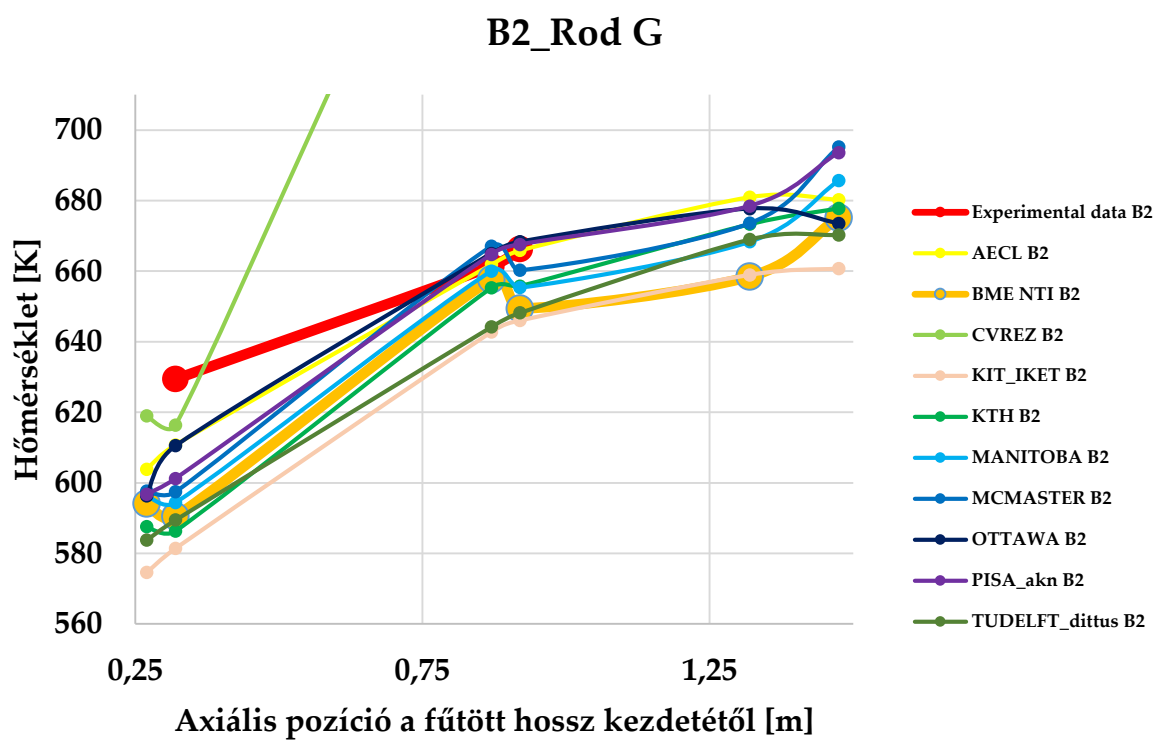
6-15. diagram: Az "E" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B2-es eset



6-16. diagram: Az "F" fűtőelemen mért hőmérsékletek 0,625 m magasságban, B2-es eset

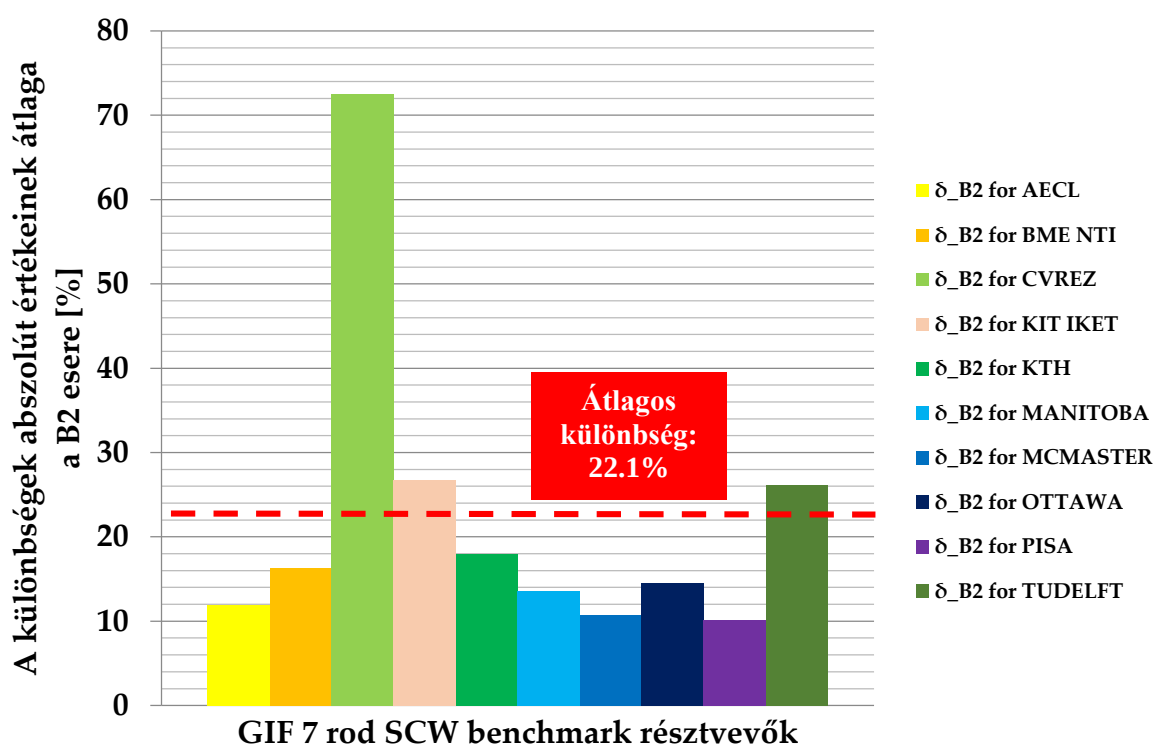


6-17. diagram: Az "F" fűtőelemen mért hőmérsékletek 1,225 m magasságban, B2-es eset



6-18. diagram: A "G" fűtőelemen mért hőmérsékletek, B2-es eset

A hibaszámításokat szintén a (6.1) egyenlet alapján végeztem el, azzal a különbséggel, hogy a belépési hőmérséklet (T_{be}) most a B2-es esethez tartozó 519,58 K (lásd 2-2. táblázat). A kilépési hőmérséklet (T_{ki}) esetén hasonlóan kellett eljárni, mint a B1-es esetben, ugyanis ez a hőmérséklet nem állt rendelkezésre, így a saját számításunkból vettük ki az értéket, melyet utána az összes hibaszámításhoz felhasználtunk, feltételezve, hogy egy közelítőleg helyes érték. Így a kilépési hőmérséklet 649,15 K lett.



6-19. diagram: A különbségek abszolút értékeinek átlaga a B2 esetre

A 6-19. diagram alapján elmondható, hogy a BME NTI a B2-es esetre a 6. legjobb eredményt szolgáltatta.

6.4. Értékelés

Az A1, B1 és B2 esetekre kapott eredmények alapján elmondható, hogy a BME NTI által végzett számítások a többi résztvevő eredményei fényében közepesen pontos eredményt adtak.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A TDK dolgozatban a GIF 7 pálcás benchmark feladat bemutatása után ismertettem egy részfeladatának, a távtartók kisebb részleteinek az eredményekre gyakorolt hatását (geometriaérzékenységi vizsgálat) feltáró számítássorozat menetét, valamint a végső modellek kiértékeléséhez nyújtott hozzájárulásomat foglaltam össze. A dolgozatban ismertett feladatok során főképp az ANSYS ICEM és CFX programok 14.0 verzióját, valamint a Microsoft Excel programot használtam fel. Az előzetesen más által elvégzett rácsérzékenységi vizsgálat által optimálisnak talált rácsparamétereket használtam és a korábban elkészített blokk strukturált rácsot, valamint geometriát fejlesztettem tovább.

A geometriaérzékenységi vizsgálatnál azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a szuperkritikus közeg erősen kapcsolt áramlástani és hőtani egyenletei miatt elég csak egy izotermikus esetre megvizsgálni a távtartók geometriai részleteinek az eredményre gyakorolt hatásait. Ahol a távtartó után az áramkép minőségileg és mennyiségileg is megegyezik a távtartó előtti kialakult turbulens áramképpel, ott azt feltételeztük, hogy a hőkép (például a hőmérséklet mező) eloszlásai is egyeznének azonos viszonylatban. Az eredmények alapján elmondható, hogy a fali nyírófeszültségek változása nagyon jól mutatja, hogy a három különböző távtartó geometria eltérő hatást gyakorol az áramlásra, továbbá a sebesség- és turbulens kinetikus energia profilok alapján megállapítható, hogy a távtartó áramlásra gyakorolt hatása nagyjából 75 mm után tűnik el. Ekkorra a profil nagyjából visszanyeri a zavartalan áramláshoz tartozó profilt. Ez azt jelenti, hogy a távtartó utáni 75 mm-en belül a távtartónak van hatása az áramlásra, vagyis az itt lévő termoelemek méréseit befolyásolhatja a távtartó áramlást megzavaró hatása. Elvileg helyesebb döntést lehetett volna hozni, ha a B1 vagy B2-es fűtött esetet vizsgáljuk meg a geometriaérzékenység szempontjából. Erre a bonyolultabb és előre láthatóan időigényesebb modellezés miatt nem került sor. Maradt a gyorsabban kivitelezhető izotermikus esetre elvégzett geometriaérzékenység vizsgálat. Mivel összesen 7 olyan termoelem van, mely beleesik ebbe a távtartó utáni 75 mm-be, vagyis ahhoz, hogy az ezeken a pontokon mért értékek a lehető legpontosabbak legyenek, a végső számítási modellbe a legrészletesebb, vagyis a P2-2-es távtartó geometria beépítése valósult meg.

A végső számítások során az A1, B1 és B2 esetekre kapott eredmények alapján elmondható, hogy a BME NTI által végzett számítások a többi résztvevő eredményei fé-

nyében közepesen pontos eredményt adtak. Az A1 eset nyomásesését közelítően jól számolta a végső modell. A B1 esetről a különbségek abszolút értékének átlagait tekintve az NTI eredményei a 4. legjobb becslést adták a mérési eredményekre, míg a B2 esetben a 6. legjobbat.

8. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM (2013): *Calculation Conditions of Benchmark Exercise Based on 7-Rod Bundle Test Results* (Proposed by K. Takase (JAEA)).
- [2] *Ansys CFX-Solver Modeling Guide*, Release 14.0, 2011.
- [3] Pioro, I. L., Duffey, R. B., 2007, Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications, ASME Press, New York, USA.
- [4] Házi, G., Farkas, I. 2009, On the pressure dependency of physical parameters in case of heat transfer problems of supercritical water, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 131 (1), art. no. 012904.

9. MELLÉKLETEK

9.1. Termoelemek elnevezése és pozíciói

Heater rod name	Thermocouple No.	Installation angle of thermocouple (deg)	Axial position from the start of the heating length (m)	Thermocouple No. and installation angle of thermocouple (deg)									
				30 (deg)	60 (deg)	120 (deg)	150 (deg)	180 (deg)	210 (deg)	240 (deg)	270 (deg)	300 (deg)	330 (deg)
A	T1	180	0,425					T1					
	T2	180	0,575					T2					
	T3	180	0,675					T3					
	T4	180	1,075					T4					
	T5	180	1,175					T5					
	T6	180	1,275					T6					
B	T7	60	0,975		T7								
	T8	30	1,025	T8									
	T9	60	1,075		T9								
	T10	30	1,125	T10									
	T11	60	1,175		T11								
	T12	30	1,275	T12									
C	T13	330	0,975										T13
	T14	300	1,025									T14	
	T15	330	1,075										T15
	T16	300	1,125									T16	
	T17	330	1,175										T17
	T18	300	1,275									T18	
D	T19	300	0,375									T19	
	T20	270	0,425								T20		
	T21	300	0,475									T21	
	T22	270	0,525								T22		
	T23	300	0,625									T23	
	T24	270	0,675								T24		

E	T25	210	0,375						T25				
	T26	180	0,425					T26					
	T27	210	0,475						T27				
	T28	180	0,525					T28					
	T29	210	0,625						T29				
	T30	180	0,675					T30					
F	T31	150	0,625				T31						
	T32	240	0,625							T32			
	T33	330	0,625										T33
	T34	150	1,225				T34						
	T35	240	1,225							T35			
	T36	330	1,225										T36
G	T37	120	0,27			T37							
	T38	120	0,32			T28							
	T39	120	0,87			T39							
	T40	120	0,92			T40							
	T41	120	1,32			T41							
	T42	120	1,475			T42							