

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET

MERVAY BENCE
TDK DOLGOZAT
Az SCWR-FQT teszt szakaszának CFD analízise

Témavezető:

Kiss Attila

Tudományos segédmunkatárs

BME Nukleáris Technikai Intézet

Budapest, 2015

Szerzői jog © Mervay Bence, 2015.

Szerzői jog © Kiss Attila, 2015.

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, 2015. október 26.

Kiss Attila

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, 2015. október 26.

Mervay Bence

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	vii
1. Szakirodalmi áttekintés	9
1.1. Az SCWR és az SCW	9
1.2. A HPLWR és az SCWR-FQT projekt.....	14
2. Az SCWR-FQT SWAMUP vak benchmark bemutatása	19
2.1. Feladatkiírás, geometria, peremfeltételek	19
2.2. A BME NTI által alkalmazott megközelítés.....	23
2.3. A CFX modell elkészítése	24
2.3.1. A geometria elemei.....	24
2.3.2. A geometria készítésről általában, a CFD módszerekkel megoldható geometriák limitációi	27
2.3.3. A geometria diszkretizálása (ww_3o).....	29
2.3.4. A CFX modell elkészítése	32
2.4. Érzékenységi vizsgálatok.....	34
2.4.1. Háló érzékenységi vizsgálat.....	35
2.4.2. A határréteg háló érzékenységi vizsgálat	40
2.4.3. Turbulencia modell érzékenységi vizsgálat.....	47
2.4.4. Az érzékenységi vizsgálatokból levonható következtetések	55
2.5. A modell továbbfejlesztése az érzékenységi vizsgálatok alapján.....	56
2.5.1. A Footpiece elem és a Fluid domén hálójának továbbfejlesztése	56
2.5.2. A Rod és Helix elem hálójának fejlesztése	58
2.5.3. A régi és az új modell összehasonlítása.....	59
2.6. Az eredmények bemutatása	60
2.6.1. A számítási tartományban kialakuló áramkép	60
2.6.2. A mérési eredményekkel összevetett számítási eredmények	70
3. A helikális távtartó menetemelkedésének hatása a hőátadásra	75
3.1. A feladat és a vizsgált geometriák ismertetése.....	75
3.2. Eredmények bemutatása.....	77
4. Összefoglalás	83
5. Felhasznált források	85

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 superkritikus nyomású vízzel hűtött reaktorokkal (Supercritical Water Reactor, röviden SCWR) kapcsolatban a hűtőközeg bonyolult és teljes mértékben még meg nem értett termohidraulikája (különböző hőátadási módusok közötti különbségek okai, a hiperkompresszibilitás hatása, stb.) vagy a nagy hőállóságú szerkezeti anyagok igénye. Az SCWR hűtőközegének, a superkritikus 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.

Az SCWR reaktorkoncepció európai változata az úgynevezett HPLWR (High Performance Light Water Reactor), mellyel kapcsolatosan több kutatóprojekt is indult. Egy ilyen kutatóprojekt a 2011. január 1-jén kezdődött és 2014. december 31-én lezárult SCWR-FQT (Supercritical Pressure Water Cooled Reactor-Fuel Qualification Test) európai uniós kutatási projekt, melyben 6 európai partner (köztük a BME NTI) vett részt. A projekt célja a tesztkör megtervezése és az engedélyeztetéséhez szükséges vizsgálatok elvégzése volt. Ehhez többek között a használt CFD kódok validációjára is szükség volt (egy benchmark feladat keretében), melyhez a mérési adatokat az egyik kínai partner szolgáltatta, akik a már meglévő SWAMUP elnevezésű mérőkörbe végeztek méréseket a geometria 1,25-szörösére nagyított változatán.

Ez a dolgozat a BME NTI által végzett számítások elvégzésének folyamatát valamint eredményeit mutatja be, továbbá a tanszék által végzett további számításokat, melyek a modell tökéletesítését, valamint a különböző geometriák közötti termohidraulikai különbségek feltárását tűzte ki célul.

* * *

Szeretném kifejezni köszönetemet Kiss Attila tanár úrnak odaadó témavezetői munkájáért, azért, hogy munkaidején kívül is foglalkozott velem és mindig rendelkezésre állt.

Budapest, 2015. október 26.

Mervay Bence

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben röviden bemutatásra kerül a téma szakirodalma a dolgozat megírásához szükséges mélységben.

1.1. Az SCWR és az SCW

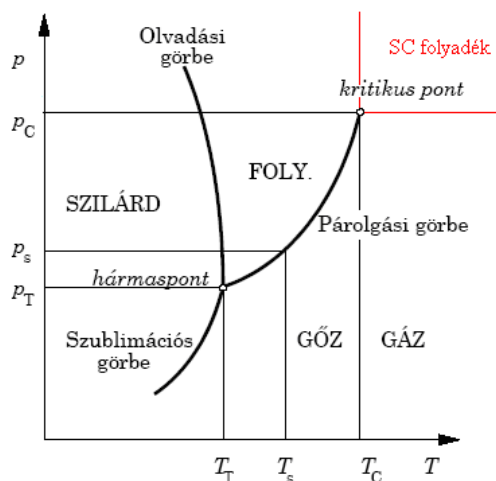
A Generation IV International Forum-ot (GIF) 2000-ben alapították az Amerikai Egyesült Államok kezdeményezésére [1]. Az alapítók célja olyan negyedik generációs nukleáris reaktorok kifejlesztése volt, melyek a korábbi reaktoroknál biztonságosabbak, magasabb hatásfokkal-, esetleg zárt üzemanyag ciklussal is üzemeltethetőek, a villamosenergia-termelés mellett más termelési célt is szolgálhatnak, hozzájárulnak a fenntartható fejlődéshez, az alkalmazó országok versenyképességéhez és javítják ellátásbiztonságukat, valamint növeli az atomenergia-felhasználás széleskörű elterjedését. A fő fejlesztési célok megfogalmazása valamint annak a hat reaktorkonceptciónak a kiválasztása, melyek reményeik szerint 2030-ra kereskedelmi forgalomba kerülnek, közel két évet vett igénybe [1]. A kiválasztott hat reaktorkonceptció egyike az SCWR (Supercritical Pressure Water Reactor), mely egy könnyűvízhűtésű reaktor, ami a víz termohidraulikai kritikus pontja fölött üzemel ($p_c = 22,064$ MPa, $T_c = 373,95^\circ\text{C}$). A kritikus pont körüli vagy azt meghaladó állapotú hőhordozó közeg használatát először fosszilis erőművekben alkalmazták. A technológia az 1950-es évektől indult fejlődésnek mind az Egyesült Államokban, mind a Szovjetunióban.

Az SCWR nagy előnye az LWR-eknél (Light Water Reactor) magasabb hatásfok, melyet a szuperkritikus nyomású hűtőközeg használata tesz lehetővé (körülbelül 45%, míg a hagyományos LWR-ek esetén a termikus hatásfok 35% körül van). A referencia SCWR koncepció egyfajta átmenet a mai PWR-ek (Pressurized Water Reactor) és BWR-ek (Boiling Water Reactor) között. Ezen kívül az SCWR-ek elvileg egyszerűbb felépítésűek, mivel számos, a mai BWR-ekben használt berendezésre nincs szükség: például gőzfejlesztőkre, gőzszeparátorra és gőzszáritókra [1]. Mivel a koncepció két ismert és alkalmazott technológia, a már említett LWR-ek és az SCW-vel üzemelő fosszilis erőművek ötvözet, így ebből a szempontból kifejlesztése, a többi negyedik generációs reaktorkonceptcióval ellentétben, egyszerűbb és gazdaságosabb, mert már sok éves tervezési és üzemeltetési tapasztalat gyűlt össze mind az LWR-ek, mind az SCW-vel üzemelő fosszilis erőművek terén [2]. A magasabb hatásfok, az elvileg könnyebb kifejleszhetőség és az egyszerűbb felépítés mellett a koncepciónak más előnyei is vannak. A hűtőközeg magasabb entalpiánövekedése miatt kisebb hűtőközeg-forgalmat tesz lehetővé egységnyi reaktorteljesítményre vonatkoztatva, ez által csökken a berendezések szükséges mérete, valamint a fajlagosan szükséges szivattyúteljesítmény. Ezt némileg ellensúlyozza a szuperkritikus nyomás miatti nagyobb cső falvastagság igény.

Mivel a rendszer hűtőközeg-tartalma kisebb mint az LWR-ekben, így kisebb konténment is elegendő. Továbbá a reaktorban nem léphet fel forráskrizis (sem DNB, sem kiszáradásos), ez elkerülhetővé teszi a hőátadási üzemállapotok váltakozását. Fajlagos beruházási költsége alacsony (900-1000 USD/kW_e) és nagy mérettartományokban életképes (400-1600 MW_e), így rugalmasan alkalmazkodik a piaci igényekhez [3].

Az SCWR fejlesztése azonban számos tudományos-technológiai nehézséget is tartalmaz: elsősorban validálni kell a különböző hőátadási modelleket, anyagtechnológiai fejlesztésekre van szükség és demonstrálni kell a passzív biztonsági rendszerek működőképességét. Ezen kívül az általános problémát a magas zóna kilépő hőmérséklet jelenti és a nagy entalpiánövekedés. A hűtőközeg nem egyenletes keveredése forrópontokat hozhat létre. Erre megoldás lehet a fosszilis erőművekben alkalmazott többlépcsős melegítés és közbenső hűtőközeg keverés, mely azonban bonyolultabbá teszi a zónát. Másik probléma, hogy cirkónium ötvözetek már nem alkalmazhatók üzemanyag burkolatként a magas hőmérséklet miatt, ezért acélokat vagy más (jelenleg nukleáris engedélyekkel nem rendelkező vagy fejlesztés alatt álló) anyagokat kell alkalmazni. Ez hatással van a kiégésre és a burkolat hőmérsékletére is. Annak ellenére, hogy az SCW egyfázisú közeg és így a forráskrizis kizárható, a burkolat túlmelegedhet, ha a hőfluxus meghaladja a tervezési értéket. Ezen felül a zónában nagy hűtőközeg sűrűségkülönbségek vannak, ami termohidraulikai instabilitáshoz és burkolat túlmelegedéshez vezethet [2]. Ezen kívül egyes pozitívumoknak vannak negatív hatásai is, például a kevesebb hűtőközeg magában hordozza azt a veszélyt, hogy egy hűtőközeg vesztéssel járó üzemzavar esetén a zóna könnyebben kiszáradhat, vagy az egykörös kivitel miatti turbina elszennyeződés. A koncepció tulajdonságait alapvetően meghatározzák a kritikus, pszeudokritikus pont környékén tapasztalt jelenségek.

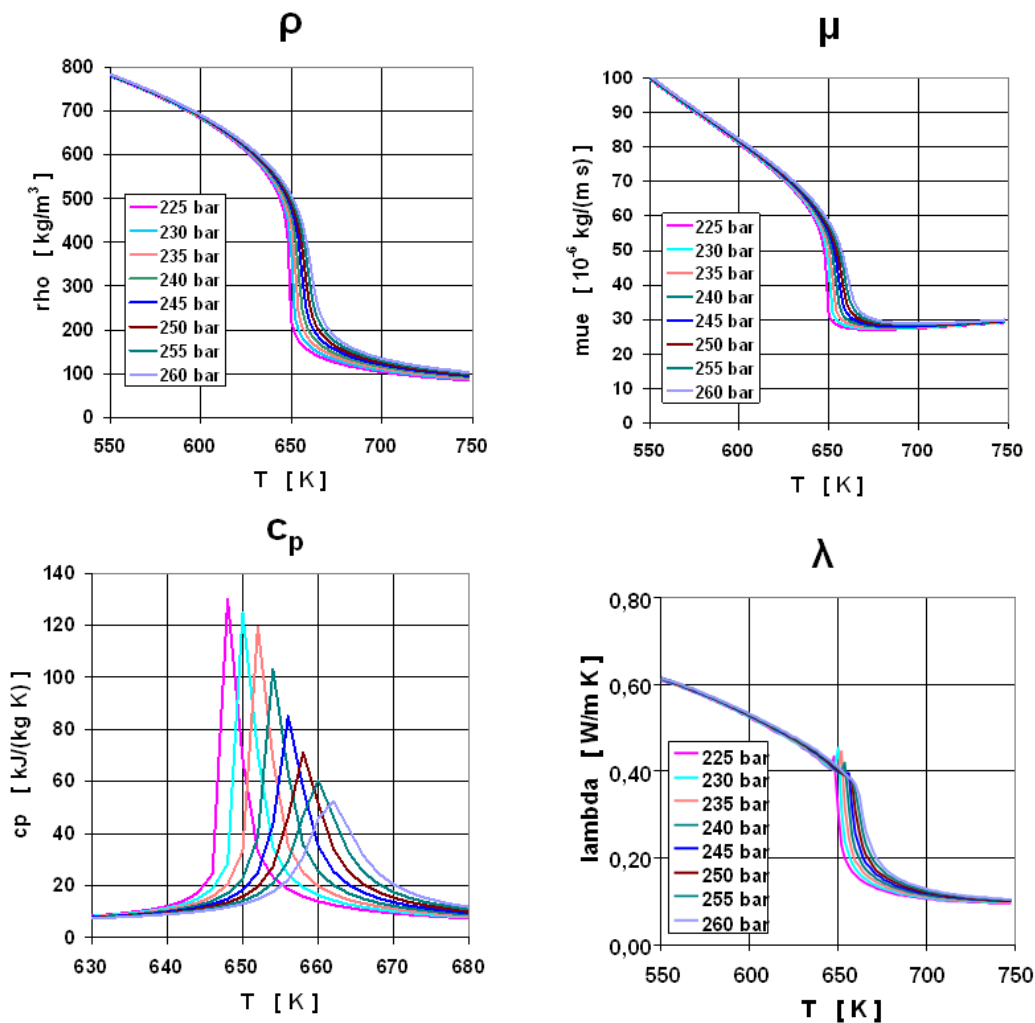
A hagyományos anyagi fázisokon kívül (szilárd, légnemű, folyadék) léteznek speciális állapotok is, mint például a plazma és a szuperkritikus folyadék állapot. Ezek jellemzője, hogy extrém értékű termodinamikai állapotjelzőkkel rendelkeznek. A 1-1. diagram mutatja a víz abszolút nyomás – abszolút hőmérséklet (p - T) diagramját.



1-1. diagram: A víz fázisdiagramja [4]

A párolgási görbe végén található a kritikus pont, mely a hármasonthoz hasonlóan közeg jellemző pontja, melyet a hozzá tartozó kritikus nyomás (p_c) és kritikus hőmérséklet (T_c) egyértelműen meghatároz. Ha a kritikus hőmérséklete fölé hevített anyagot a kritikus nyomásnál nagyobb nyomással nyomjuk össze, az anyag homogén marad, nem következik be fázisátalakulás, szuperkritikus folyadék állapot jön létre. Ez egy átmeneti állapot a folyadék- és gázhalmazállapot között, melyben az anyag tulajdonságai nagyon hasonlítanak a folyadék tulajdonságaihoz. A kritikus pont felett nem lehet különbséget tenni a folyadék és gáz fázis között, mivel a két fázis sűrűsége megegyező lesz, a fázishatár eltűnik [4].

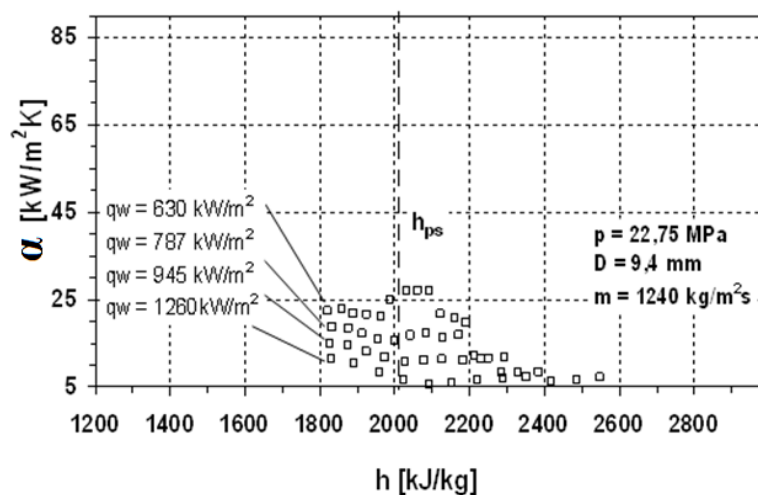
Mikor egy anyag átlép a szuperkritikus termodinamikai állapotba, akkor nem történik fázisátalakulás, ezért nem lesz ugrásszerű változás a közeg anyagi jellemzőiben, azonban mégis van anyagi jellemző változási jelenség a szuperkritikus folyadék tartományban. Ez a pszeudokritikus átalakulás. Ha a kritikus nyomásnál nagyobb nyomáson, de a kritikus hőmérsékletnél kisebb hőmérsékleten elindítunk egy izobár hűközlési folyamatot, a pszeudokritikus hőmérséklet átlépése során az anyagi jellemzői folyamatosan megváltoznak (nem ugrásszerűen, mint az úgynevezett elsőfajú fázisátalakulásoknál, de erőteljesen). Ugyanez elképzelhető úgy is, hogy a hőmérséklet nagyobb a kritikus hőmérsékletnél, míg a nyomás alacsonyabb a kritikus nyomásnál, és izotermikus nyomásnövelést hajtunk végre a közegen [4]. Az SCWR koncepció az előbbit használja fel, a kritikus nyomásnál magasabb a közeg üzemi nyomása, míg a hőmérséklete változik (felmelegszik a zónában) úgy, hogy a pszeudokritikus hőmérsékletnél alacsonyabb a belépő (280°C) és magasabb a kilépő hőmérsékletének (500-550°C) értéke. Az SCWR-ekbe a tervezett nyomás 25 MPa (magasabb, mint a kritikus nyomás 22,064 MPa), mely esetre a pszeudokritikus hőmérséklet 384,875°C. E hőmérséklet környezetében a termohidraulikailag fontos anyagi jellemzők nagy változáson esnek át (lásd 1-2. *diagram*), ezek közül is a legszembetűnőbb az izobár fajhő megváltozása. Sok definíció szerint a pszeudokritikus átalakulás ott történik meg, ahol az izobár fajhőnek maximum értéke azonosítható [4].



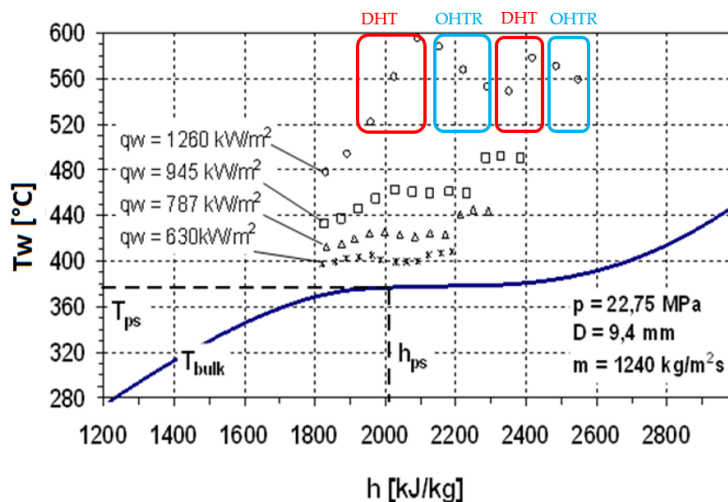
1-2. diagram: Az SCW sűrűsége (ρ), dinamikai viszkozitása (μ), izobár fajhője (c_p), és hővezetési tényezője (λ) a hőmérséklet függvényében, paraméter a nyomás [4]

A fajhő lokális csúcsának köszönhetően a pszeudokritikus pontnál igen hatékony hőelvonás valósítható meg. E pont feletti alacsony sűrűségű fluidumot gyakran hívják „szuperkritikus gőznek” („gas-like behaviour”), míg az e pont alatt lévő magas sűrűségű fluidumot „szuperkritikus víznek” („liquid-like behaviour”). Az entalpiakülönbség a víz és a gőz között akkora, hogy meglehetősen sok hőt lehet elvonni viszonylag alacsony hűtőközeg tömegárammal mérsékelt hőmérsékletnövekedés mellett. Az anyagjellemzők meredek változása a pszeudó-kritikus pont környezetében a tömegfluxushoz viszonyítva kellően magas hőfluxus érték esetén a hőátadási tényező elfajulásához vezet, amelynek pontos okát még a mai napig nem értik teljesen a kutatók, ezért ez sokat kutatott terület. A hőátadási tényező elfajulását, ami fali hőmérséklet csúcsokat („hot spot”) eredményez, mennyiségileg minden esetben pontosan még nem tudják számolni a rendelkezésre álló CFD kódok. A fali hőmérsékletek és a hőátadási tényező eloszlásának alakját jól visszaadják viszont, tehát minőségileg kiszámolható az elfajulás jelensége [5].

Az 1930-as évektől kezdve több mint 450 kísérletet végeztek el és publikáltak a hőátadási tényező (Heat Transfer Coefficient, HTC) szuperkritikus közegekben (főleg SCW) való változásával kapcsolatban [6]. A hőátadás három fajtáját különböztették meg az előbb említett kísérletek alapján: normális hőátadás (Normal Heat Transfer, NHT), fokozott hőátadás (Enhanced Heat Transfer, EHT) és elfajult hőátadás (Deteriorated Heat Transfer, DHT). Az elfajult hőátadás esetén, közvetlenül az elfajulás után regenerálódhat a hőátadásunk (Onset of Heat Transfer Regeneration, OHTR), amit az elfajulással ellentétes hatású folyamatként képzelhetünk el. Egyes mérési körülmények között az elfajulás és a regenerálódás két vagy több alkalommal térben, az áramlás irányában egymás után, egy időben fordul elő. A 1-3. *diagram* és 1-4. *diagram* mutatja az NHT, EHT és DHT értékeket a HTC és a fali hőmérséklet függvényében függőleges csőben történő SCW felfelé áramlás esetén [7].



1-3. *diagram*: HTC az NHT ($q_w = 945 \text{ kW/m}^2$), EHT ($q_w = 630$ és 787 kW/m^2) és DHT-OHTR ($q_w = 1260 \text{ kW/m}^2$) folyadék entalpiák függvényében [7]



1-4. *diagram*: Fali hőmérséklet az NHT ($q_w = 945 \text{ kW/m}^2$), EHT ($q_w = 630$ és 787 kW/m^2) és DHT-OHTR ($q_w = 1260 \text{ kW/m}^2$) folyadék entalpiák függvényében [7]

Nagyjából állandó hőmérsékletkülönbség figyelhető meg a fali hőmérséklet és a folyadék hőmérséklet (T_{bulk}) között a termikus határrétek kialakulása után az NHT esetben (lásd 1-4. *diagram*), ami aránylag nagy HTC értéket eredményez (lásd 1-3. *diagram*). Alacsonyabb hőfluxus esetén (alacsonyabb hőfluxus-tömegfluxus arány esetén) a fal és folyadék közti hőmérsékletkülönbség lecsökken (lásd 1-4. *diagram*), ami a HTC megnövekedéséhez vezet, vagyis az EHT eset áll elő (lásd 1-3. *diagram*).

Ha a hőfluxus és tömegfluxus aránya meghaladja a DHT kritériumot (lásd a 1.1 egyenletet stabil áramlás esetén és a 1.2 egyenletet oszcilláló áramlás esetén), DHT válsul meg, ami alacsony HTC értéket eredményez és magas fali hőmérsékletet. Ahogy korábban említésre került, a HTC regenerálódhat a fali hőmérséklet csúcserék elérése után a hőátadás regenerálódásának következtében (lásd 1-4. *diagram*) [6], [7].

$$\frac{q_w}{G} \geq 0,95 \div 1,05 \text{ kJ/kg} \quad (1.1)$$

$$\frac{q_w}{G} \geq 0,68 \div 0,9 \text{ kJ/kg} \quad (1.2)$$

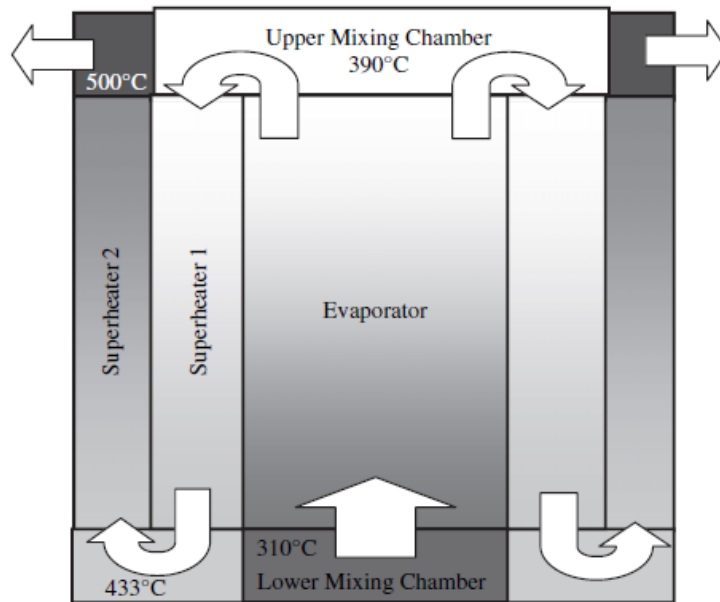
Jelenleg még nem világos, hogy a hőátadási módok közötti átmenet hogy zajlik le az NHT és EHT, valamint NHT/EHT és DHT viszonylat között, illetve hogy a DHT után miért jelenik meg az OHTR [6], [7].

A forráskrizis (DNB) és a hőátadási tényező elfajulása (DHT) között bizonyos analógia fennáll, azonban a hőátadási tényező elfajulása nem következik be annyira hirtelenül, mint a forráskrizis és nem is annyira veszélyes [6]. Az SCW hőátadása pedig egyértelműen és alapvetően egyfázisú jellegű, még ha némi analógia fel is fedezhető a forráskrizis és a hőátadási tényező elfajulása között.

1.2. A HPLWR és az SCWR-FQT projekt

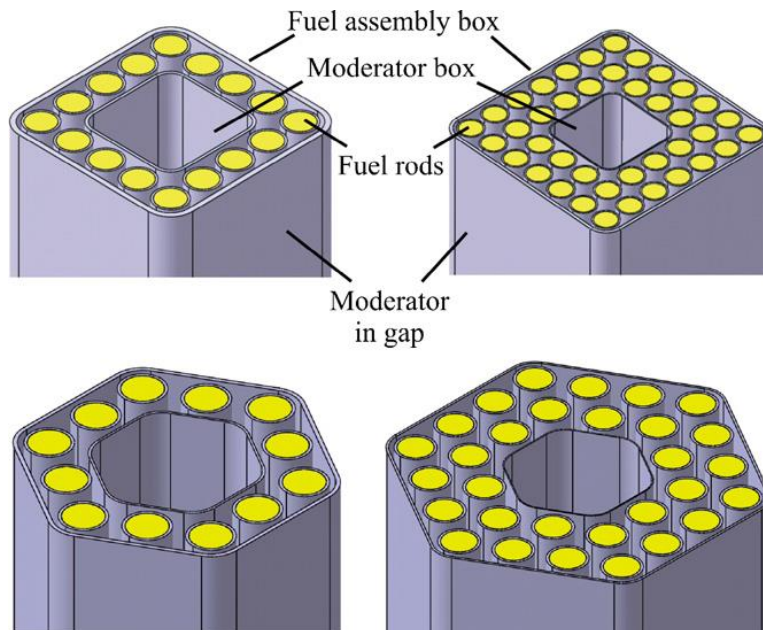
A világon több helyen is foglalkoznak SCWR-rel kapcsolatos kutatásokkal. Az SCWR európai koncepciója High Performance Light Water Reactor (HPLWR) néven ismert. A koncepció különlegessége, hogy az aktív zónában három párhuzamos huzam van kialakítva, és ebben történik a hűtőközeg felmelegítése, ugyanis egy lépésben nem megoldható a hűtőközeg 280°C-ról 500°C-ra történő felmelegítése. A huzamok kialakítását a 1-1. *ábra* mutatja. Mire a hűtőközeg az alsó keverőtérbe ér (a víz rudakon keresztül áramlik az alsó keverőtérbe, miközben moderátorként funkcionál), már 310°C a hőmérséklete. Az alsó keverőtérben összekeveredik a víz rudakon leáramlott hűtőközeg a leszálló gyűrűs csatornában leáramlott valamivel hidegebb hűtőközeggel és innen áramlik fel az első huzamban („Elgőzölögtető”) a felső keverőtérbe, mialatt a hőmérséklete 390°C-ra nő (vagyis a hűtőközeg szuperkritikus nyomású cseppfolyós tulajdonságú vízből szuperkritikus nyomású légnemű tulajdonságú vízzé alakul). A

második huzamban („Túlhevítő 1”) 433°C-ra emelkedik a közeg hőmérséklete, a harmadik huzamban („Túlhevítő 2”) pedig 500°C-ra, mely már a kilépő közeg hőmérséklete [8].



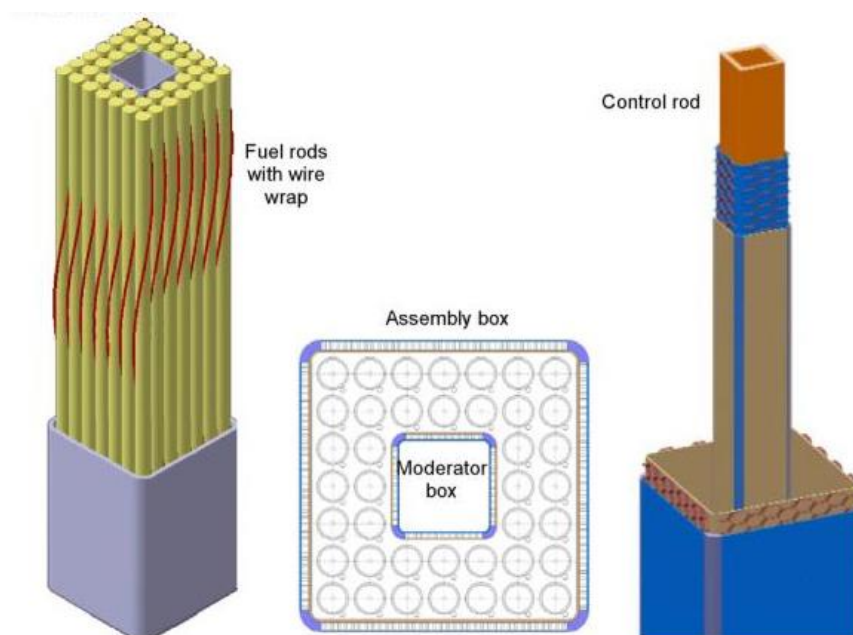
1-1. ábra: HPLWR aktív zóna kialakítása [8]

Az üzemanyag kazetták kialakítására többféle koncepció is született (lásd 1-2. ábra és 1-3. ábra). A kazettakialakítások közös jellemzője a kazetta közepén található víz rúd, melyben a belépő közeg áramlik, moderátorként [9].



1-2. ábra: HPLWR kazetta kialakítások [9]

A kazetta kialakítás belső szerkezetét a 1-3. ábra szemlélteti:



1-3. ábra: HPLWR kazetta belső szerkezete [10]

Mint látható, az egyes üzemanyagpálcákat helikális távtartó drótok (wire wrap) tartják a helyükön. A továbbiakban bemutatott SCWR-FQT (Supercritical Pressure Water Cooled Reactor-Fuel Qualification Test) projektben is ez az elrendezés szerepel.

Az SCWR-FQT projekt a HPLWR Phase 2 projekt folytatásának tekinthető üzemanyag minősítési tesztet előkészítő együttműködés. A projektet 2010-ben hirdették meg, amelyben 6 európai partner (köztük a BME NTI) dolgozott együtt. Maga a lényegi munka 2011 elején kezdődött és 2014 végén ért véget. A projekt célja egy tesztkör megtervezése és a tervek korszerű elemző kódokkal való analízise. A tesztkör a Prága melletti Řež –i kutatóintézet (CVR) LVR-15-ös reaktorába kerülne elhelyezésre 2015 után. Az analíziseknek olyan részletességűeknek kell lenniük, hogy a cseh nukleáris hatóságnál történő engedélyeztetési folyamatot is megalapozzák. Maga a teszt kör egy primer körből és egy-egy szekunder és tercier körből valamint kisegítő berendezésekből áll. A primer kör lényegi része, az úgynevezett aktív csatorna az LVR-15-ös reaktor egyik kazettája helyére kerül majd. Az aktív csatorna függőleges orientációjú, cső a csőben elrendezésű elem két-két felfelé és lefelé áramló huzammal. Az utolsó felfelé áramló huzam elején (alul) található a 680 mm magas tesztszakasz, fölötté egy 4,2 m magas ellenáramú hőcserélő (rekuperátor), majd a hűtő fokozat következik az aktív csatornából való kilépés előtt. Az aktív csatornában áramló közeg nyomása 25 MPa, hőmérséklete pedig 280-500°C között változik [5].

A tesztszakaszban 4 darab 7 mm belső és 8 mm külső átmérőjű 600 mm aktív (nukleárisan fűtött) hosszú üzemanyag fog helyet kapni, amelyeket axiális irányban alul és fölül egy-egy távtartó elem biztosít. Minden egyes pálcá köré egy-egy úgynevezett

helikális távtartót (wrapped wire spacer) tekernek majd, ami a radiális irányú távtartáson túl kiváló hűtőközeg keveredést okoz a tesztszakaszban. A BME NTI egyik feladata a tesztszakasz be- és kilépő geometriájának optimalizálása annak érdekében, hogy stabil és homogén belépő és megfelelő keveredést mutató kilépő áramképet biztosítsunk a majdani kísérletek során [5].

A projekt jobb átláthatósága érdekében a feladatokat munkacsoportokba (WP – Work Package) osztották. A BME NTI a WP 2-ben végzett munkákat, mely a normál üzemállapothoz tartozó vizsgálatokat végezte. Például a tesztkazetta geometriájának optimalizálása a be- és kiáramlási helyeken, vagy a rekuperátor fokozatra, mint ellenáramú hőcserélőre vonatkozó CFD számítások [11].

A projektben továbbá 9 kínai partner is részt vett, így adódott lehetőség a már megtervezett geometria tesztelésére. A kínai partnerek a SWAMUP nevű mérőkört ajánlották fel erre a célra, azonban az eredeti geometria helyett annak 1,25-szörösére nagyított mását tudták behelyezni a mérőkörbe.

A WP 2 2.4-es feladata volt a CFD kódok validálása a mérési eredmények tükrében, azonban mivel a mérési adatokat legkorábban is 2015 elejére ígérték, így csak vak benchmark analízis elvégzésére nyílt lehetőség, a SWAMUP mérőkörbe behelyezett geometria méreteit és a mérőkör normál üzemállapotát véve alapul. A különböző résztvevők számítási eredményeit összevetették egymással, majd a mérési eredmények megérkezése után magukkal a mérési eredményekkel is, így kapva információkat az egyes kódok egymáshoz és magához a méréshez való pontosságáról [12].

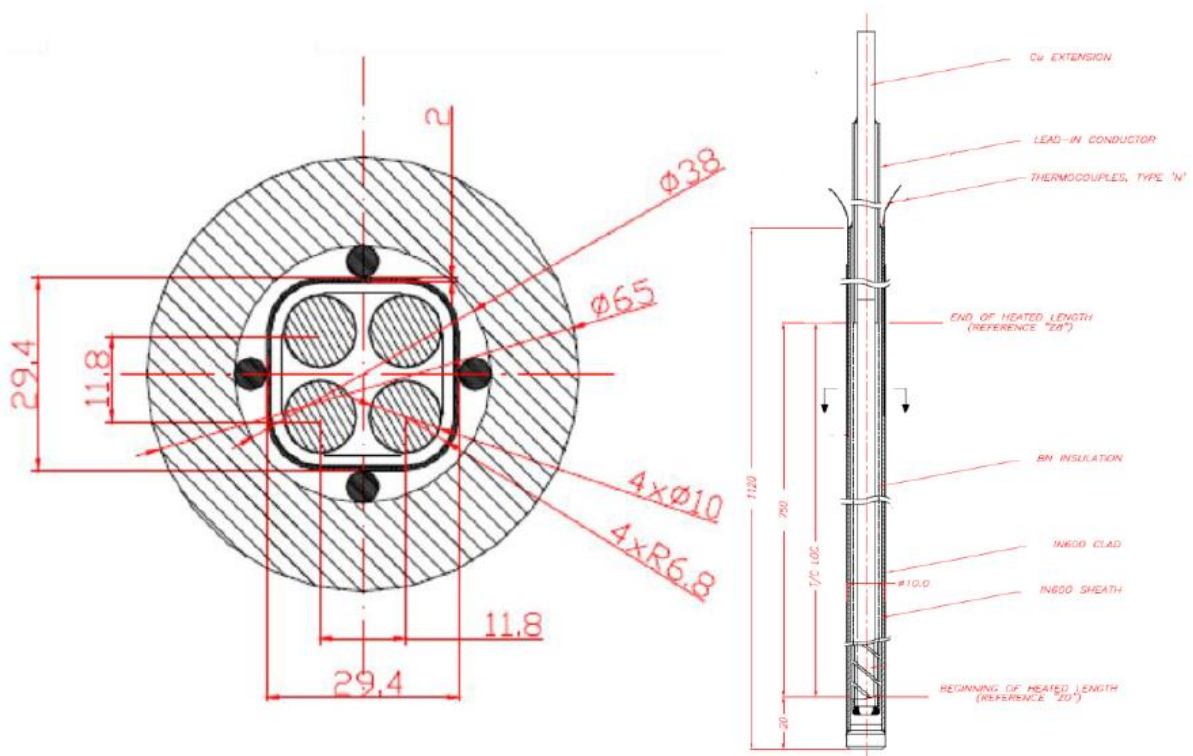
Ebben a számításban vettem én is részt, és ennek kidolgozását valamint az eredményeit fogom ismertetni a 2. fejezetben. A 3. fejezetben pedig az ebből a feladatból kiinduló további tanszéki munkák előzetes eredményeit fogom ismertetni.

2. AZ SCWR-FQT SWAMUP VAK BENCHMARK BEMUTATÁSA

2.1. Feladatkiírás, geometria, peremfeltételek

Tekintettel arra, hogy a benchmark feladat nagyon későn lett kiírva (2014. december 15.) és arra, hogy a különböző kódok összehasonlítása volt a cél, a feladatkiírással és a peremfeltételekkel együtt a résztvevők megkapták a kész számítási geometriát, valamint egy részletes táblázatot az eredmények kiértékeléséhez.

Fontos, hogy a jelenlegi geometria az eredeti 1,25-szörös mása, amely magában hordozza a peremfeltételek, a geometria, és ez által vélhetőleg az eredmények megváltozását is. Ebben a dolgozatban ezeket az új (tehát az eredeti modell 1,25-szörösére skálázott változatát) értékeket (geometria, peremfeltételek) közöljük.



2-1. ábra: Balra: a teszt szakasz keresztmetszete. Jobbra: egy darab fűtőpálca [12]

A 2-1. ábra mutatja a teszt szakasz keresztmetszetét valamint egy darab fűtőpalcát a releváns geometriai méretekkel. A további geometriai méreteket a 2-1. táblázat mutatja.

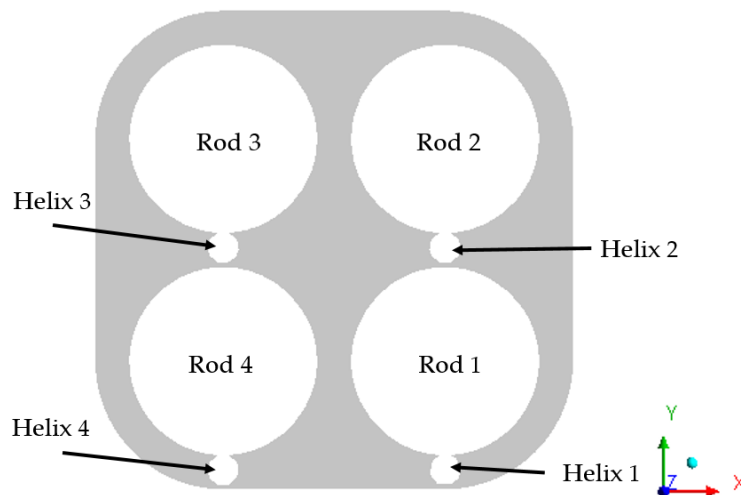
(A táblázatban az „áramlási csatorna” az üzemanyagköteget körülfogó szakaszra értendő.)

2-1. táblázat: Geometriai méretek [12]

Komponens/rész	Méret [mm]	z-pozíció [mm]
Áramlási csatorna hossza	820	(-35)-től 785-ig
Áramlási csatorna belső/külső szélessége	25,4 / 29,4	–
Áramlási csatorna falvastagsága	2	–
Alsó távtartó hossza	6	(-30)-től (-24)-ig
Fűtőpálcák hossza	1120	(-30)-től 1090-ig
Pálcák fűtött hossza	750	0-től 750-ig
Fűtött pálcák belső/külső átmérője	8,75 / 10	–
Fűtött pálcák falvastagsága	0,625	–
Pálcák osztása	11,8	–
Helikális távtartó átmérője	1,675	–
Helikális távtartó menetemelkedése	250	(-18)-től 840-ig

A helikális távtartók az óramutató járásával ellentétes irányba tekerednek az üzemanyagpálcák körül (áramlás irányával ellentétesen nézve). Szintén ebből az irányból nézve a fűtött szakasz elején (0 mm) a helikális távtartók 180°-tól indulnak (lásd 2-2. ábra).

z = 0 mm axiális magasságnál (a fűtött szakasz elejénél)



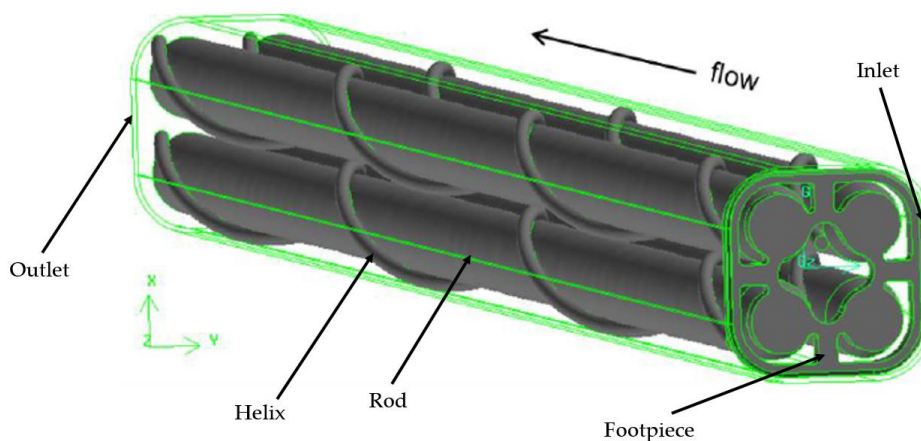
2-2. ábra: A helikális távtartók pozíciói a fűtött szakasz elején

A pálcák belülről elektromosan fűtöttek, a komponensek (pálcák, helikális távtartók, áramlási csatorna) anyaga Inconel-718. A hűtőközeg ionmentes víz. A peremfeltételeket (melyek a normális üzemi körülményeknek felelnek meg) a 2-2. táblázat mutatja.

2-2. táblázat: Peremfeltételek [12]

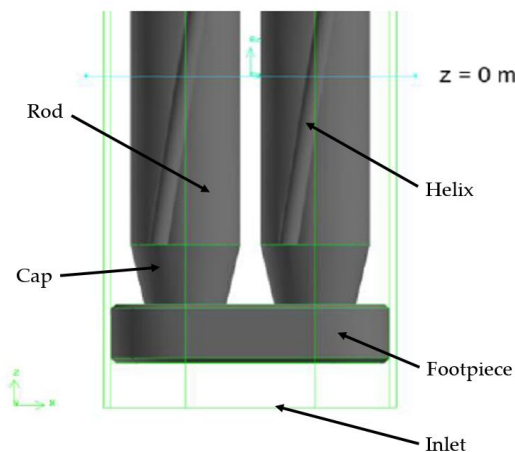
Peremfeltétel	Érték
Belépő nyomás	25 MPa
Belépő tömegáram	0,390625 kg/s (1,25 ² × 0,25 kg/s)
Belépő hőmérséklet	366°C
Fűtőteljesítmény	100 kW (25 kW per fűtőpálca) (1.25 ² × 64 kW)

A számítási geometriát a 2-3. ábra mutatja. Az áramlás belépése („Inlet”) után közvetlenül áthalad a lábrészen („Footpiece”), ami megtámasztja a négy fűtőelem pálcát („Rod 1-4”). A pálcák köré tekerednek a helikális távtartók („wrapped wires”). A számítási tartomány végén lép ki a közeg („Outlet”).



2-3. ábra: A számítási geometria [12]

A fűtött szakasz elejét a 2-4. ábra mutatja. Ezen az ábrán jól megfigyelhető a lábrészt és az üzemanyag pálcákat összekötő csonka kúp alakú elemek („Caps”).



2-4. ábra: A fűtött szakasz eleje: z = 0 m-nél kezdődik a fűtött szakasz [12]

A hálóparaméterek megválasztásánál annyi kikötést kaptak a résztvevők, hogy a más korábbi számításokhoz használt hálóparaméterektől ne nagyon térjenek el. Ezt mi is követtük, egyrészt, mert ez szerepelt a kiírásban, másrészt pedig, mert a határidő szűkössége miatt nem maradt időnk hálóérzékenységi vizsgálatokat végezni (ezeket utólagosan végeztük el). Továbbá amennyiben mód van rá, a CFD modell beállításai is feleljenek meg a korábban használtaknak.

A mellékelt geometria kibővítését, a várhatóan magas elemszám miatt nem tartottuk célszerűnek, így az általam választott belépés előtti áramlási csatorna hatását elhanyagoltam. Az áramlási csatorna külső felületén a folyadék hőmérsékletet a belépő hőmérséklettel (366°C) azonosnak tételeztük fel, mivel a benchmark feladat minden résztvevője maga dönthette el, hogy a csatorna falon fellépő hőveszteséget figyelembe veszi-e vagy sem. A fűtőteljesítmény pedig állandónak tekinthető a pálcák belső fűtött felületén (z = 0 mm-től z = 750 mm-ig) [12].

A számítási eredmények közül szükség volt a pálcák belső és külső felületén a maximális hőmérséklet helyére és értékére, a leadott hőteljesítményekre (külső falról; pálca külső felületről és helikális távtartó külső felületről a hűtőközegnek), nyomás, tömegáram és hűtőközeg hőmérséklet a be- és kilépésnél, valamint axiális profilokban hőmérséklet maximális, minimális és átlag értékek a fűtőpálcák külső és belső felületén és y_{1+} átlag értékek a fűtőpálcák külső felületén.

A SWAMUP mérőkörbe beépített modellben 32 termoelem található (8 db / fűtőelem pálca) melyek pozícióit a 2-3. táblázat mutatja. Ezek alapján vethetőek össze a CFD szimulációk és a mérések eredményei (BHL: Beginning of Heated Length – a fűtött szakasz kezdete). Az egyes axiális magasságokon a termoelemek fokban mért pozíciói azonosak voltak, de axiális magasságoként változtak.

2-3. táblázat: Termoelemek pozíciói [12]

Position	Location From BHL	Circumferential Location From BHL
Z1	Z=31.25mm	90°
Z2	Z=62.5mm	45°
Z3	Z=125mm	180°
Z4	Z=250mm	135°
Z5	Z=375mm	270°
Z6	Z=500mm	225°
Z7	Z=625mm	0°
Z8	Z=750mm	315°

2.2. 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 [13]). A geometria diszkretizálását az ANSYS ICEM 14.5-ös verziójával végeztük el. A számításaink során több különböző CFX modellt is készítettünk egyazon geometriára és hálóra, mely a felhasznált turbulencia modellben tért el.

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 történik a számítási tartományban, másik modellt kell alkalmazni [13].
- **SST (Shear Stress Transport)**: a modell sokkal jobb fal melletti felbontást eredményezhet, mint a k- ϵ modell, ezért határolt térben történő pontosabb 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 [13].
- **BSL (Baseline) 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 a BSL modell további 6 transzport egyenletet tartalmaz a hat Reynolds feszültség komponensre). ω bázisú, mely a határréteg leválás pontosabb megbecsülését teszi lehetővé. Anizotróp turbulenciát modellez [13].

Az analízis típusa lehet *steady state* (állandósult állapotot kiszámoló) vagy *transient* (tranziens). Steady state esetben a modell nem veszi figyelembe az időfüggő tagokat a megoldott egyenletekben, ennél fogva nem tart annyira sokáig, mint egy tranziens számítás. A számításokat állandósult állapotra végeztük el. Először a k- ϵ turbulencia modellt alkalmazó számításokat futtattuk le, a modell jó konvergáló képessége és robosztussága miatt. Az így kapott számítási eredményeket felhasználva kezdeti feltételként végeztük a következő számítást az SST modellel. Az SST modellel végzett számítások eredményeit szintén kezdeti feltételként használtuk fel a BSL modelles számításhoz. A szakirodalom alapján ez a legpontosabb turbulencia modell a CFX kódban, ezért a BSL modellel kapott eredményeket tekintettük a végső eredménynek.

2.3. A CFX modell elkészítése

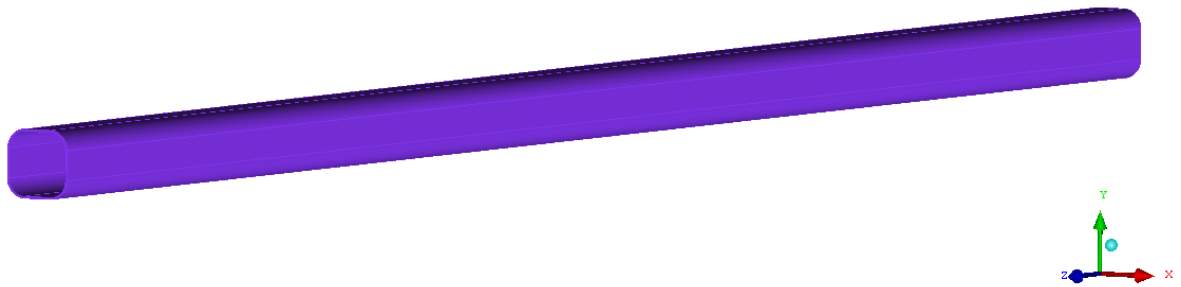
Mivel a benchmark feladat 2014. december 15-én lett kiírva és az eredményeket 2015. január 30-ig kellett beküldeni, ezért gyorsan kellett dolgoznunk. Ez azt eredményezte, hogy nem tudtunk annyi időt szentelni a geometria diszkretizálására, amennyit szeretnénk volna: nem volt időnk hálóérzékenységi vizsgálatot végezni, valamint nem volt időnk optimalizálni az egyes elemek rácsait. A számítások elvégzése és az eredmények beküldése után volt időnk tökéletesíteni a modellünket, ez alatt apróbb geometriai egyszerűsítéseket, valamint a rács (háló) elemszámának optimalizálást kell érteni. Hogy a két modellt (az eredetit és a továbbfejlesztett változatot) meg lehessen különböztetni egymástól, ezentúl a most bevezetett jelöléssel fogok hivatkozni az egyes modellekre.

- **ww_3o**: ez az eredeti modell, a „ww” a *wire wrap* (azaz *helikális távtartó*) rövidítése, a „3” a távtartó körülfordulásának száma a fűtőelem pálcák fűtött szakasza körül, az „o” az *original* (vagyis *eredeti*) szó rövidítése;
- **ww_3**: ez jelöli a továbbfejlesztett modellt.

A továbbiakban a hálók elkészítését, valamint a CFX modell elkészítését mutatom be. A leírtak vonatkoznak mind a ww_3o, mind a ww_3 modellekre, ez alól egyedül a 2.3.3 alfejezet képez kivételt, mely csak a ww_3o modellre vonatkozik. A 2.4 fejezet mutatja majd be az érzékenységi vizsgálatokat, melyek alapján a ww_3o továbbfejlesztését elvégeztük. A 2.5 fejezet mutatja be a modell továbbfejlesztett változatát. Itt már csak azok a különbségek lesznek ismertetve, melyek eltérnek a 2.3 fejezetben leírtaktól. Ez néhány kisebb geometriai változást foglal magába, valamint a 2.3.3 alfejezetben bemutatott hálók továbbfejlesztett változatait. A 2.5 fejezet végén kerülnek táblázatos formában összefoglalásra a két modell közötti lényegi különbségek, a 2.6 fejezetben pedig az eredményeket mutatom be.

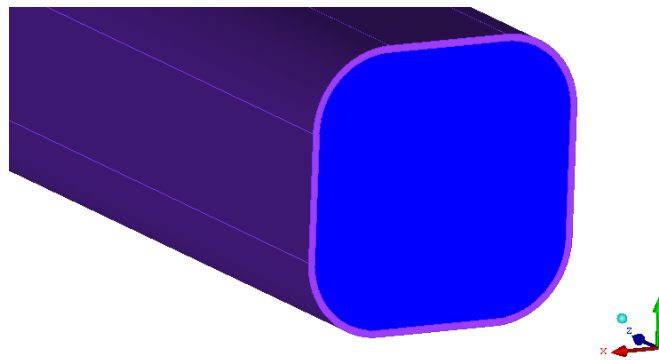
2.3.1. A GEOMETRIA ELEMEI

A tesztkazetta fala vagy „Shroud” (2-5. *ábra*): ez az áramlási csatorna külső fala, mely elválasztja a lefelé és felfelé haladó hűtőközeget. A csatornán kívül a hűtőközeg lefelé halad (-z irány), átmegy a fordítókamrán majd a csatornán belülré kerülve felfelé haladva (+z irány) felmelegszik az üzemanyagpálcák között. A lefelé áramló hűtőközeget nem modellezzük, úgy tekintjük, hogy az itt áramló közeg hőmérséklete mindenhol 366°C (ezt használjuk peremfeltételként a Shroud külső felületén). A fordítókamra sem került bele a geometriába.



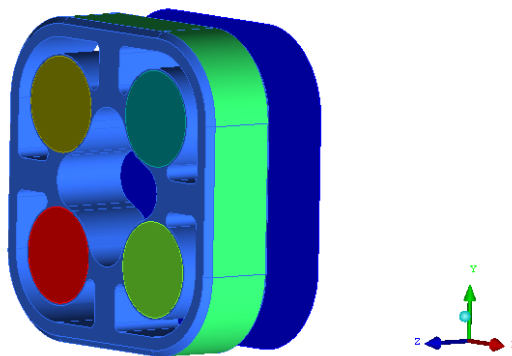
2-5. ábra: A tesztkazetta fala („Shroud”)

A belépés vagy „Inlet” (2-6. ábra): a számítási tartományba itt lép be a hűtőközeg.



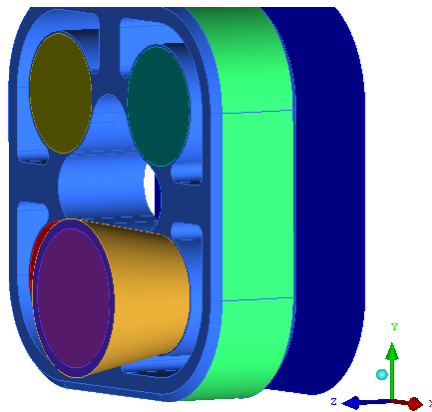
2-6. ábra: A belépési felület vagy „Inlet”

A lábész vagy „Footpiece” (2-7. ábra): az alsó távtartó, ez támasztja meg a kazettákat. Távolsága az Inlet-től 5 mm (Lásd még a 2-3. ábra valamint a 2-4. ábra megfelelő részét).



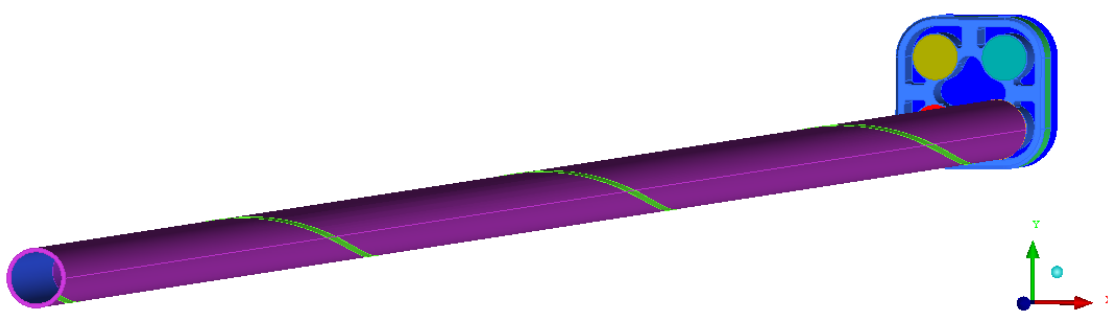
2-7. ábra: A lábész vagy „Footpiece”

Az összekötő elemek vagy „Cap1-2-3-4” (2-8. ábra): Az üzemanyagpálca alsó része, mely a Footpiece-hez csatlakozik. A valóságban ez nem különálló alkatrész, hanem az üzemanyagpálca része, viszont a diszkretizálás miatt érdemesebb külön alkatrészként kezelni.



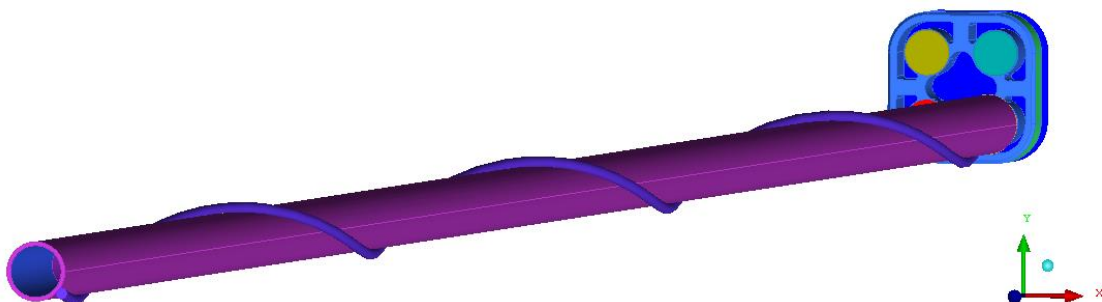
2-8. ábra: Egy összekötő elem vagy „Cap”

A fűtőelem pálcá vagy „Rod1-2-3-4” (2-9. ábra): Maga a fűtőelem pálcá.



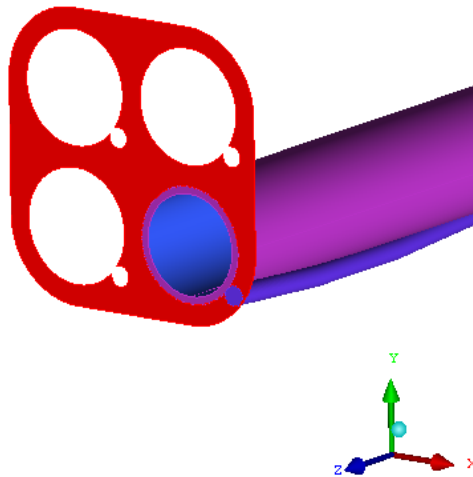
2-9. ábra: A fűtőelem pálcá vagy „Rod”

A helikális távtartó vagy „Helix1-2-3-4” (2-10. ábra): A helikális távtartó, amely mind a négy fűtőelem pálcá köré tekeredik és biztosítja a pálcák egymáshoz képesti helyzetét valamint fokozza a pálcák külső fala és a hűtőközeg közötti hőátadást.



2-10. ábra: A helikális távtartó vagy „Helix”

A kilépés vagy „Outlet” (2-11. ábra): A számítási tartomány vége, a már felmelegített hűtőközeg itt lép ki a számítási tartományból.



2-11. ábra: A kilépés vagy „Outlet”

A folyadék tartomány vagy „Fluid”: az eddig bemutatott geometriai elemek vagy képzeletbeli felületek voltak, melyek a számítási tartomány határát jelölik és a be-, valamint kilépő peremfeltételek megadásának helyéül szolgálnak (Inlet, Outlet), vagy pedig a Solid (szilárd, jelen esetben Inconel-718) doménhez tartoztak. A számítási geometria többi részét (tehát gyakorlatilag a Solid domén által nem kitöltött térfogat) a Fluid domén teszi ki (esetünkben SCW: szuperkritikus nyomású víz). A Solid alkatrészek külső felületeit felhasználva tudjuk diszkretizálni a Fluid domént. A Fluid domént a be- és kilépő szakaszokon az Inlet és Outlet határolják.

2.3.2. A GEOMETRIA KÉSZÍTÉSÉRŐL ÁLTALÁBAN, A CFD MÓDSZEREKKEL MEGOLDHATÓ GEOMETRIÁK LIMITÁCIÓI

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 elvégezhetőek 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

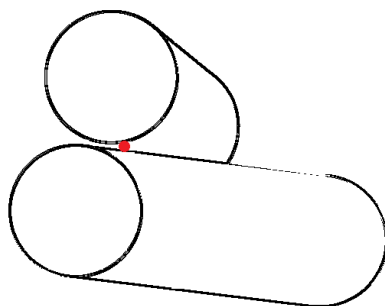
gyorsan van szükségünk, nem foghatunk bele egy olyan modell elkészítésébe, mely csak hónapok múlva képes eredményeket szolgáltatni.

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.

Ezen kívül van még egy szempont, mely a numerikus módszereket érinti, ez pedig a geometria diszkretizálhatósága.

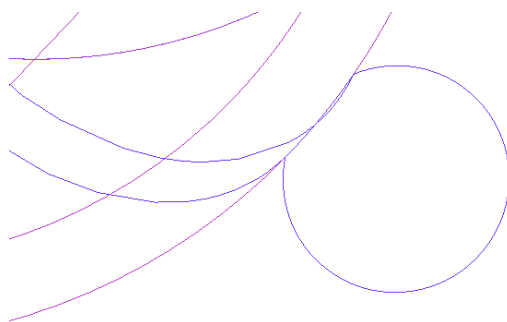
A fentebb bemutatott geometrián egy ilyen jellegű átalakítás található, ezt fogom az alábbiakban ismertetni és bemutatni.

Ha két hengert a 2-12. ábra alapján feltüntetett módon egymásra teszünk, a két test mindössze egy ponton érintkezik (az ábrán piros színnel jelölve).



2-12. ábra: Két, egymással nem párhuzamosan érintkező henger felületeinek közös pontja

Ha az egyik hengert elforgatjuk a másik körül (rácsavarjuk, mint ahogyan a helikális távtartó csavarodik rá a fűtőpálcára) az érintkezési pontból egy vonal lesz. Ezen az érintkezési ponton adódik át a hő a fűtőelemből a helikális távtartóba. Azonban egy CFD kód ezt nem tudja lekezelni, a számítás vagy le sem futna, vagy rossz eredményt adna. Valamekkora érintkezési felületre szükség van arra, hogy a hőtranszport egyenleteket meg tudja oldani a program, éppen ezért a helikális távtartó egy picit bele van süllyesztve az üzemanyagpálcába (2-13. ábra). Ez a számítást nem befolyásolja jelentősen, tizedmilliméterekről van szó, azonban így a kód már jó eredményt fog adni, mert az érintkezési vonalból érintkezési felület lett.

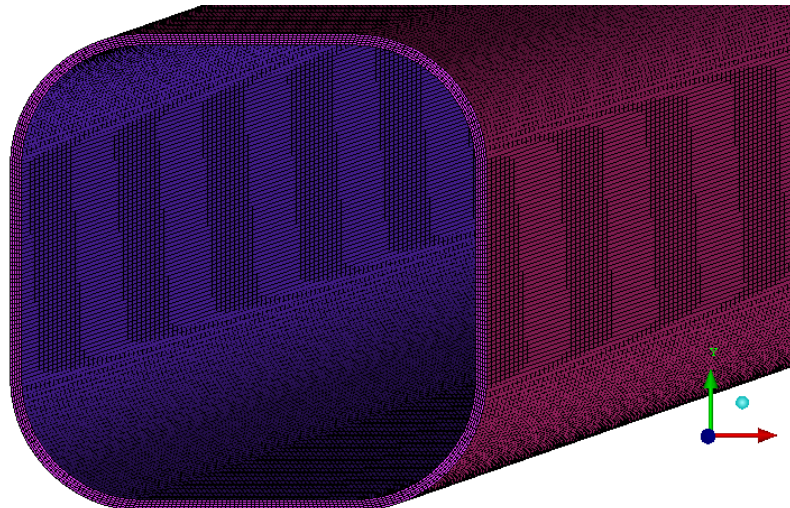


2-13. ábra: A „Helix” és „Rod” érintkezésének modellje

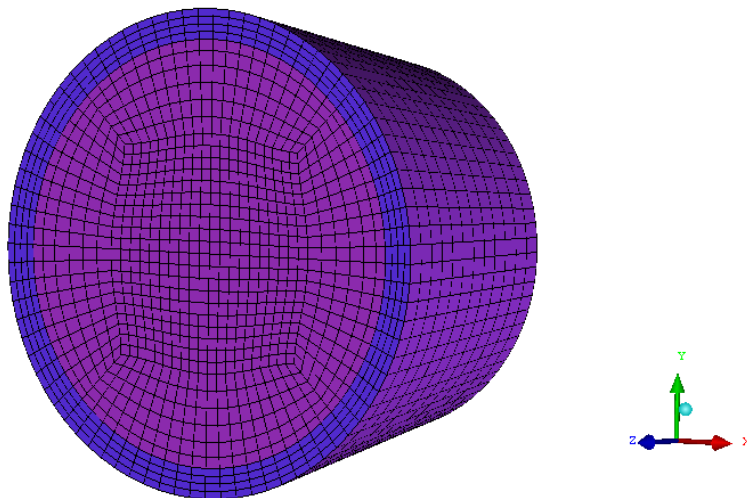
2.3.3. A GEOMETRIA DISZKRETIZÁLÁSA (ww_3o)

Az ICEM és a CFX több lehetőséget is kínál a geometria felbontására. A legegyszerűbb lehetőség a tetraéder háló, mely a térfogatot tetraéderekre bontja fel. Ennek előnye, hogy szinte bármilyen geometriát egyszerűen fel lehet vele bontani, hátránya azonban, hogy igen nagy elemszámokkal dolgozik, ezért a számítás igen erőforrás igényessé válhat. Egy másik lehetőség a blokkstruktúrált hexaéder háló, mely elkészítése sok időt vesz igénybe, azonban átlagosan kevesebb elemmel dolgozik. Ezen kívül vannak az úgynevezett prizmatikus elemek, melyekkel a tetraéder háló határretegét bontjuk fel. A geometria diszkretizálásához ezt a háromféle hálót alkalmaztuk.

Az elsődleges célunk a lehető legtöbb blokkstruktúrált háló alkalmazása volt, azonban az idő szűkössége miatt csak nagyon kevés esetben tudtuk alkalmazni. Blokkstruktúrált hálót kapott a Shroud (2-14. ábra) és a Cap-ek (2-15. ábra).

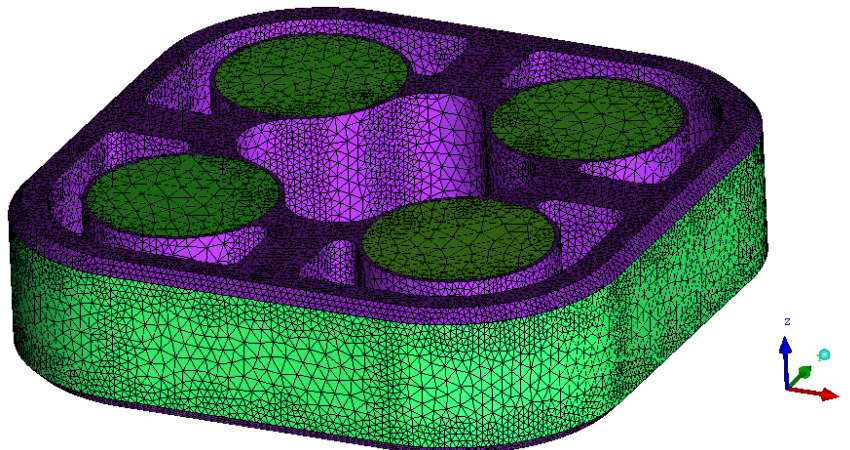


2-14. ábra: A „Shroud” hálója (ww_3o)

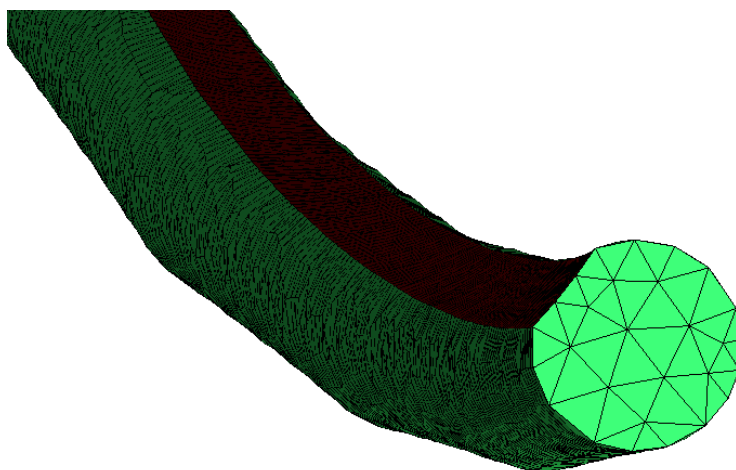


2-15. ábra: A Cap hálója (ww_3o)

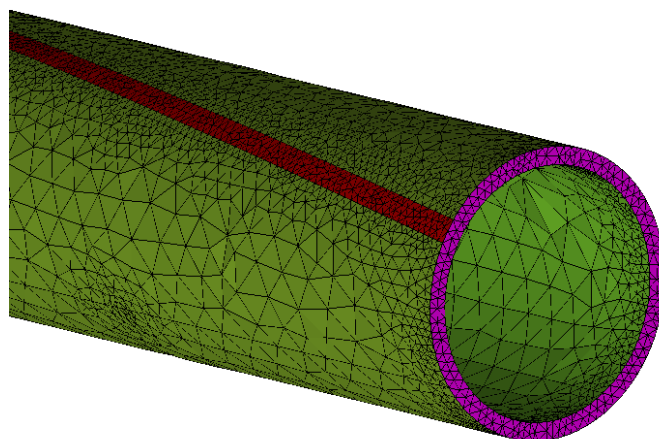
A további elemek tetraéder hálóval diszkretizáltak (2-16. ábra, 2-17. ábra, 2-18. ábra, 2-19. ábra), a Fluid domén határrétegét pedig prizmatikus elemekkel bontottuk fel (2-20. ábra).



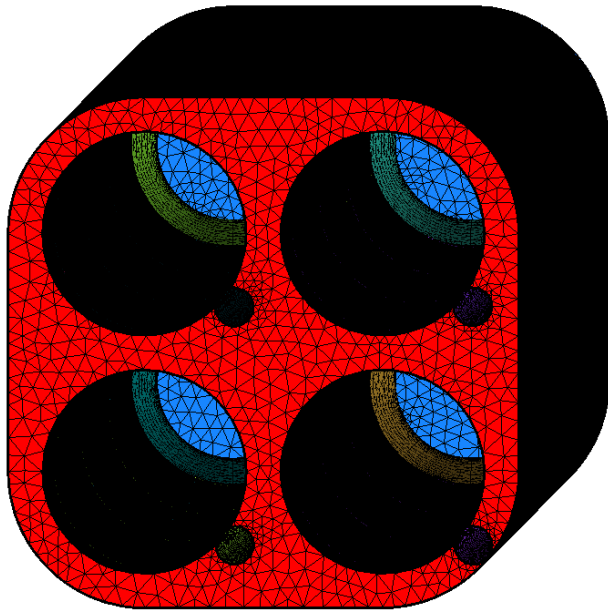
2-16. ábra: A „Footpiece” hálója (ww_3o)



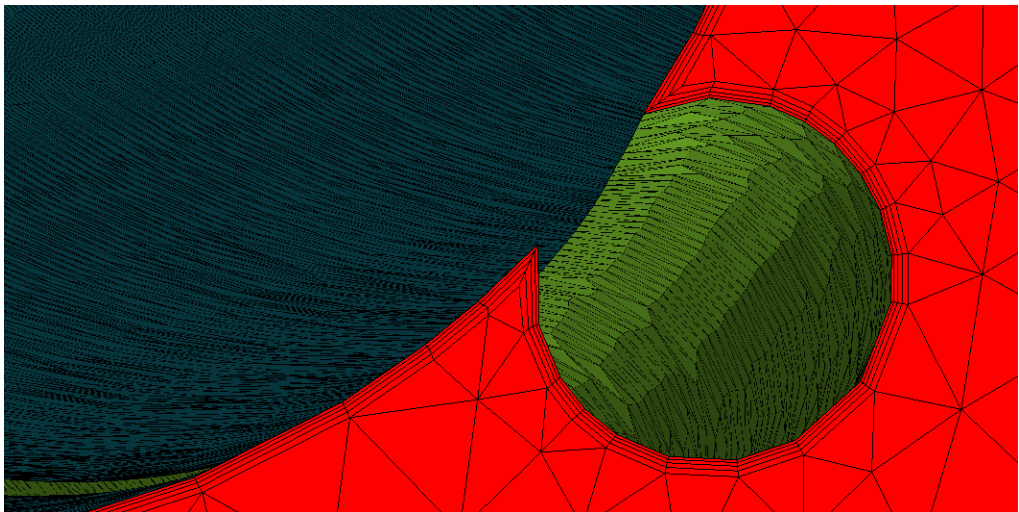
2-17. ábra: A „Helix” hálója (ww_3o)



2-18. ábra: A „Rod” hálója (ww_3o)



2-19. ábra: A „Fluid” hálója (ww_3o)

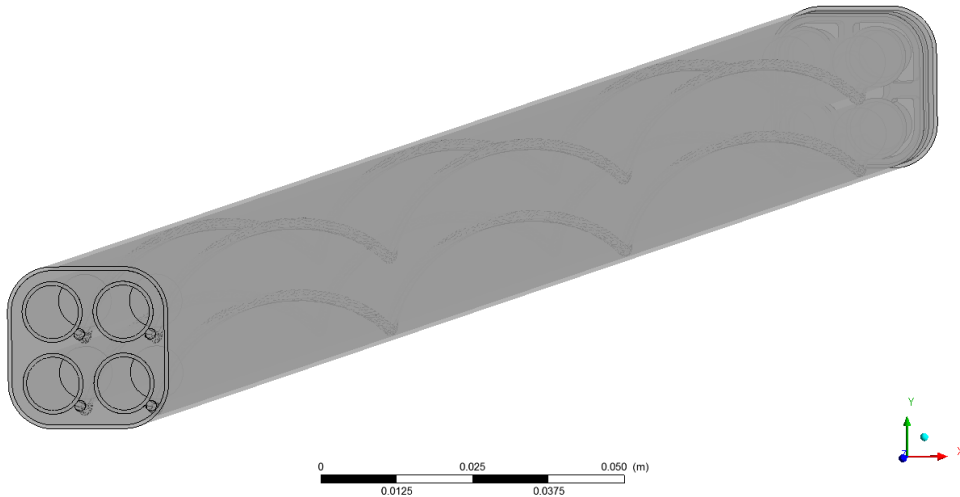


2-20. ábra: A „Fluid” háló határrétege (ww_3o)

2.3.4. A CFX MODELL ELKÉSZÍTÉSE

A hálók elkészítése után a CFD modellt kellett összeállítani. Ehhez az ANSYS CFX-Pre 14.5 programot használtuk.

Első lépésként be kellett olvasni a hálókat (lásd 2-21. *ábra*).



2-21. *ábra*: A beolvasott hálók összeszerkesztett egysége

Ez után be kellett állítani az anyagjellemzőket, a peremfeltételeket, kezdeti feltételeket, az iterációk számát, leállítási feltételként a reziduális értékeket, a turbulencia modellt, a referencia nyomást, a turbulens és az advekción tagok numerikus sémáit, az analízis típusát, monitor pontokat és az ezekben monitorozott értékeket (ezeknek a számítás futása alatt volt szerepe).

Anyagjellemzők:

- Solid domén: anyaga Inconel-718. A CFX alap értékei között nem szerepelt, nekünk kellett létrehozni. Az anyag sűrűségére és fajhőjére volt szükségünk. Az általunk felhasznált értékek: a sűrűség $8193,25 \text{ kg/m}^3$, míg a fajhője $435,43 \text{ J/(kg K)}$ értékre lett beállítva.
- Fluid domén: anyaga SCW. Ezt az anyagot is nekünk kellett létrehozni az IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam) könyvtárból. Az értékek generálásánál a következő határokat használtuk: a hőmérséklet tartománya 300°C és 800°C közötti, míg a nyomás tartománya 249 bar és 251 bar közötti (a határokat a peremfeltételeket figyelembe véve állítottuk be). Az értékek generálását 1000 pontban végeztük el, az extrapolációt megengedve a hőmérséklet és nyomás értékekre is. Ezzel az anyagjellemzők táblázatos megadásával nem csupán a hőmérséklet, de a nyomásfüggésüket is figyelembe akartuk venni a modellezésnél, amely az irodalom alapján ([7], [14]) bizonyos körülmények között fontos lehet.

Referencia értékek:

A SCW közeg referencia nyomását 25 MPa-nak vettük fel a peremfeltételeket alapul véve, valamint a felhajtóerőt figyelembe vevő számítási módot használtunk (bouyant flow), ahol referencia sűrűségnek 600 kg/m^3 -at adtunk meg.

Peremfeltételek:

- Inlet: belépési peremfeltételnek a tömegáramot adtuk meg ($0,390625 \text{ kg/s}$), és a megadott 366°C -os hőmérsékletet, valamint a turbulencia intenzitását, melyet 5%-os értékre vettünk fel.
- Outlet: kilépési peremfeltételnek az átlagos statikus nyomást adtuk meg, melynek értéke 0 Pa , amely $\pm 5\%$ -ban változhatott.
- Adiabatikus falak: a falak esetében „No-slip wall” peremfeltételt alkalmaztunk, vagyis közvetlenül a falnál a folyadék sebessége 0 a falhoz képest. A Fluid domén összes, az Inlettől és Outlettől különböző felületére ezt a peremfeltételt adtuk meg (tehát a Shroud, Footpiece, Cap-ek, Rod-ok és helikális távtartók esetében).
- Shroud külső fal: állandó hőmérséklet (366°C).
- Fűtött felületek: a négy fűtőelem pálca belső felületén $1\,212\,609 \text{ W/m}^2$ értékű hőfluxus állítottam be.

Interface-k:

Interface-nek azt nevezzük, ahol két felület találkozik. A felületek lehetnek eltérő (Solid-Fluid) vagy azonos domének (Solid-Solid, Fluid-Fluid), háló struktúrájuk is lehet eltérő vagy azonos. Esetünkben voltak Solid-Solid és Fluid-Solid Interface-k is. Maga a csatlakozás GGI típusú (General Grid Interface) volt, melyet a legtöbb esetben használni szoktak.

Iterációk száma:

Az iterációk számát minimum 200-ra és maximum 1000-re állítottuk be. Ebben az iterációs tartományban a számítások alacsony RMS maradvány (reziduális) értékekhez konvergáltak be, a megmaradási egyenletek teljesülését számszerűsítő úgynevezett „imbalanz” értékek pedig közel 0 értéket vettek fel.

A turbulens és advekción tagok numerikus sémája:

Az advekción tagok esetében „High Resolution” másodrendű sémát alkalmaztuk, a turbulens tagok numerikus sémája „First Order” volt annak érdekében, hogy beleférjen a legnagyobb modellünk is a számításokra rendelkezésre álló számítógép klaszter kapacitástartományába, illetve gyorsabban lefussanak az egyes számítások.

Analízis típusa:

Az analízist állandósult állapotra (*Steady state*) végeztük el.

Reziduális értékek:

Reziduálisok RMS célértékének 10^{-6} -ont állítottunk be. Ez azt jelenti, hogy futás közben a program vizsgálja, hogy milyen alacsony értékhez és mennyire konvergál a számítás, és ha eléri a beállított reziduális RMS értéket valamennyi egyenlet reziduálisa, a számítás automatikusan leáll (feltéve, hogy a minimálisan beállított iterációk számát már és a maximálisan beállított értéket pedig még nem érte el a számítás).

Monitor pontok:

A modellben három monitor pontot vettünk fel, az elsőt az Inlet-en (0; 0; -0,035 [m]), a másodikat az áramlási csatorna közepén (0; 0; 0,35 [m]), a harmadikat pedig az Outlet-en (0; 0; 0,785 [m]). A pontokon monitoroztuk a hőmérséklet, nyomás, turbulens kinetikus energia és sebesség értékeket. Egy számítást akkor is leállítottunk, ha nem érte el a beállított reziduális RMS értékeket, de a monitor pontokban a fizikai változók bekonvergáltak egy állandó értékre.

A számítógép klaszter:

A számításokat a BME NTI Alfonz névre elkeresztelt számítógép klaszterén nagyteljesítményű CFD számításra lehetőséget teremtő párhuzamosított számítási módban végeztük el. Az Alfonz klaszter két számítási sorában végeztünk számításokat: az egy GB-os sorban 24 szálon, míg a 2 GB-os sorban 16 szálon. Hogy mikor melyik számítási sort használtuk, azt a modell nagysága (hálómérete) és az ebből következő memóriaigénye döntötte el.

2.4. Érzékenységi vizsgálatok

A ww_3o kiértékelése és az eredmények beküldése után a modell fejlesztésével kezdtünk foglalkozni. Első lépésként a ww_3o geometriáját felhasználva hálóérzékenységi vizsgálatot, határréteg érzékenységi vizsgálatot, valamint turbulencia modell érzékenységi vizsgálatot végeztünk.

Egy igényes CFD vizsgálatnál ezekre a vizsgálatokra szükség van, mivel a számítási eredmény különböző numerikus paraméterekre (pl. hálósűrűség, elvégzett beállítások, használt modellek, stb.) való érzékenységét fel kell mérni. Továbbá az eredmények pontosságát rendelkezésre álló pontos megoldás, pl. mérési eredmény segítségével illetve a számítás időhosszát optimálni szükséges az érzékenységi vizsgálatok alapján.

2.4.1. HÁLÓ ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLAT

A hálóparaméterek, melyekkel dolgoztunk, a feladatkiírás szerint már adottak voltak (lásd 2.1 alfejezet). Azonban ez nem jelenti azt, hogy a hálóparaméterek, melyeket használtunk, a legjobb felbontást adják. A CFD számításoknál minél finomabb hálót használunk, elvileg az eredményünk annál pontosabb, azonban van egy határ,elynél tovább finomítva a hálót már nem kapunk más eredményt, a számítási idő azonban drasztikusan megnő. A hálóparaméterek eredményekre gyakorolt hatásának a felmérésére és a számítás időhosszának az optimalizálására használják a háló érzékenységi vizsgálatot. A vizsgálat maga úgy zajlik, hogy a vizsgálni kívánt geometriára (vagy annak csak egy részére) elkészítünk 3 vagy több (a rendelkezésre álló idő dönti el, hogy mennyit), eltérő finomságú hálót, ezeken számításokat végzünk, és az eredményeket ábrázoljuk. Kiválasztunk néhány célparamétert, amelyek legjobban reprezentálják a vizsgált áramlási folyamat jellegét. Ezek lehetnek dimenziós vagy normalizált változók és ezeket ábrázoljuk az elemszám függvényében. Egy bizonyos elemszám fölött a változók értéke már nem változik, „telítésbe megy”, a számítási időigény azonban a rács nagyságával közel arányosan nő. Ennél az elemszámnál kisebb hálót választva a számítási eredményünk jelentősen változhat.

A ww_3o-hoz készített háló pontosságáról nem állt rendelkezésünkre információ. Azt tudtuk, hogy megközelítőleg jó eredményt kell adnia (legalábbis az eredeti geometriára jól bevizsgált eredményt adott), de az esetleges pontosításokhoz ennél több adatra volt szükségünk, ezért elvégeztük ezt a vizsgálatot.

A Solid domén hálóiban csak hővezetést modelleztünk, míg a Fluid doménban hőterjedésen (hőátadás és hővezetés) kívül az SCW közeg áramlása is. Éppen ezért a Solid domén számunkra csak annyiban érdekes, hogy a hővezetést megfelelően tudjuk számolni benne, és CFD kódokban ehhez egy, a fluid doméneknél megszokotthoz képest durvább háló is elegendő. A Fluid domén ellenben sokkal finomabb hálót igényel, éppen ezért a hálóérzékenységi vizsgálatot is csak ez esetben végeztük el. A ww_3o Fluid hálóját M4 jelöléssel láttuk el. Az „M” a hálót jelöli (mesh), a „4” pedig a háló finomságára utal (jelentősége onnantól van, hogy egy geometriához több finomságú hálót készítünk, ekkor például tudjuk, ha van egy M4-es és egy M6-os hálónk, akkor ez utóbbi az előbbinél másfélszer több elemet tartalmaz).

Amellett döntöttünk, hogy az alaphálón (M4) kívül két további hálót hozunk létre, melyek közül az egyik az eredeti háló elemszámainak a duplája lesz (M8), a másik pedig a fele (M2), így be tudjuk határolni, hogy az eredeti háló nagyjából hol helyezkedik el a hálóérzékenységet szemléltető görbén.

A hálók készítésekor nyilvánvalóvá vált, hogy az M2 háló létrehozása lehetetlen, a geometria méretei miatt ugyanis egy bizonyos elemszám alá nem lehet menni anélkül, hogy egy nagyon torz hálót ne kapnánk. Az M8 hálót szintén nem sikerült létrehozunk, ugyanis a számítási erőforrásaink végesek, és a modellünket nem tudtuk volna

lefuttatni. Így végül kompromisszumos megoldást választottunk, az M2-es háló nagyobb lett, mint az M4-es háló fele, az M8-as háló pedig kisebb, mint az M4-es háló duplája. Az eredményeket a 2-4. táblázat mutatja. A vizsgálatot BSL Reynolds Stress turbulencia modellt használva végeztük el.

2-4. táblázat: Háló érzékenységi vizsgálat

Rács	Elem szám	Nódusok száma
M2	8 367 095	2 388 531
M4 (ww_3o)	13 709 617	3 894 070
M8	16 635 531	4 488 491

Az ábrázolt normalizált paramétereink a normalizált sebesség és hőmérséklet lettek. Számítási módjukat a (2-1) és (2-2) egyenlet ismerteti.

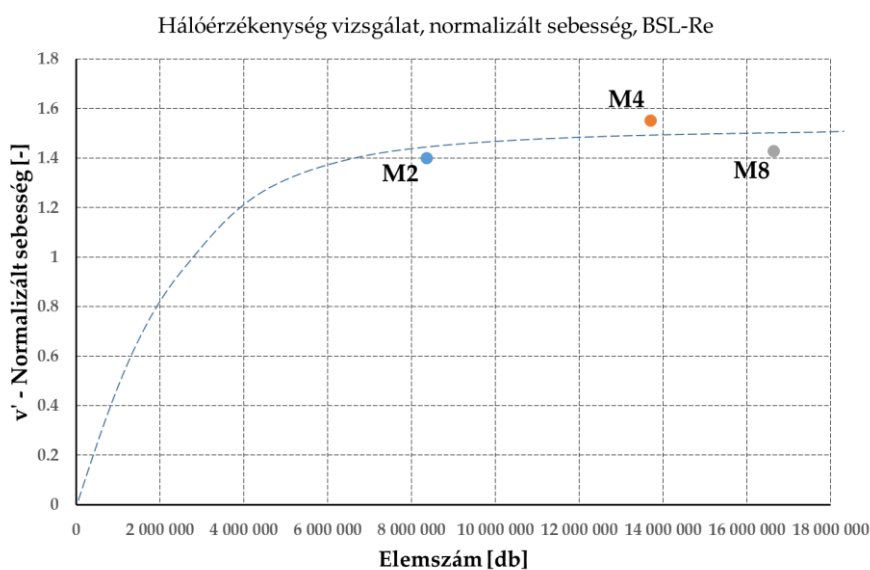
$$v' = \frac{v_{max} - v_{in}}{\overline{v_{out}} - v_{in}} \quad (2-1)$$

Ahol v' a normalizált sebesség, v_{max} a maximális sebesség, v_{in} a belépő sebesség és $\overline{v_{out}}$ az átlagos kilépő sebesség.

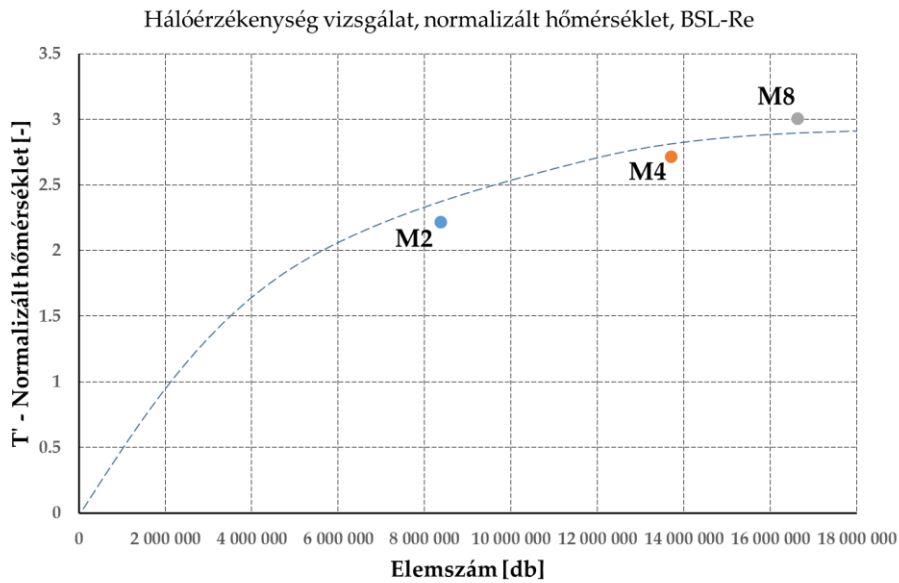
$$T' = \frac{T_{max} - T_{in}}{\overline{T_{out}} - T_{in}} \quad (2-2)$$

Ahol T' a normalizált hőmérséklet, T_{max} a maximális hőmérséklet, T_{in} a belépő hőmérséklet és $\overline{T_{out}}$ az átlagos kilépő hőmérséklet.

A 2-1. diagram ábrázolja a normalizált sebességet az elemszám függvényében, a 2-2. diagram pedig a normalizált hőmérsékletet az elemszám függvényében. Kék szaggatott vonallal jelöltük a hálóérzékenységet szemléltető görbét.



2-1. diagram: A normalizált sebesség az elemszám függvényében

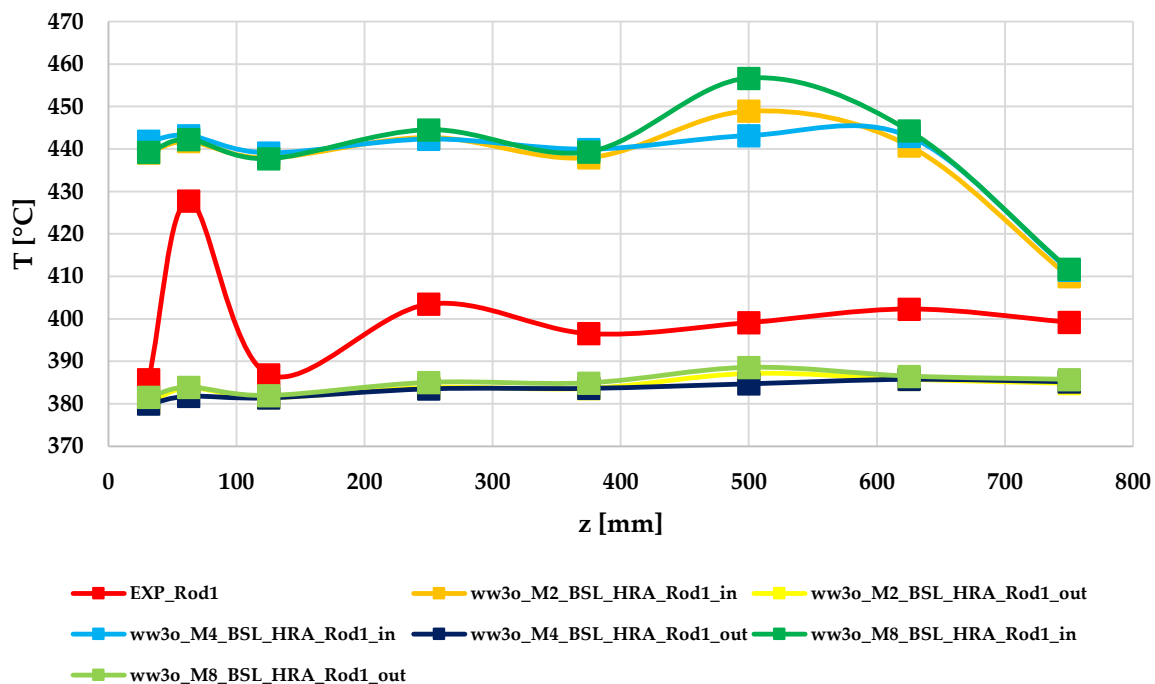


2-2. diagram: A normalizált hőmérséklet az elemszám függvényében

A két diagram alapján elmondható, hogy a három háló közül mindenképpen az M8 a legjobb választás. További vizsgálatokat azonban nem végeztünk, mivel a számítási kapacitás korlátossága miatt az M8-asnál nagyobb hálót már nem tudunk futtatni. A modell továbbfejlesztése során már az M8-as hálót használtuk.

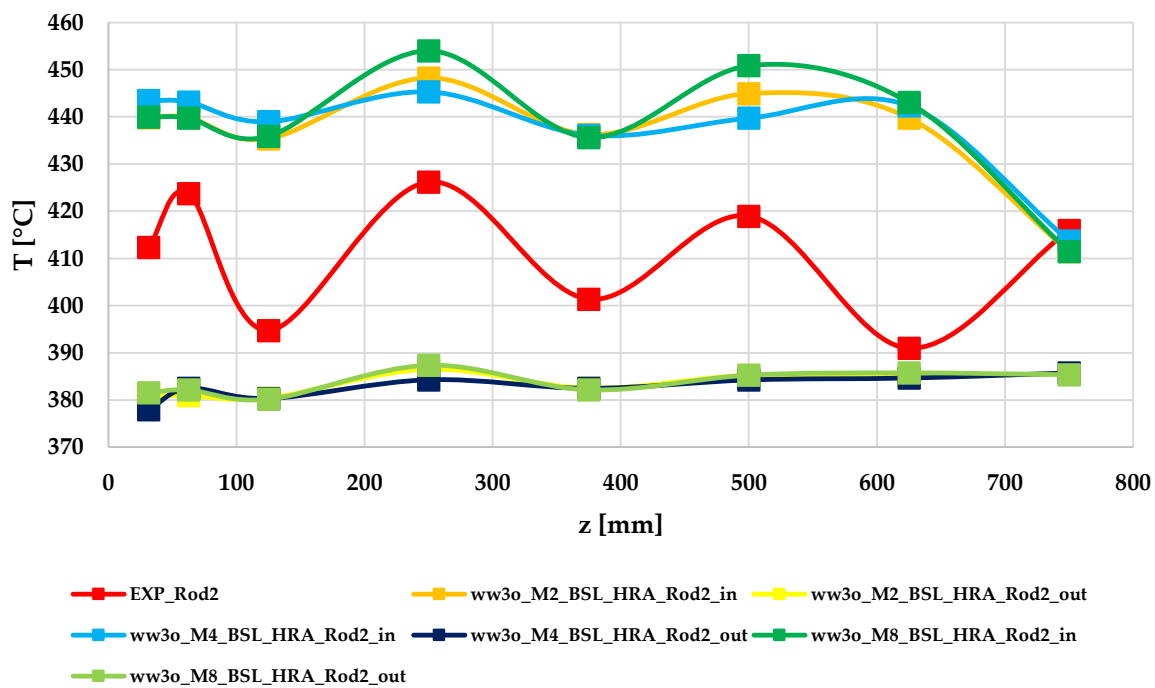
Ezt a döntést erősítette meg a később elvégzett validáció is, ahol a számítási eredményeket vetettük össze a mérési eredményekkel a négy fűtőelem pálcára (lásd 2-3. diagram, 2-4. diagram, 2-5. diagram és 2-6. diagram). Mivel nem tudtuk pontosan, hogy a termoelemek hogyan lettek felerősítve a pálcák belső felületére, így mind pálcák külső, mind a belső felületéről vett számítási eredményekkel összevetettük a mérési eredményeket.

Hálóérzékenységi vizsgálat, Rod1



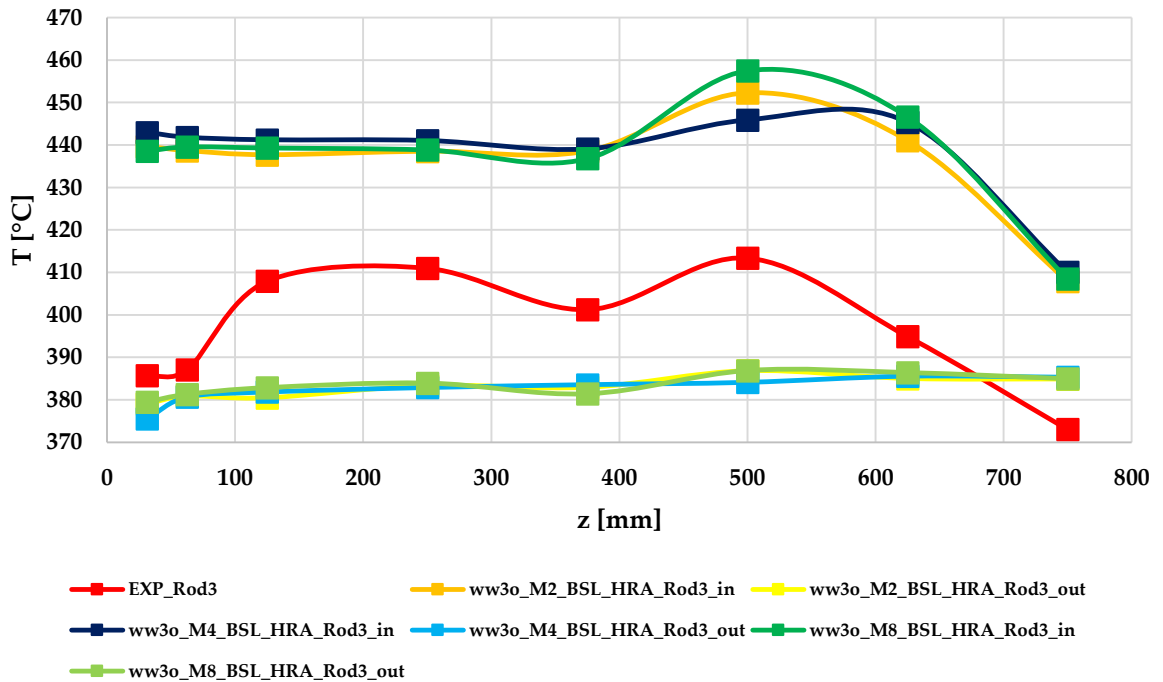
2-3. diagram: Hálóérzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 1-re

Hálóérzékenységi vizsgálat, Rod2



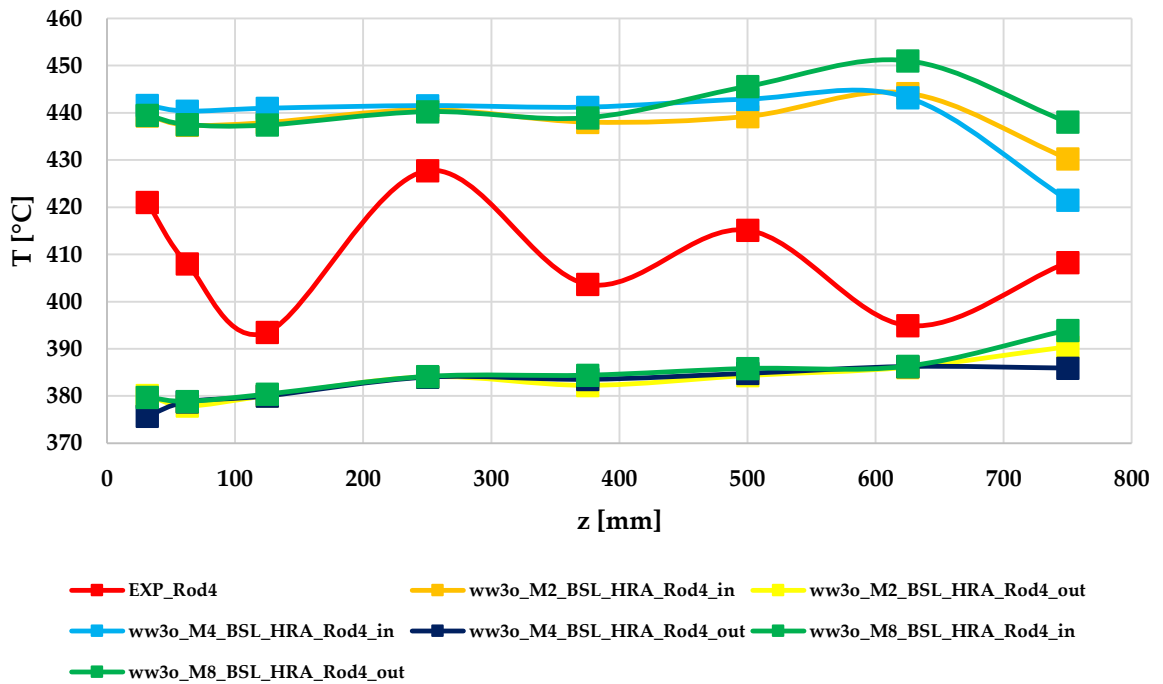
2-4. diagram: Hálóérzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 2-re

Hálóérzékenységi vizsgálat, Rod3



2-5. diagram: Hálóérzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 3-ra

Hálóérzékenységi vizsgálat, Rod4

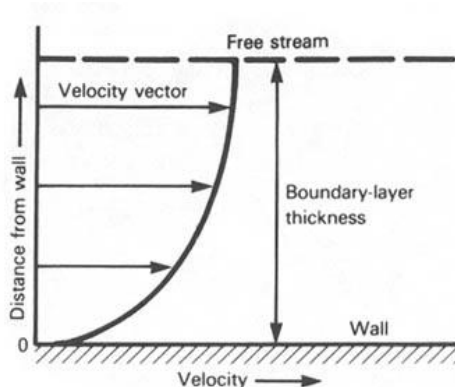


2-6. diagram: Hálóérzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 4-re

Mint látható, a mérési eredmények szisztematikusan a külső és belső felületről kivett számított értékek között helyezkednek el. Ebből arra következtetünk, hogy a termoelemek a belső pálcafelületbe munkált hornyokba (esetleg furatokba) lettek rögzítve.

2.4.2. A HATÁRRÉTEG HÁLÓ ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLAT

A határolt terekben történő áramlásoknál, a falak közelében határréteg alakul ki, melyben az áramlást jellemző változók (pl. sebesség, hőmérséklet, stb.) nagy gradiense a jellemző (2-22. ábra).



2-22. ábra: Határréteg

Ahhoz, hogy ezeket a nagy változásokat jól tudjuk számolni, a határréteget megfelelően kell felbontanunk. A nagy gradiensek miatt nagyon lapos elemekre van szükség, ami azt eredményezi, hogy a határréteg hálóval együtt egy háló elemeinek száma triplájára is nőhet. Tehát a jó határréteg felbontás megválasztása szintén fontos kérdés. A nem megfelelően felbontott határréteg nem ad jó eredményt, viszont a túlzott felbontás sem lehetséges, mert az nagyon nagymértékben megnöveli az elemszámot, és a számítás nagyon erőforrás igényessé válhat. Éppen ezért a határréteg háló esetében is egy optimumot keresünk, melyet a dimenziótlan faltávolság (y^+) jellemez, lásd (2-3) képlet.

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad (2-3)$$

Ahol u_* súrlódási sebesség, y a faltól mért távolság, ν pedig a kinematikai viszkozitás. A vizsgált SCW közeg esetén ökölszabály, hogy a határréteg akkor megfelelő, ha az y_1^{+1} értéke 1 alatt van, mert ekkor megfelelően felbontjuk a viszkózus alapréteget is (szükséges feltétel). Az elégséges feltétel ebben az esetben, hogy olyan turbulencia modellt (pl. SST vagy BSL Reynolds Stress modell) használjunk, amely a kellően finom felbontású határréteg rács esetén ne az állandó anyagjellemző feltételezés mellett ki-

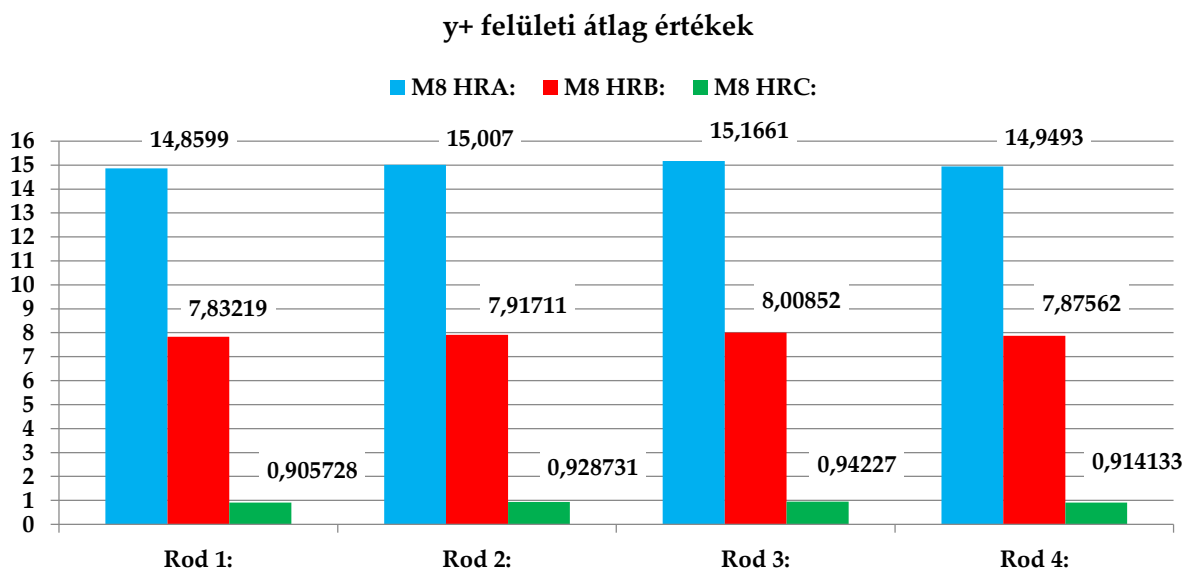
¹ Az y_1^+ az a dimenziótlan faltávolság érték, amely a rács falhoz legközelebbi, első rétegének magasságát adja meg.

fejlesztett „standard wall funcion-t” használja, hanem ténylegesen számolja a változókat a jól felbontott határrétegben. A *ww_3o* modell kiértékelésénél kiderült, hogy az y^+ értéke átlagosan 14-16 körül van, tehát a modellünk a határrétegben lezajló folyamatokat vélhetőleg nem modellezi megfelelően pontosan. A határréteg érzékenységi vizsgálatban további két határréteget vizsgáltunk meg. A határrétegek jellemzői a leglaposabb (a falhoz legközelebbi) prizmatikus elem magassága, a növekedési faktor, valamint a rétegek száma. A határréteg érzékenységi vizsgálatot M8-as hálóval és BSL Reynolds Stress turbulencia modellel végeztük el. A vizsgálatban szereplő határréteg paraméterek a 2-5. táblázat mutatja.

2-5. táblázat: Határréteg háló vizsgálat

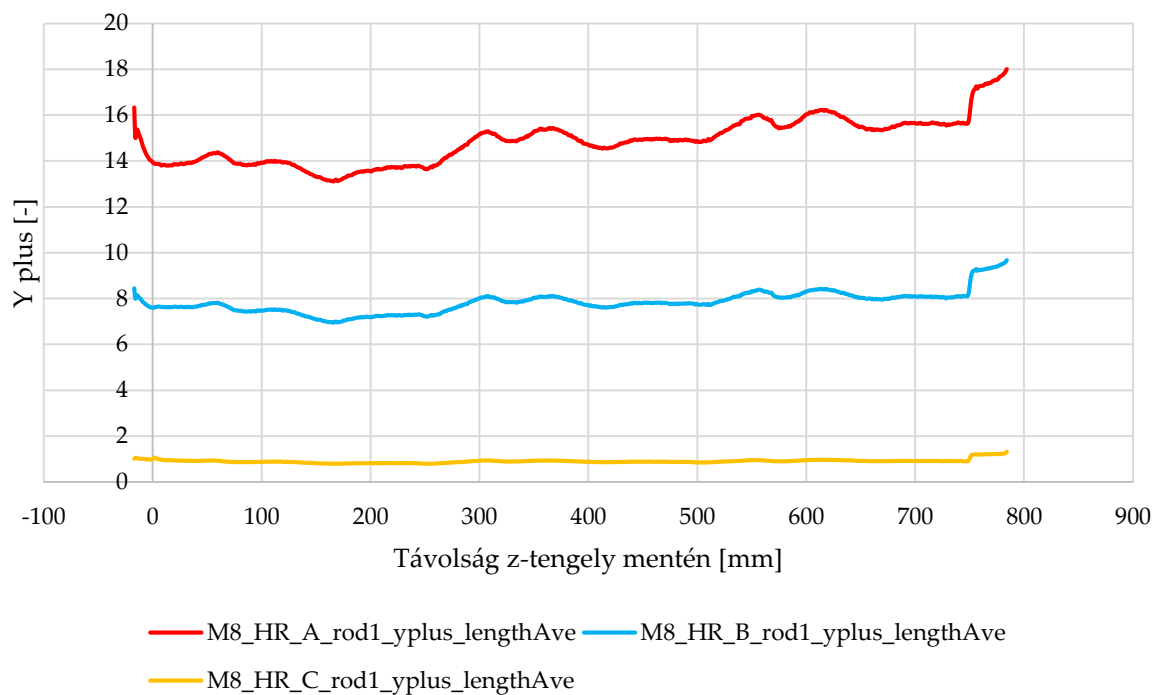
Határréteg neve	Legkisebb elem magassága	Növekedési faktor	Rétegek száma	Teljes háló elemszáma
HR A (<i>ww_3o</i>)	0,01379	1,3	4	16 635 531
HR B	0,0058834	1,3	6	19 063 250
HR C	0,00066	1,5	8	21 514 940

A 2-7. *diagram* mutatja az y_1^+ felületi átlag értékeket az egyes fűtőelem pálcák (Rod-ok) felületén, a 2-8. *diagram*, 2-9. *diagram*, 2-10. *diagram* és 2-11. *diagram* mutatja az y_1^+ vonal menti átlagának z tengely szerinti eloszlását az egyes fűtőelem pálcákon, a 2-12. *diagram* pedig a tesztkazetta falán (Shroud-on).



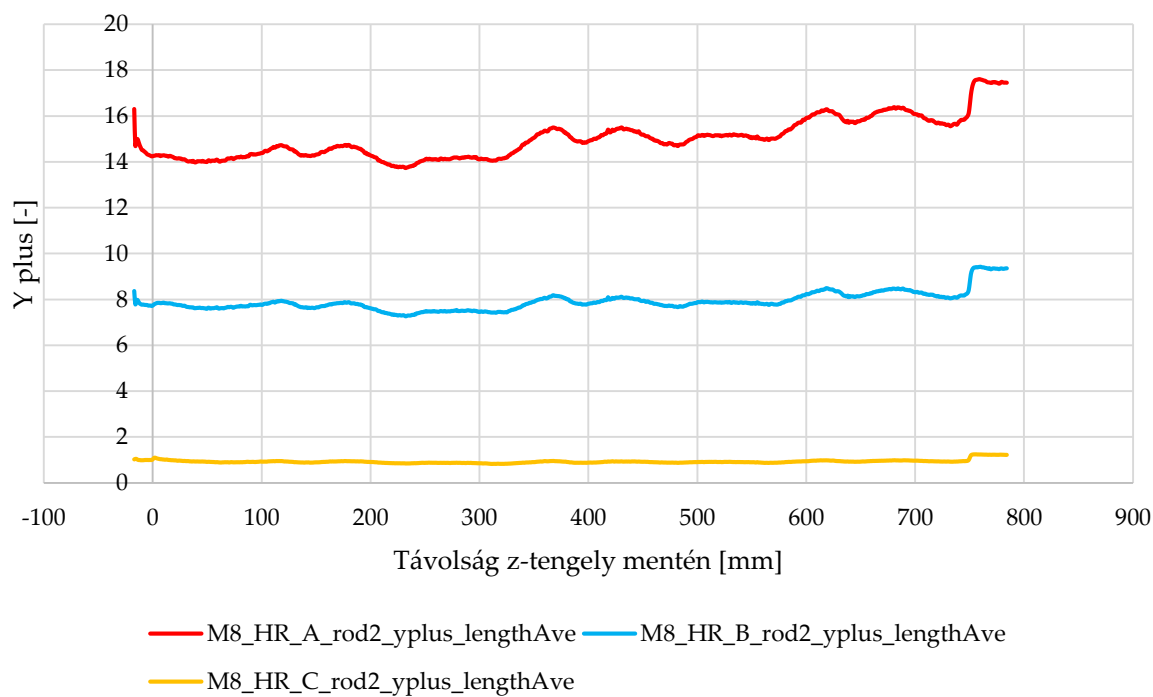
2-7. *diagram*: Az y_1^+ felületi átlag értékek a négy fűtőelem pálcára a három különböző határréteg rács esetén

y+ értékek, M8_HR_A, M8_HR_B, M8_HR_C, Rod 1



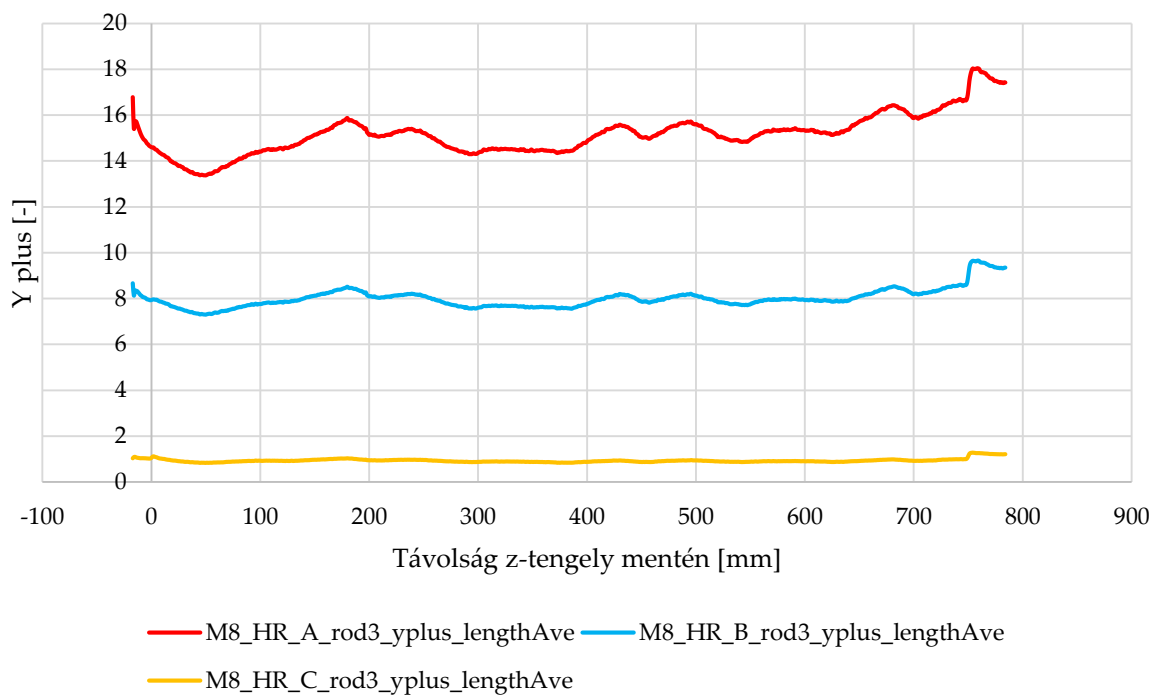
2-8. diagram: Az y_1+ értékek a „z” tengely mentén az első fűtőelem pálcára (Rod1)

y+ értékek, M8_HR_A, M8_HR_B, M8_HR_C, Rod 2



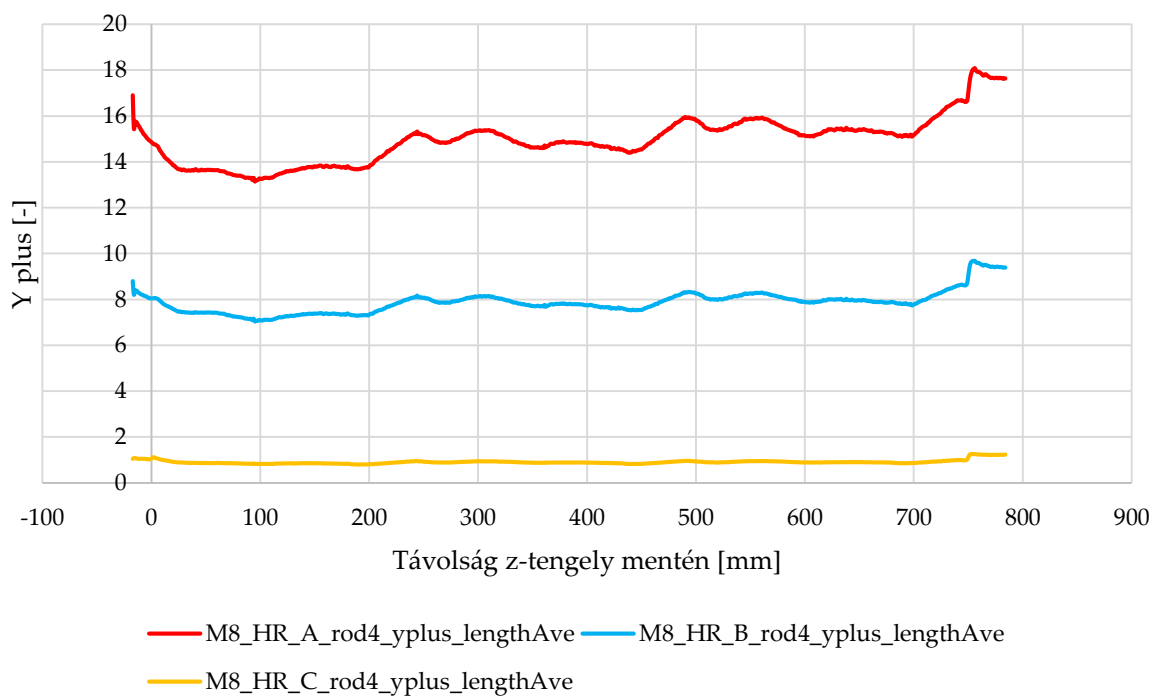
2-9. diagram: Az y_1+ értékek a „z” tengely mentén a második fűtőelem pálcára (Rod2)

y+ értékek, M8_HR_A, M8_HR_B, M8_HR_C, Rod 3



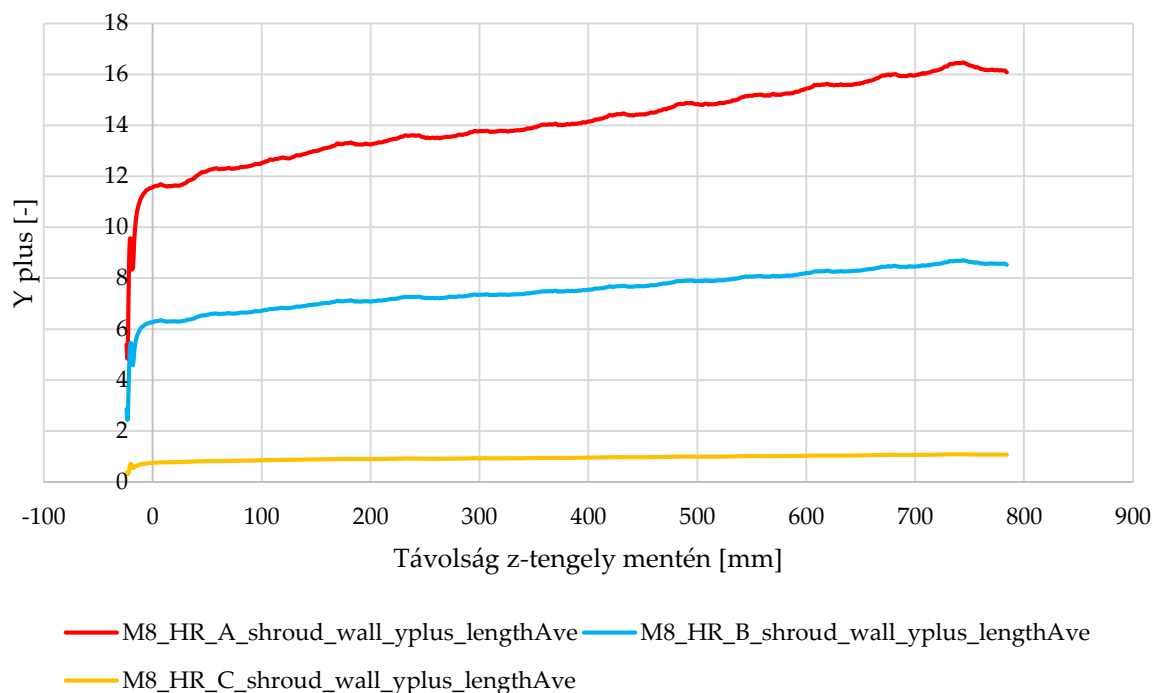
2-10. diagram: Az y₁₊ értékek a „z” tengely mentén a harmadik fűtőelem pálcára (Rod3)

y+ értékek, M8_HR_A, M8_HR_B, M8_HR_C, Rod 4



2-11. diagram: Az y₁₊ értékek a „z” tengely mentén a negyedik fűtőelem pálcára (Rod4)

y+ értékek, M8_HR_A, M8_HR_B, M8_HR_C, Shroud

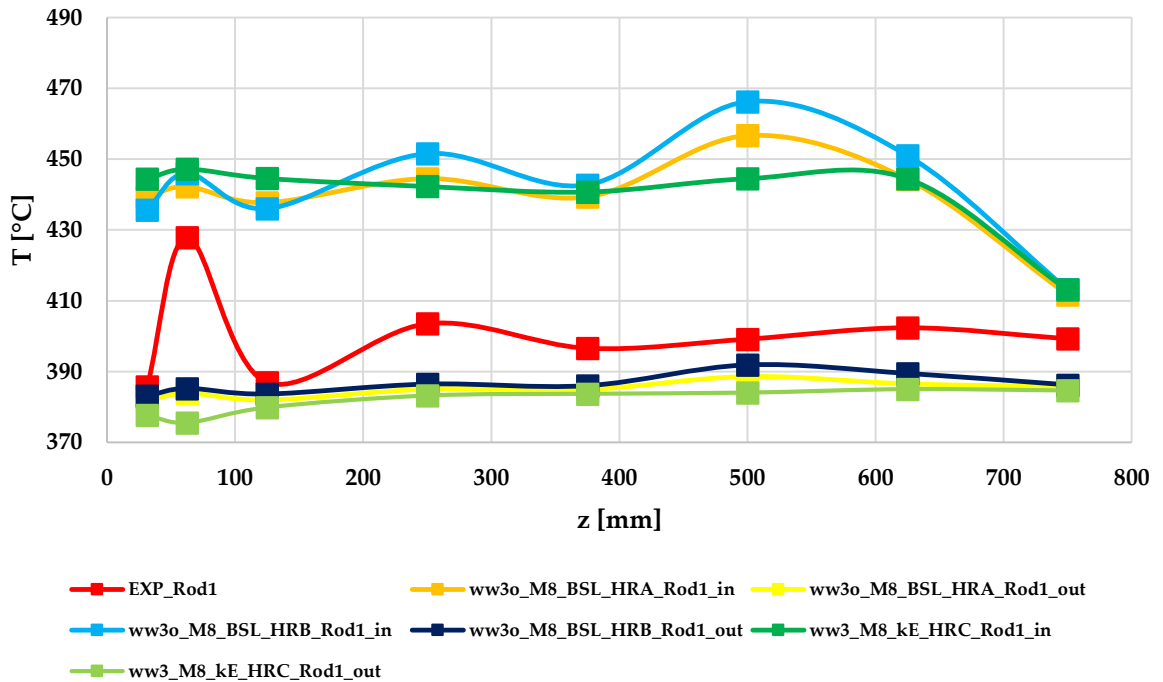


2-12. diagram: Az y_1+ értékek a „z” tengely mentén a tesztkazetta falára (Shroud)

A diagramok alapján elmondható, hogy a HR C a legjobb a három határréteg háló közül (a modell továbbfejlesztésénél ezt használtuk), felületi átlaga az egyes Rod-okon minden esetben 1 alatt van néhány századdal, akár egy tizeddel is. A „z” tengely menti eloszlás pedig azt mutatja, hogy csak a geometria vége felé (tehát magas „z” értékeknél) nő valamivel 1 fölé, azonban nem jelentősen. A fűtött szakaszon viszont végig 1 alatti az értéke, ami megfelelő.

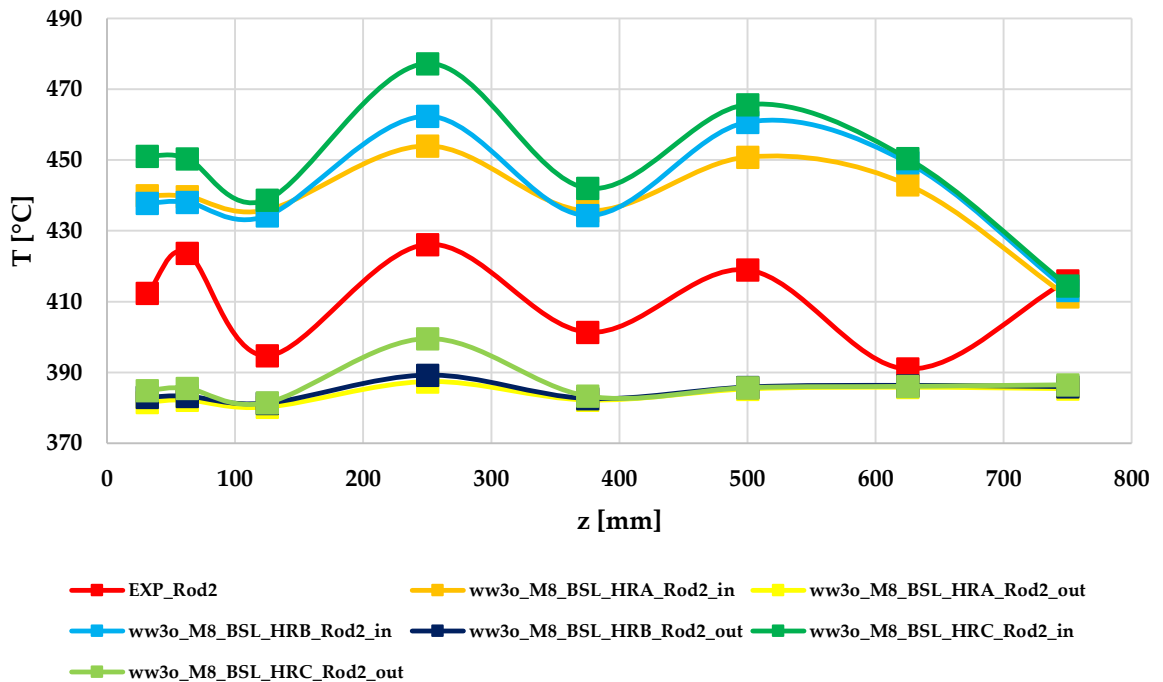
A határréteg háló érzékenységi vizsgálat eredményeit szintén összevetettük a mérési eredményekkel (lásd 2-13. diagram, 2-14. diagram, 2-15. diagram és 2-16. diagram). A levonható következtetések azonosak az első érzékenységvizsgálatnál leírtakkal.

Határréteg háló érzékenységi vizsgálat, Rod1



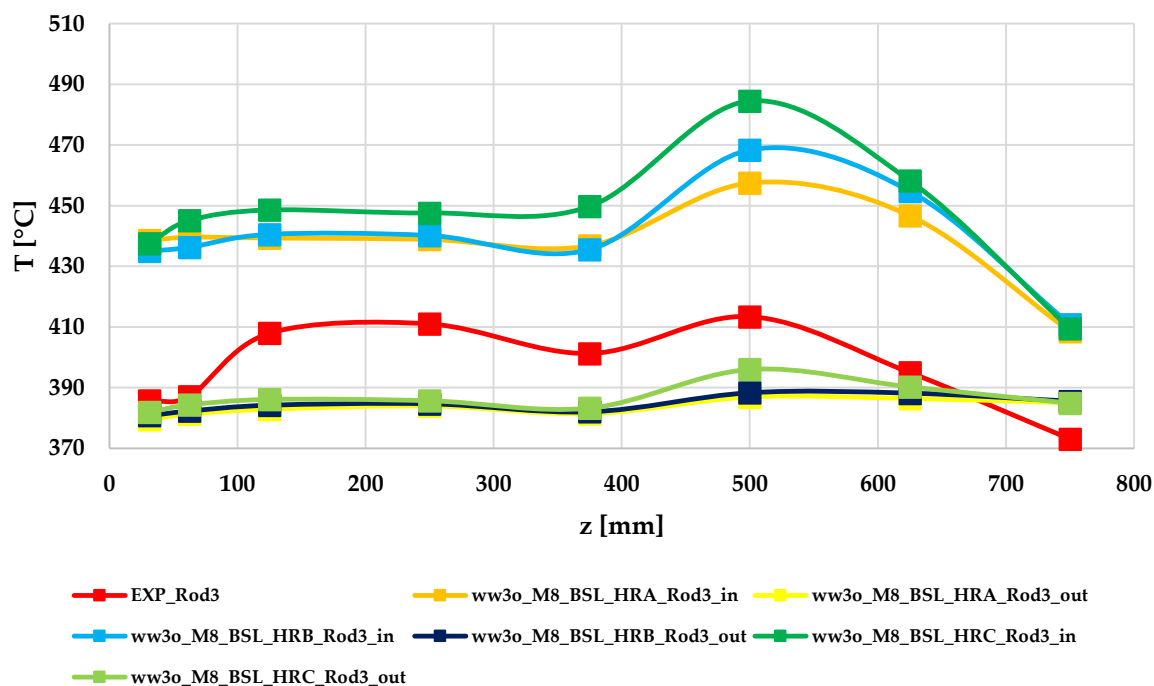
2-13. diagram: Határréteg háló érzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 1-re

Határréteg háló érzékenységi vizsgálat, Rod2



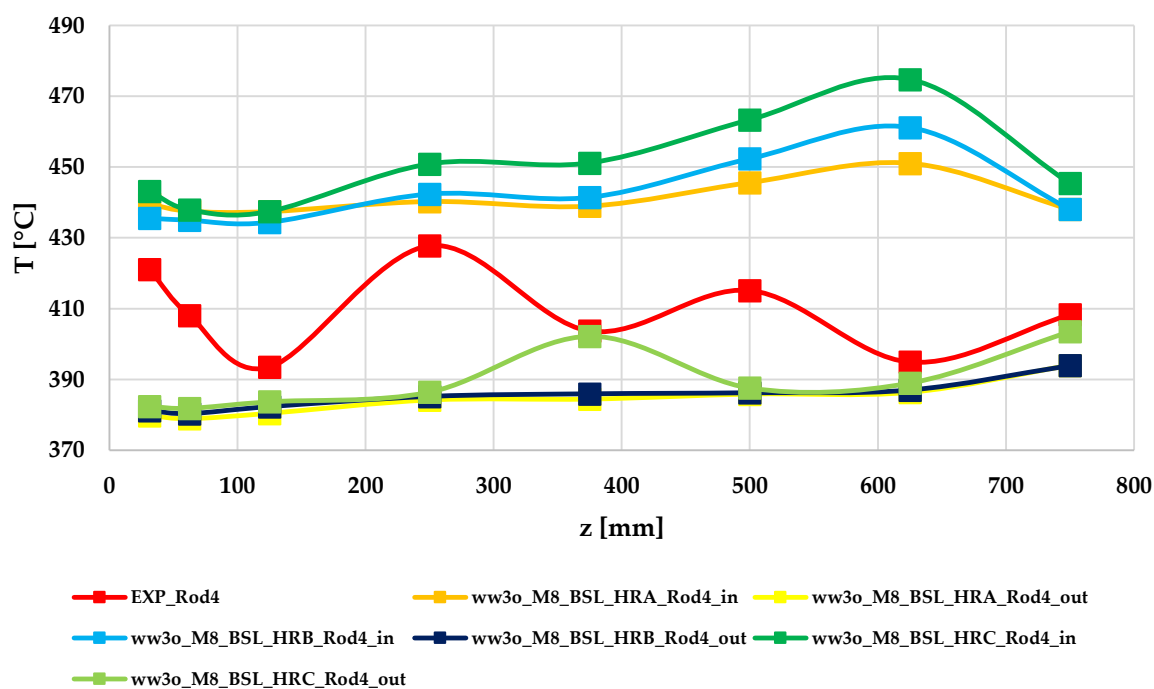
2-14. diagram: Határréteg háló érzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 2-re

Határréteg háló érzékenységi vizsgálat, Rod3



2-15. diagram: Határréteg háló érzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 3-ra

Határréteg háló érzékenységi vizsgálat, Rod4



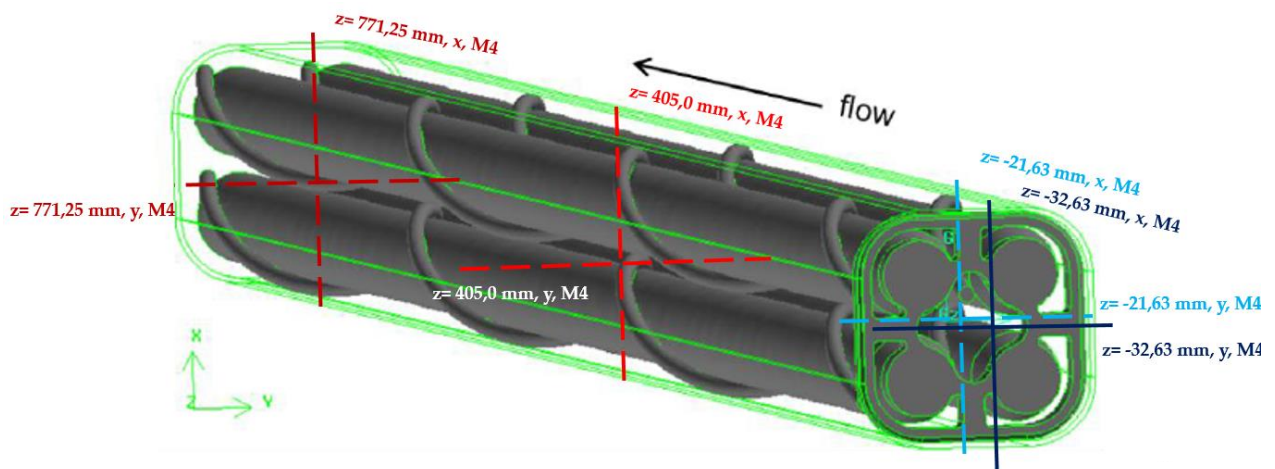
2-16. diagram: Határréteg háló érzékenységi vizsgálat eredményeinek összevetése a mérési eredményekkel Rod 4-re

2.4.3. TURBULENCIA MODELL ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLAT

A vizsgálatainkban három különböző turbulencia modellt használtunk (lásd 2.2 alfejezet). A $k-\varepsilon$ a három használt turbulencia modell közül a legrobosztusabb, de a legegyszerűbb matematikai reprezentációval rendelkező modell, amely izotróp turbulenciát feltételez. Az SST modell elméletileg jobb eredményt ad határolt terekben, ahol a fal közeli régióban az alacsony Reynolds számú $k-\omega$ modellre vált át egy kapcsoló függvény segítségével, míg a faltól távol a $k-\varepsilon$ modellt használja. Az SST szintén izotróp turbulencia modell. Nem úgy, mint a legfejlettebb turbulencia modell, amit használtunk: a BSL Reynolds Stress turbulencia modell, amely további hat megoldott egyenlet révén anizotróp turbulenciát számol.

A turbulencia modell érzékenységi vizsgálat keretében kíváncsiak voltunk a három modellel kapott eredmények közötti különbségekre.

A 2-23. ábra mutatja azoknak a vonalaknak az axiális elhelyezkedését és az „x” vagy „y” tengellyel párhuzamos irányát, amelyek mentén összehasonlítottunk különböző dimenziós változót. Az összehasonlított értékek a „z” irányú sebesség komponens (w [m/s]), hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$] és turbulens kinetikus energia [m^2/s^2]. A vizsgálatot az M4 hálóra végeztük el.

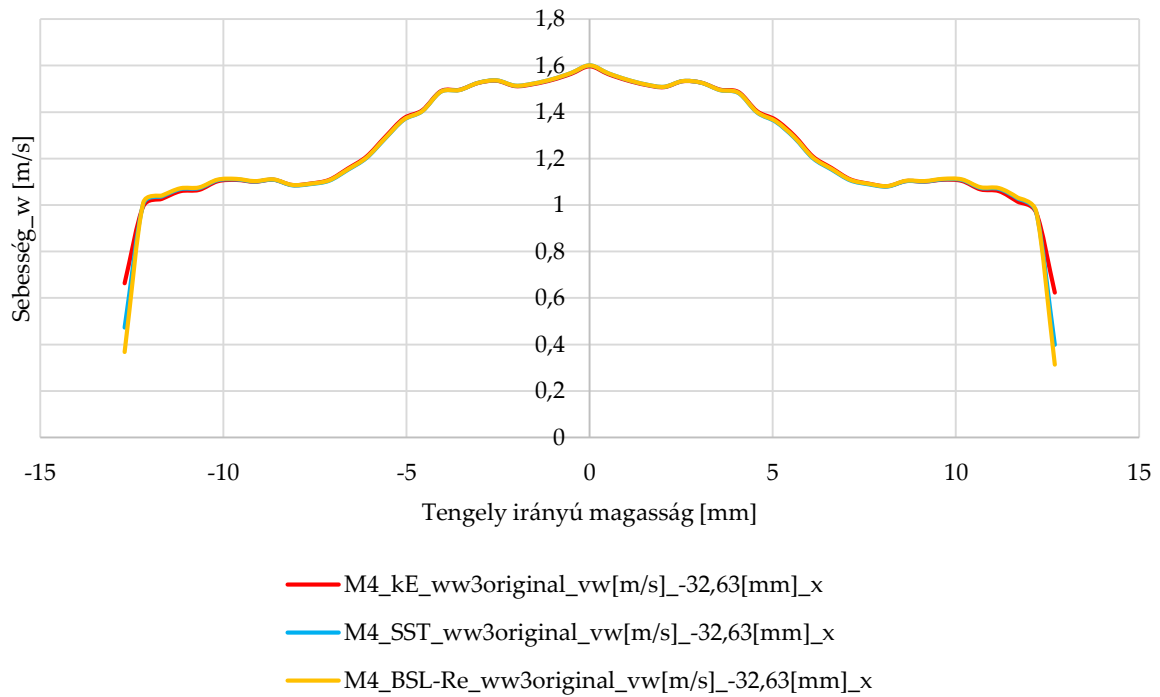


2-23. ábra: A turbulencia modell vizsgálathoz felhasznált „x” és „y” irányú tengelyek és azok axiális („z”) irányú pozíciói

A fűtött szakasz előtt több keresztmetszetben vizsgáltuk az áramképet a w sebességkomponensek és a turbulens kinetikus energia eloszlása segítségével. A következőben két példát mutatok be.

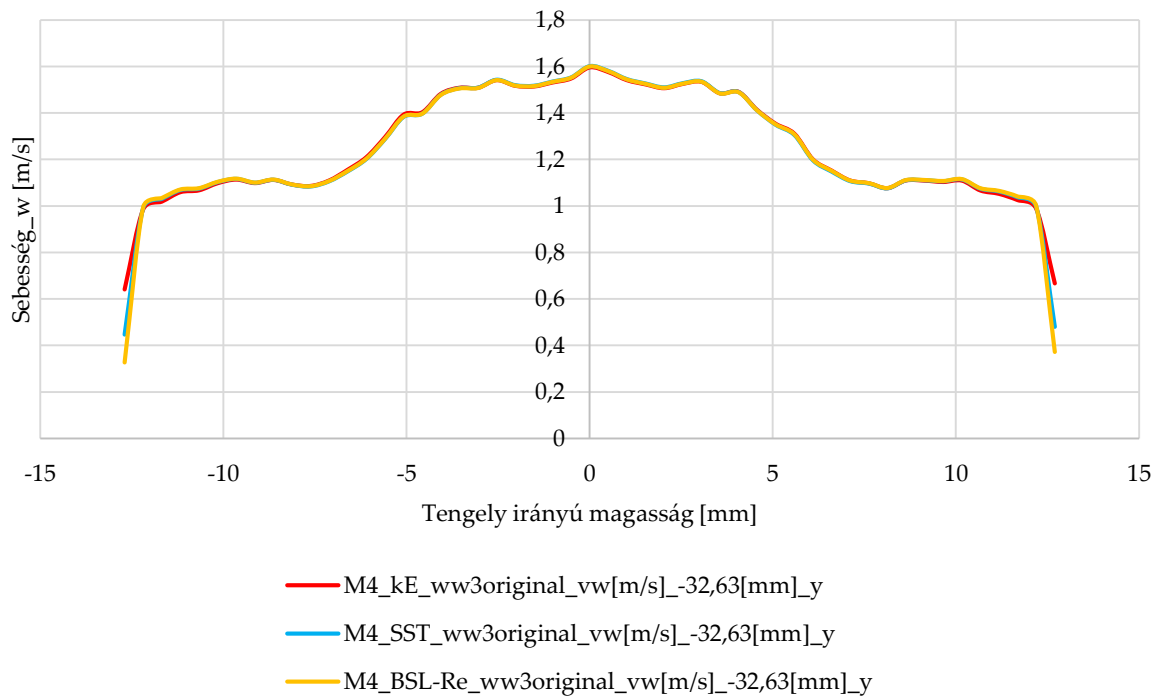
A 2-17. diagram és a 2-18. diagram mutatják a w vonal menti eloszlását $z = -32,63 \text{ mm}$ magasságban, amely 2,27 mm-rel, tehát közvetlenül a belépés után található. Látható, hogy a sebességeloszlás tengelyszimmetrikus, a három turbulencia modell által szolgáltatott eredmények között sem mennyiségi, sem minőségi különbség nincs.

Turbulencia modell érzékenység vizsgálat, sebesség, $z = -32,63$ mm, x, M4



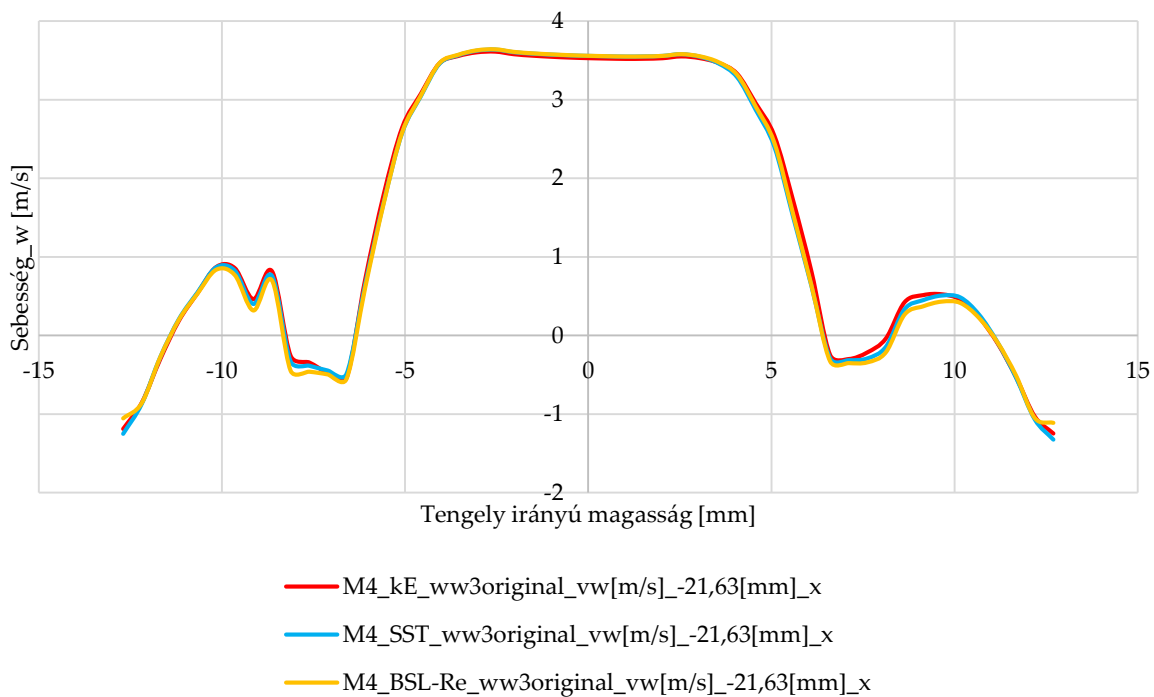
2-17. diagram: Turbulencia modell vizsgálat, w [m/s], $z = -32,63$ mm, x tengely mentén

Turbulencia modell érzékenység vizsgálat, sebesség, $z = -32,63$ mm, y, M4



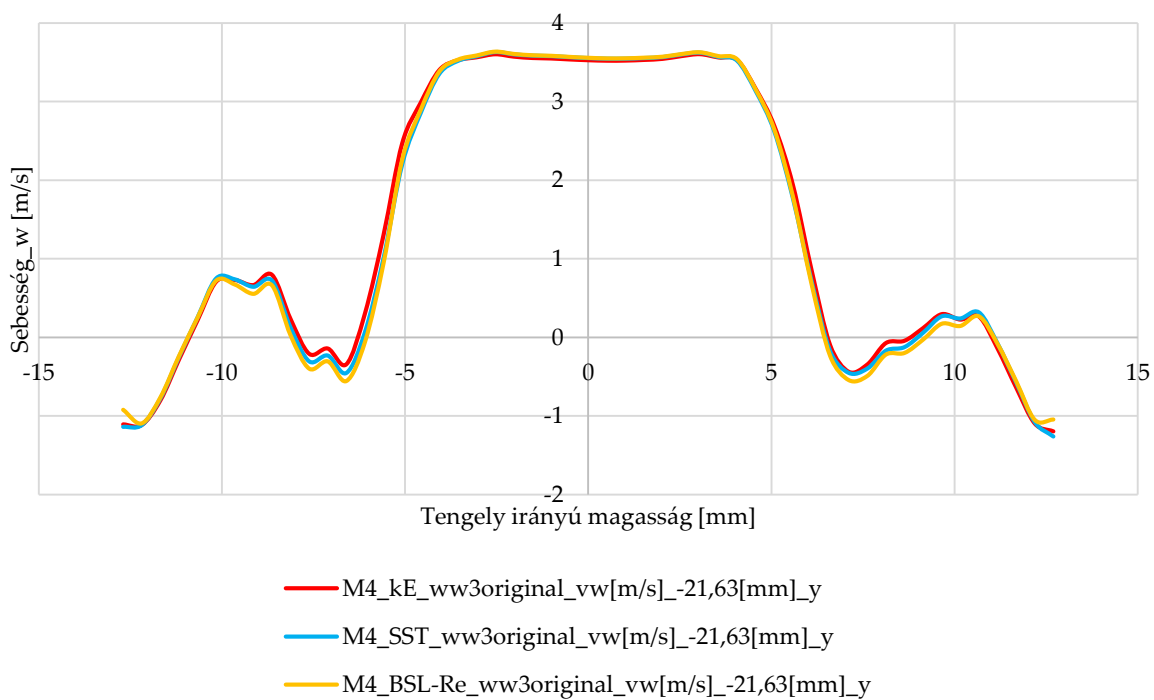
2-18. diagram: Turbulencia modell vizsgálat, w [m/s], $z = -32,63$ mm, y tengely mentén

Turbulencia modell érzékenység vizsgálat, sebesség, $z = -21,63$ mm, x, M4



2-19. diagram: Turbulencia modell vizsgálat, w [m/s], $z = -21,63$ mm, x tengely mentén

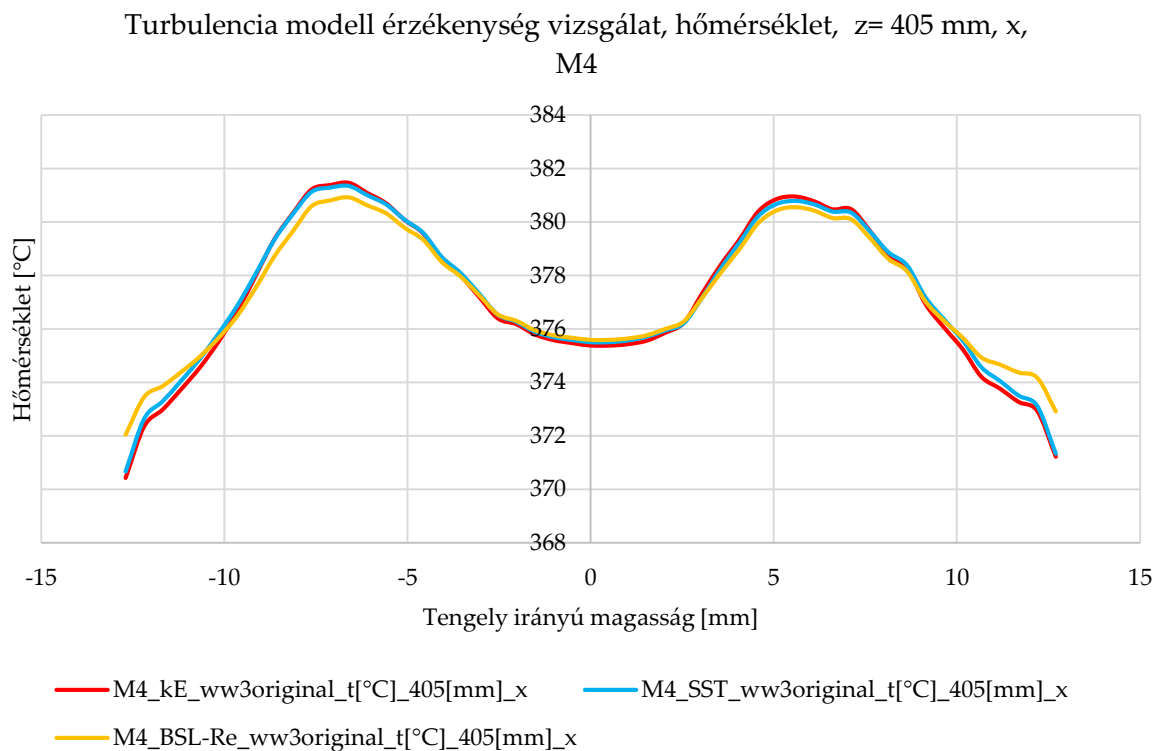
Turbulencia modell érzékenység vizsgálat, sebesség, $z = -21,63$ mm, y, M4



2-20. diagram: Turbulencia modell vizsgálat, w [m/s], $z = -21,63$ mm, y tengely mentén

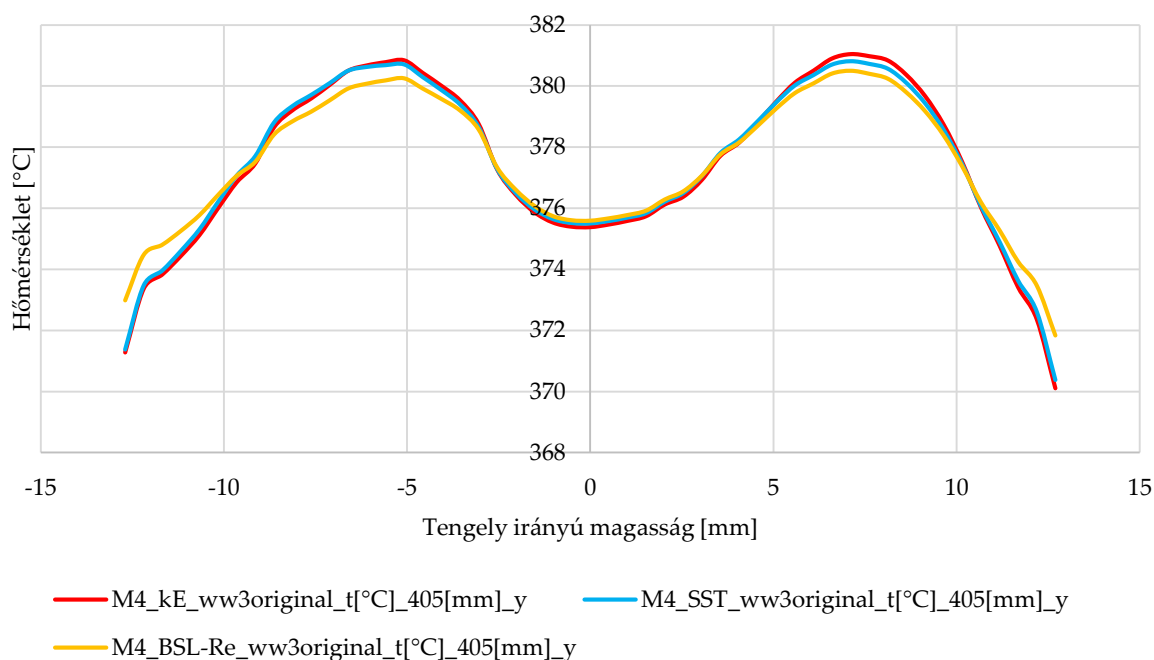
A fűtött szakaszon már érdemes vizsgálni a hőmérséklet eloszlások közötti különbségeket. Erre azonos axiális magasságban két példát mutatok be.

A 2-21. *diagram* és a 2-22. *diagram* hőmérséklet profilokat mutatnak $z = 405$ mm magasságban. A profilok minőségileg megegyeznek, mennyiségileg némiképp eltérnek, főleg a BSL Reynolds Stress tér el a másik két modelltől.



2-21. *diagram*: Turbulencia modell vizsgálat, T [°C], $z=405$ mm, x tengely mentén

Turbulencia modell érzékenység vizsgálat, hőmérséklet, $z = 405$ mm, y ,
M4

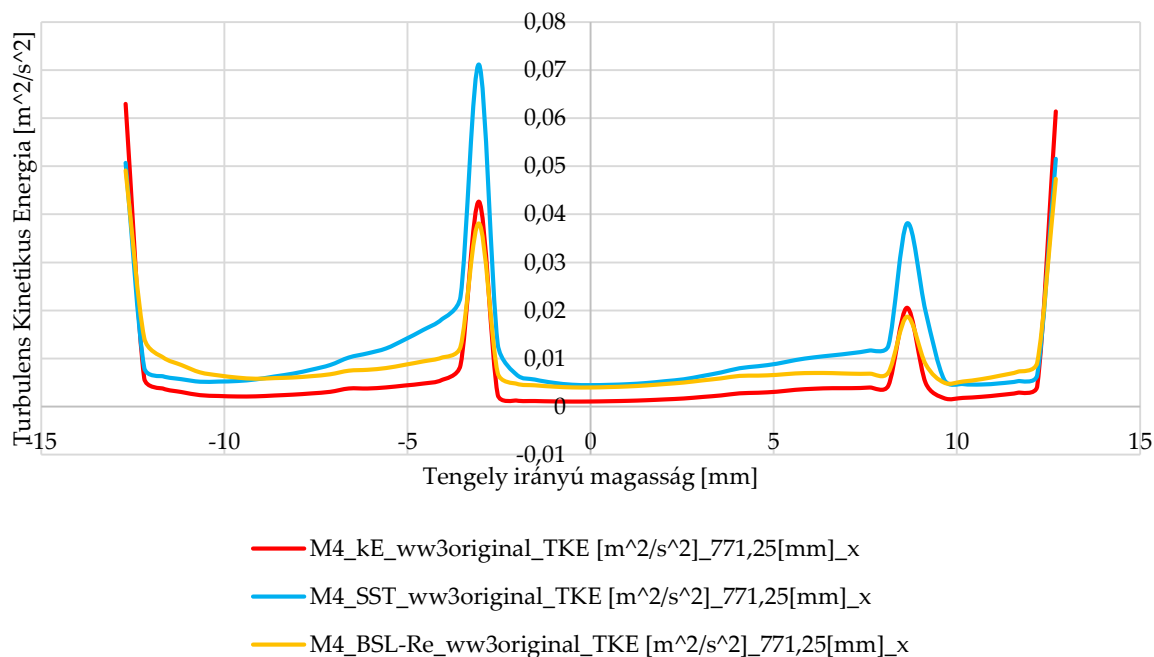


2-22. *diagram*: Turbulencia modell vizsgálat, T [°C], $z=405$ mm, y tengely mentén

A legjelentősebb eltéréseket a turbulens kinetikus energia eloszlásaiban találtuk. Erre mutat példát a következő két összehasonlítás.

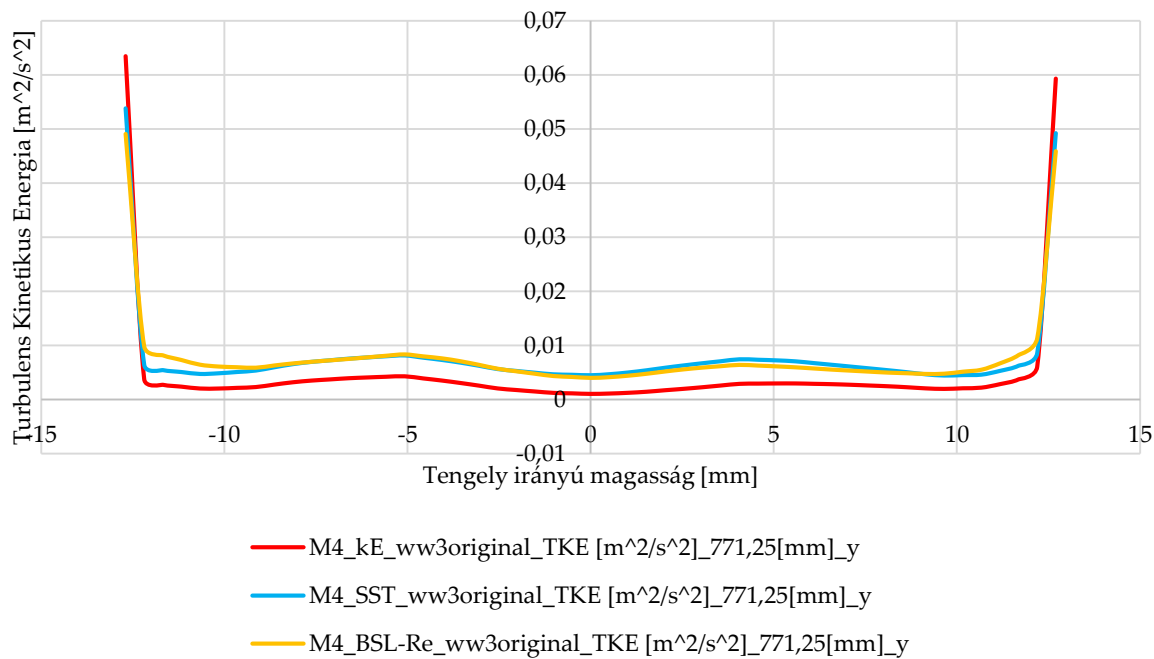
A 2-23. *diagram* és a 2-24. *diagram* a turbulens kinetikus energia vonal menti eloszlását mutatják $z = 771,25$ mm magasságban. A 2-24. *diagram* jól mutatja, hogy ha az áramlásban nincs nagy zavarás a vizsgált vonal közelében, a modellek eredményei nem túl nagy mennyiségi eltéréseket mutatnak, és minőségileg egyeznek, az SST és BSL Reynolds Stress modellek mennyiségi eredménye közelebb áll egymáshoz. Ha azonban az áramlásban nagyobb zavarás lép fel a vizsgált vonal mentén – jelen esetben a helikális távtartó (lásd 2-23. *diagram*) – az SST modell eredményében lényegesen magasabb csúcserőtekeket látunk, mint a másik két modell eredménye esetén, bár az eloszlások minőségileg itt is egyeznek.

Turbulencia modell érzékenység vizsgálat, turbulens kinetikus energia,
 $z=771,25$ mm, x, M4



2-23. diagram: Turbulencia modell vizsgálat, TKE [m²/s²], $z=771,25$ mm, x tengely mentén

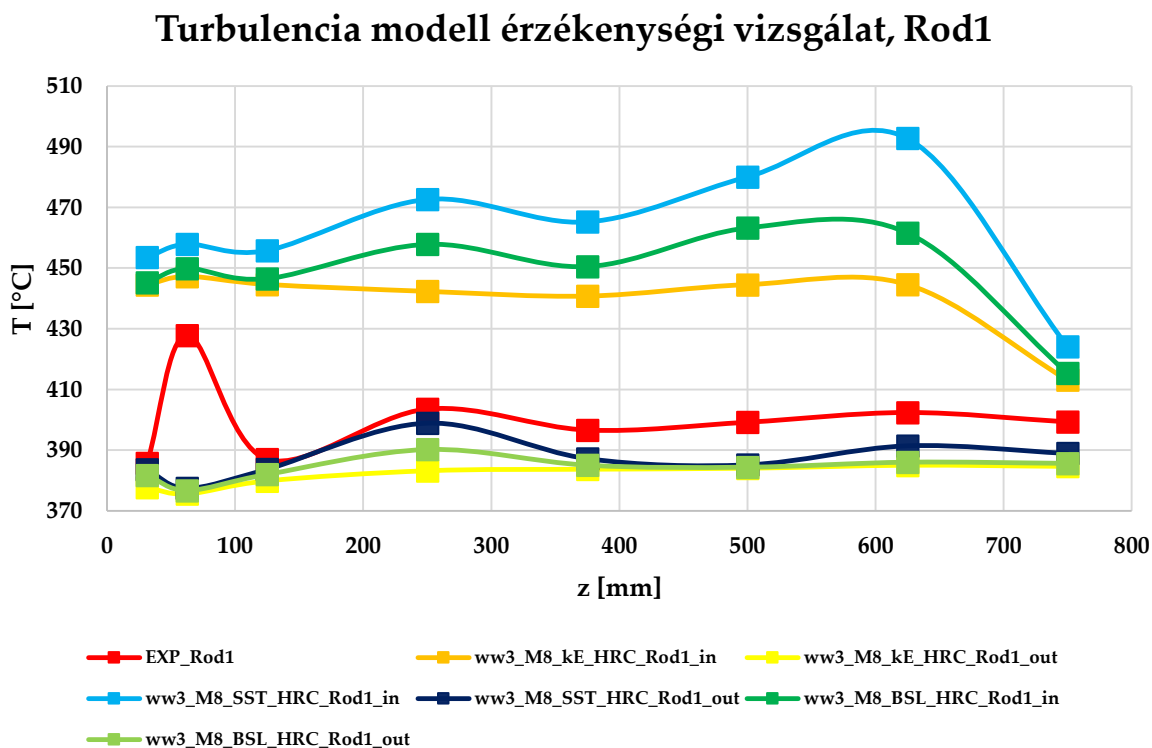
Turbulencia modell érzékenység vizsgálat, turbulens kinetikus energia,
 $z=771,25$ mm, y, M4



2-24. diagram: Turbulencia modell vizsgálat, TKE [m²/s²], $z=771,25$ mm, y tengely mentén

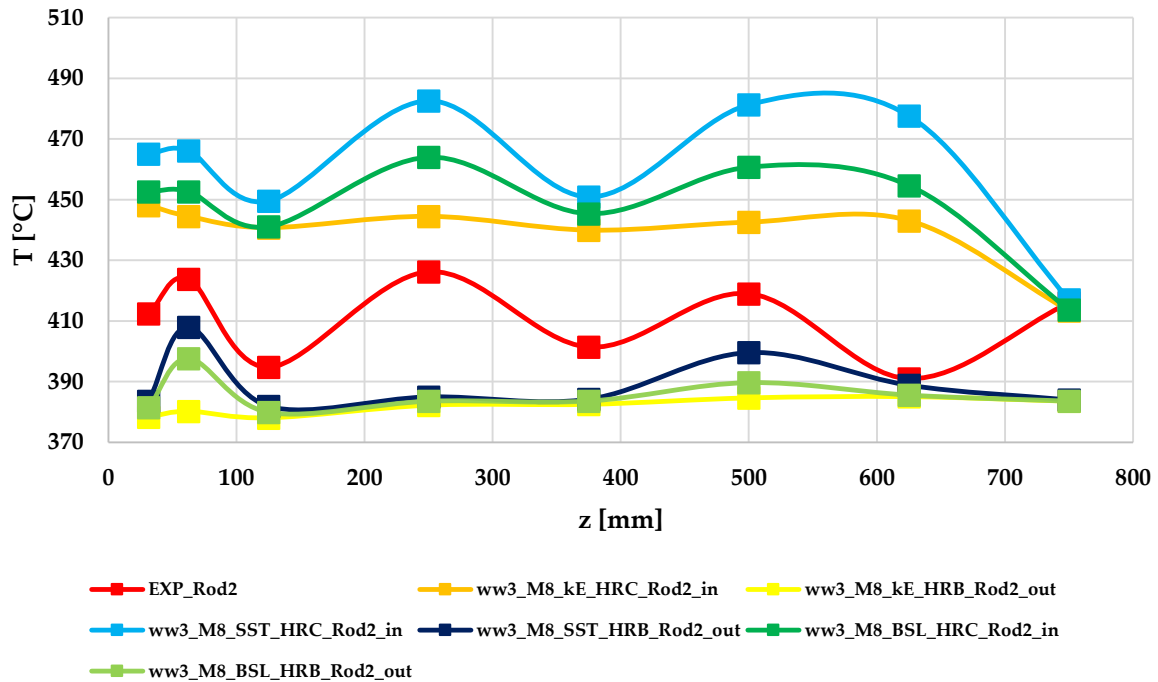
Az eredmények alapján elmondható, hogy sebesség és hőmérséklet tekintetében a $k-\varepsilon$ és az SST modell minőségileg hasonlóbb eredményeket ad, turbulens kinetikus energia szempontjából azonban az SST és BSL Re Stress modellek eredményei vannak egymáshoz közelebb, ha az áramlás zavartalan. Jelentősen megzavart áramlás esetén az SST modell kiugró eredményeket ad. Ez alapján elmondható, hogy egyedül a turbulens kinetikus energia kiugró értékeinél figyelhető meg jelentősebb különbség a három modell között, egyéb iránt az eredmények nagyjából megegyeznek. Mivel a BSL Re Stress modell a legfejlettebb és ráadásul anizotróp turbulenciát modellez, így ezt a modellt használtuk a végső számításokhoz a modell továbbfejlesztés során.

A turbulencia modell érzékenységi vizsgálat eredményeit szintén összevetettük a mérési eredménnyel (lásd 2-25. diagram, 2-26. diagram, 2-27. diagram és 2-28. diagram). A levonható következtetések azonosak az első érzékenységvizsgálatnál leírtakkal.



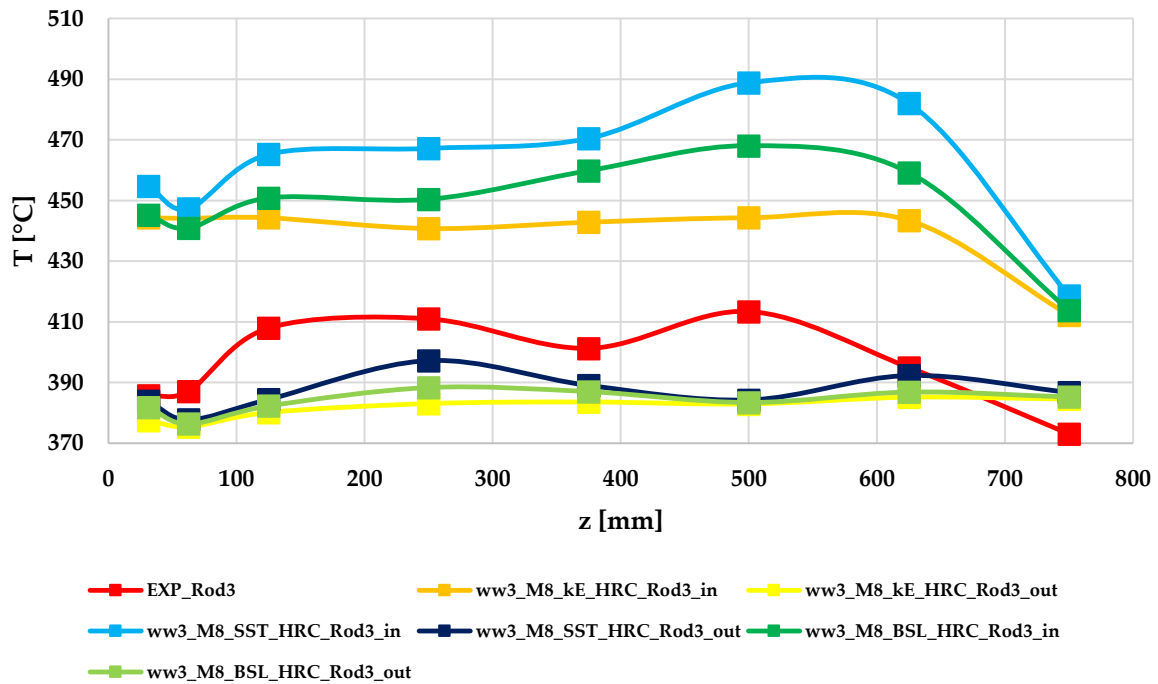
2-25. diagram: A turbulencia modell érzékenységi vizsgálat eredményei összevetve a mérési eredményekkel Rod 1-re

Turbulencia modell érzékenységi vizsgálat, Rod2



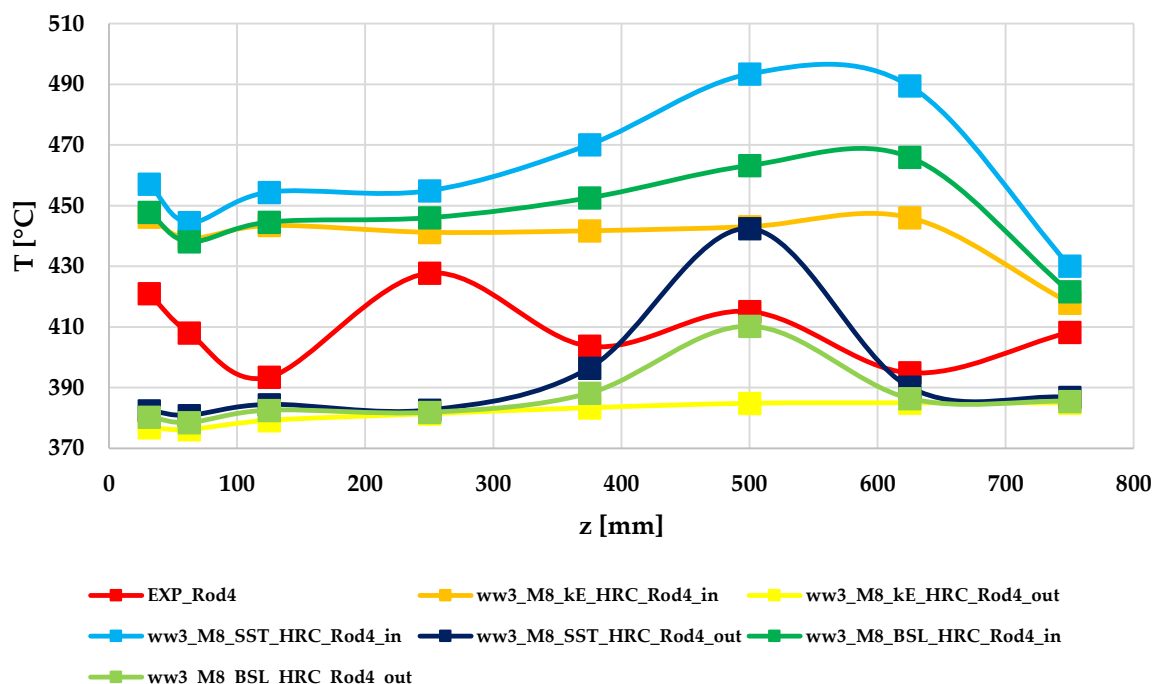
2-26. diagram: A turbulencia modell érzékenységi vizsgálat eredményei összevetve a mérési eredményekkel Rod 2-re

Turbulencia modell érzékenységi vizsgálat, Rod3



2-27. diagram: A turbulencia modell érzékenységi vizsgálat eredményei összevetve a mérési eredményekkel Rod 3-ra

Turbulencia modell érzékenységi vizsgálat, Rod4



2-28. diagram: A turbulencia modell érzékenységi vizsgálat eredményei összevetve a mérési eredményekkel Rod 4-re

2.4.4. AZ ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATOKBÓL LEVONHATÓ KÖVETKEZTETÉSEK

Három érzékenységi vizsgálatot végeztünk el, hálóérzékenységi, határréteg hálóérzékenységi és turbulencia modell érzékenységi vizsgálatokat.

A hálóérzékenységi vizsgálatban egy az M4 alaphálónál kevesebb elemet (M2) és egy annál több elemet (M8) tartalmazó hálót vizsgáltunk meg. A vizsgálatok alapján az M2 háló egyértelműen kevés elemet tartalmaz, az M8 háló a nagyobb elemszám miatt elméletileg pontosabb eredményeket ad az M4-nél, és vélhetőleg még így is kevesebb elemet tartalmaz az optimálisnál, azonban további vizsgálatokat már nem tudtunk végezni az erőforrásaink végessége miatt. Végül úgy döntöttünk, hogy az M8-as hálót fogjuk alkalmazni a továbbfejlesztett modellben.

A határréteg hálóérzékenységi vizsgálat egyértelműen megmutatta, hogy a HR C határréteg a legjobb választás a három közül az y_1^+ értékeket alapul véve. Megjegyzendő, hogy az ideális, minden esetben 1 alatti érték még így sem teljesül (nagyobb, a fűtetlen szakaszra eső „z” magasságoknál az y_1^+ értéke 1,1-1,2 körül van), azonban a finomabb felbontásnak megint csak az erőforrásaink végessége szabott határt.

A turbulencia modell vizsgálat alapján elmondható, hogy a három modell között lényegi eltérés nincs, egyedül a kiugró turbulens kinetikus energia csúcserkéiben tér

el lényegesen az SST modell a másik kettőtől. Ez alapján úgy döntöttünk, hogy a továbbiakban a BSL Re Stress modellel végezzük el a végső számításokat, mivel a szakirodalom alapján a BSL Reynolds Stress modell a legfejlettebb a három modell közül, amely ráadásul a másik kettővel ellentétben anizotróp turbulenciát modellez.

A mérési és a számítási eredmények összevetése nyilvánvalóvá tette, hogy a mért értékek szisztematikusan a számított külső felületi érték fölött és belső felületről kivett számított értékek alatt helyezkednek el. Ebből arra következtetünk, hogy a termoelemek a belső pálcafelületbe munkált hornyokba (esetleg furatokba) lettek rögzítve.

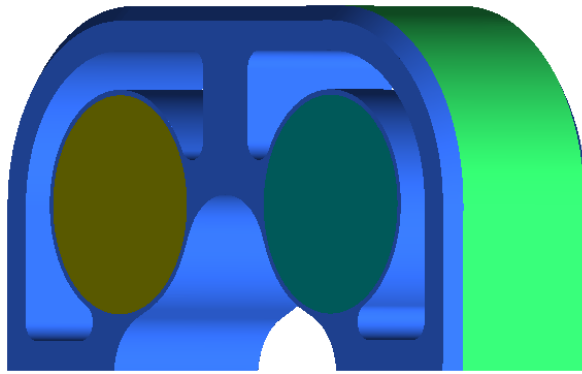
2.5. A modell továbbfejlesztése az érzékenységi vizsgálatok alapján

Az érzékenységi vizsgálatok azt eredményezték, hogy egy, az eredetnél nagyobb hálót (M8) és jobb határréteg felbontást (HR C) terveztünk alkalmazni. Ez drasztikus elemszám növekedést eredményez a Fluid doménben. A számításaink még lefutottak (hiszen a vizsgálatokat is el tudtuk végezni), azonban mégis módot kellett találnunk rá, hogy valamelyest lecsökkentsük az erőforrásaink terhelését, ez által a számítási időigényt csökkentve, valamint lehetőség teremtteni egy esetleges későbbi alapháló és határréteg felbontás növelésre.

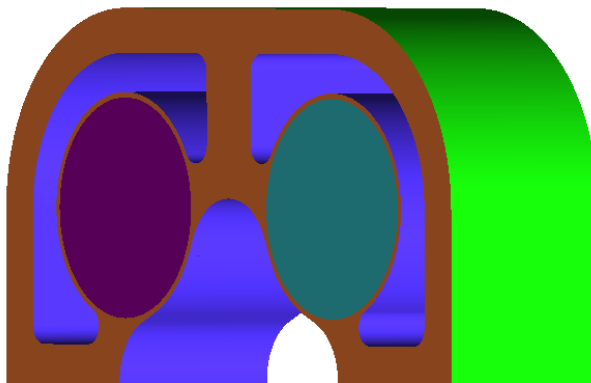
Az egyetlen mód, mellyel elemszámot tudtunk spórolni, a Solid domén hálók elemszámainak csökkentése volt. A Solid domén ötféle elemet tartalmaz, ezek a Shroud (1 db), Footpiece (1 db), Cap (4 db), Rod (4 db) és Helix (4 db). A Shroud és a Cap elemek blokkstrukturált hexaéder hálóval lettek diszkretizálva, vagyis itt az elemszámot már nem tudjuk jelentősen csökkenteni, a Shroud esetében az axiális osztást ritkítottuk meg valamelyest. A Footpiece, Rod és Helix elemek tetraédes hálóval lettek diszkretizálva, ha ezekből blokkstrukturált hexaéder hálót tudunk csinálni, az elemszámokat drasztikusan le tudjuk csökkenteni. Az erre tett sikeres kísérletünket mutatjuk be a továbbiakban.

2.5.1. A FOOTPIECE ELEM ÉS A FLUID DOMÉN HÁLÓJÁNAK TOVÁBBFEJLESZTÉSE

A Footpiece elemszámának csökkentésére két lehetőség kínálkozott. A blokkstrukturált hexaéder háló, valamint a kihúzott háromszög alapú hasáb elemekből álló háló. A blokkolás a lekerekítések és az Interface-k miatt körülményes lett volna, a kihúzott tetraéder hálót a letörés nehezítette meg. Ezért végül azt a döntést hoztuk, hogy módosítani fogunk a geometrián. A blokkstruktúra kialakítása azonban még geometriai módosításokat alkalmazva is sok időt vett volna igénybe, továbbá a módosítások nagyban befolyásolták volna az áramlást. Végül amellettt döntöttünk, hogy eltávolítjuk a letöréseket. Ezzel nem befolyásoljuk jelentősen az áramlást és lehetőségünk nyílik elemszám csökkentésre. A 2-24. ábra a régi, a 2-25. ábra pedig az új geometriát mutatja.

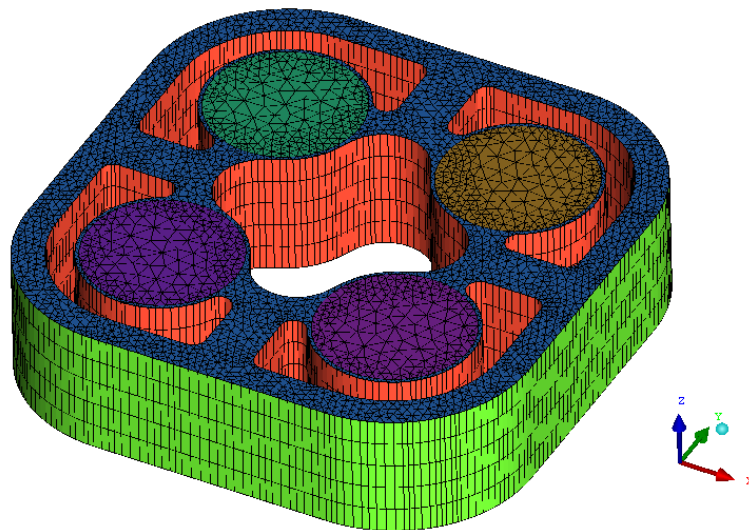


2-24. ábra: Az eredeti Footpiece geometria, letörésekkel (ww_3o)



2-25. ábra: Az új Footpiece geometria, letörések nélkül (ww_3)

A kihúzott hálót úgy állítottuk elő, hogy először csak tetraéderekből álló hálóval töltöttük ki a Footpiece-t, majd az alsó felületen lévő háromszög alapú háló kivételével az összes hálóelemet töröltük. Ezt követően „z” irányba kihúztuk a háromszög felületi elemeket és így kaptuk meg a 2-26. ábra által mutatott kihúzott háromszög alapú hasábokból álló hálót.

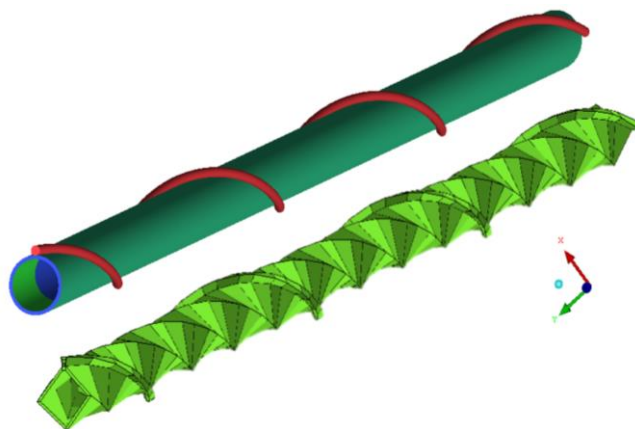


2-26. ábra: Az új kihúzott, háromszög alapú hasáb elemekből álló Footpiece háló (ww_3)

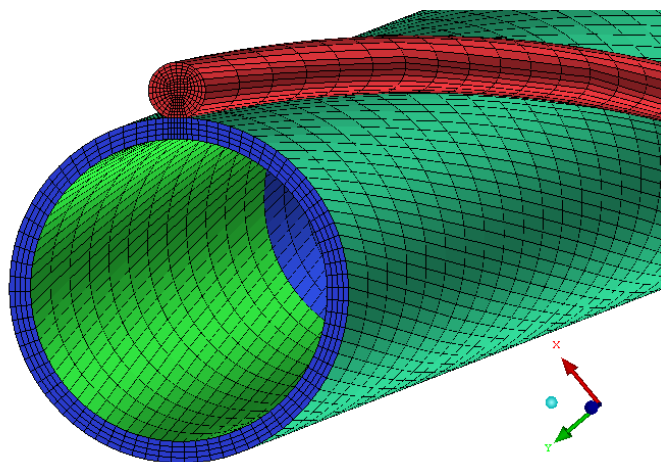
A megváltoztatott geometria hatással van a Fluid hálóra is, ugyanis a letörések nélkül kevesebb a kis felület. A kis felületeket kicsi tetraéder elemekkel kell körbevenni, hogy a geometriát jól kövesse a háló, a prizmatikus elemek pedig még erre épülnek rá. Így a geometriai változtatásnak köszönhetően a Fluid háló mérete is valamelyest csökkent, míg szerkezete egyszerűsödött.

2.5.2. A ROD ÉS HELIX ELEM HÁLÓJÁNAK FEJLESZTÉSE

A Rod esetében nem lehet alkalmazni a kihúzott felületi tetraéder hálót a Helix Interface miatt. A blokkstrukturált hexaéder háló lehetséges, azonban a blokkoknak együtt kell forogniuk az Interface-el. Ugyanez a helyzet a Helix esetében is. Az ilyen forgatott blokkolás elkészítése nagyon időigényes munka. Végül azt a megoldást találtuk ki, hogy a két elemet együtt blokkozzuk. Ezt megtehetjük, hiszen a Rod és a Helix is ugyanahhoz a Solid doménhez tartozik, tehát az anyaguk azonos. Így a blokkozási idő csökkent ahhoz képest, mintha a két elemet külön kellett volna blokkozni, valamint megspóroltunk egy Interface-t. A 2-27. ábra mutatja a blokkstruktúrát, a 2-28. ábra pedig a már elkészült hálót.



2-27. ábra: A Rod és Helix geometriája és a hozzá tartozó közös blokkstruktúra (ww_3)



2-28. ábra: A Rod és Helix közös blokkstrukturált hálója (ww_3)

2.5.3. A RÉGI ÉS AZ ÚJ MODELL ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Az összehasonlítást táblázatos formában végeztem el, a 2-6. táblázat mutatja a két modell közötti különbségeket.

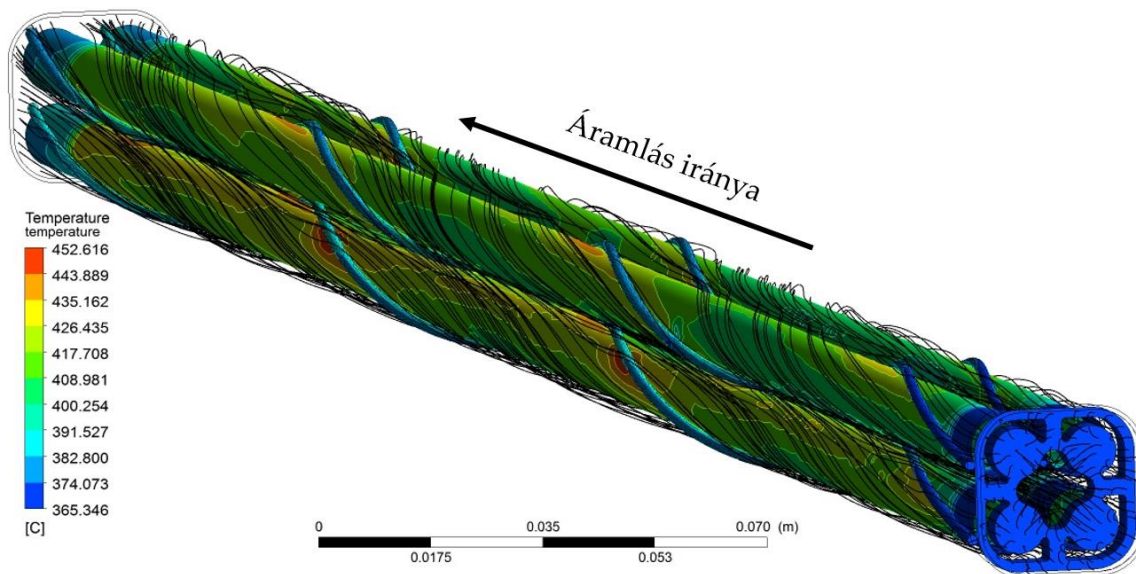
2-6. táblázat: A ww_3o és ww_3 modellek összehasonlítása		
	ww_3o	ww_3
Shroud (1 db)	Blokkstrukturált hexaéder háló Elemek száma: 569 876 Nódusok száma: 484 704	Blokkstrukturált hexaéder háló (axiális osztás megritkítva) Elemek száma: 91 536 Nódusok száma: 74 820
Footpiece (1 db)	Tetraéder háló Elemek száma: 370 685 Nódusok száma: 64 633	Geometriai változtatás a kihúzott tetraéder háléhoz Elemek száma: 45 840 Nódusok száma: 20 925
Cap (4 db)	Blokkstrukturált hexaéder háló Elemek száma (1 db): 18 088 Nódusok száma (1 db): 16 133	Blokkstrukturált hexaéder háló (teljesen azonos a ww_3o-val) Elemek száma (1 db): 18 088 Nódusok száma (1 db): 16 133
Rod és Helix (4 db)	Külön hálózva, tetraéder háló Rod (1 db): <ul style="list-style-type: none"> • Elemek száma: 552 962 • Nódusok száma: 103 280 Helix (1 db): <ul style="list-style-type: none"> • Elemek száma: 518 950 • Nódusok száma: 95 254 Rod & Helix (1+1 db): <ul style="list-style-type: none"> • Elemek száma: 1 071 912 • Nódusok száma: 198 534 	Együtt hálózva, blokkstrukturált hexaéder háló Rod & Helix (1 db): <ul style="list-style-type: none"> • Elemek száma: 179 238 • Nódusok száma: 144 032
Fluid (1 db)	Tetraéder háló (M4), HR A határréteg háló Elemek száma: 13 709 617 Nódusok száma: 3 894 070	Tetraéder háló (M8), HR C határréteg háló Elemek száma: 15 915 931 Nódusok száma: 5 052 121
Teljes modell	Elemek száma: 19 010 178 Nódusok száma: 5 302 075	Elemek száma: 16 842 611 Nódusok száma: 5 788 526
CFX adatok (peremfeltételek, anyagjellemzők, stb.)	A két modellre azonos, lásd 2.3.4 alfejezet	A két modellre azonos, lásd 2.3.4 alfejezet
Futási idők	k-ε: 0 d, 7 h, 15 min, 53 s SST: 0 d, 11 h, 31 min, 31 s BSL: 0 d, 22 h, 30 min, 42 s	k-ε: 0 d, 7 h, 54 min, 3 s SST: 1 d, 11 h, 10 min, 54 s BSL: 1 d, 22 h, 10 min, 18 s

2.6. Az eredmények bemutatása

Az eredmények bemutatása két részből fog állni. Először ismertetem a vizsgált számítási tartományban kialakuló áramlási képet, majd az általunk számolt eredményeket össze fogom hasonlítani a mérési eredményekkel. Az itt bemutatott eredmények a ww_3 végső modelljéből lettek kiértékelve, amely a BSL Reynolds Stress turbulencia modellt használta az M8 hálóval, a HR C határreteg háló alkalmazásával.

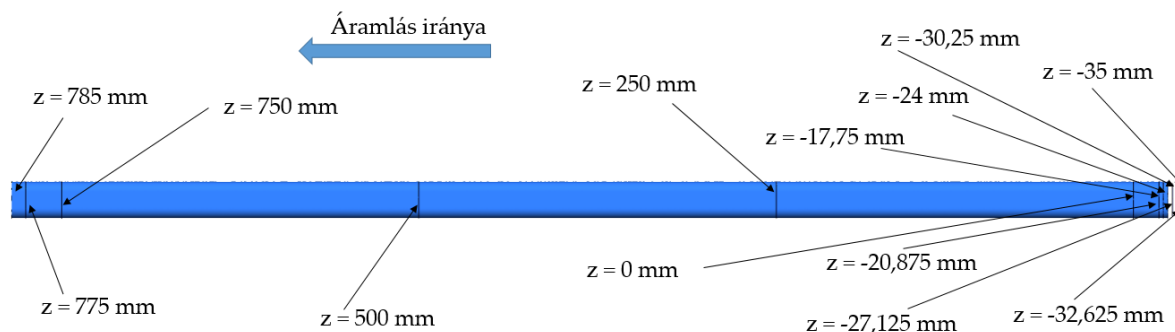
2.6.1. A SZÁMÍTÁSI TARTOMÁNYBAN KIALAKULÓ ÁRAMKÉP

A számítási tartományban kialakuló áramképet a 2-29. ábra mutatja háromdimenziós áramvonalak és a szilárd felületeken ábrázolt hőmérséklet kontúrvonalas eloszlása segítségével. Látható, hogy az áramvonalak követik a helikális távtartók tekerczésének irányát. Ez azt jelenti, hogy a helikális távtartók gyakorlatilag megvezetik az áramlást és a főáramlási irány sebességkomponenséhez (w [m/s]) jelentős merőleges sebességkomponenseket adnak hozzá (u és v [m/s]). Továbbá megfigyelhetők leválási zónák. Ezekben az áramvonalak és így az áramlás nem követi tovább a helikális távtartók meghatározta helikális pályát, hanem átbuknak a távtartók fölött, és itt forrópontok is kialakulnak (2-29. ábra).



2-29. ábra: A számítási tartományban kialakuló 3D áramkép és a szilárd felületek hőmérséklet kontúrvonalas eloszlása

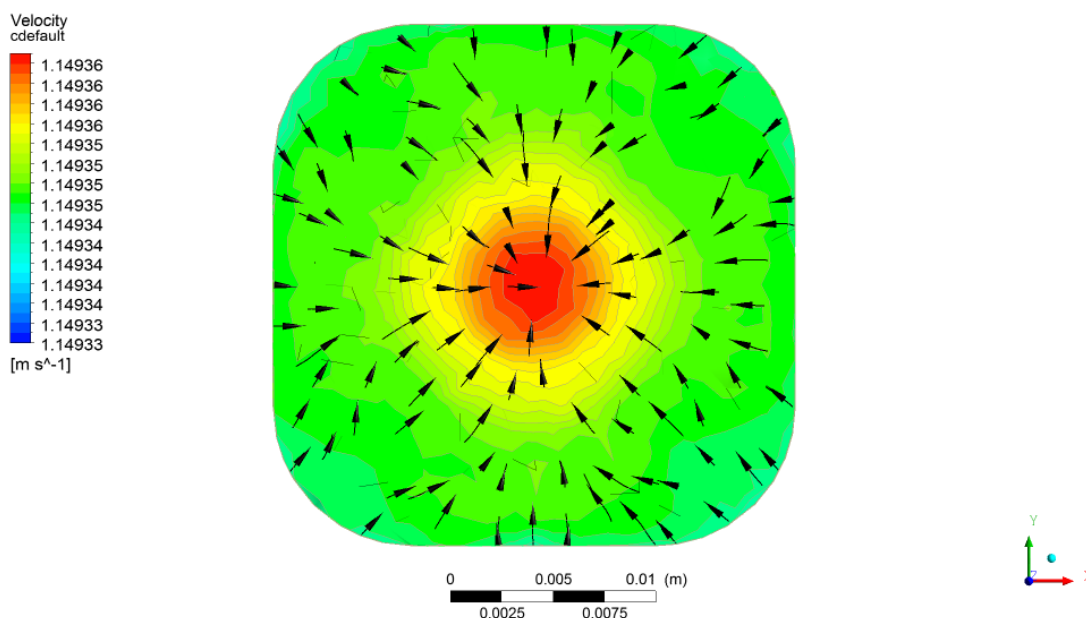
Az áramlást jobb szemléltetése érdekében 2D-s áramvonalakat is készítettünk, melyek metszősíkjait a 2-30. ábra mutatja.



2-30. ábra: Az áramlás szemléltetéséhez készített metszősíkok axiális pozíciói

Ez alapján a geometriát négy részre osztottuk fel. Az első rész az Inlet és a Footpiece közötti rész (két keresztmetszetben szemléltetjük: $z = -35$ mm és $z = -30,25$ mm). A második rész a Footpiece eleje és a Cap-ek vége közötti rész (két keresztmetszetben szemléltetjük: $z = -30,25$ mm és $z = -17,75$ mm). A harmadik rész a Cap-ek végétől az Outlet előtt 10 mm-ig tart (két keresztmetszetben szemléltetjük: $z = -17,75$ mm és $z = 775$ mm). A legutolsó rész pedig az Outlet előtti 10 mm-t foglalja magában (szintén két keresztmetszetben szemléltetjük: $z = 775$ mm és $z = 785$ mm).

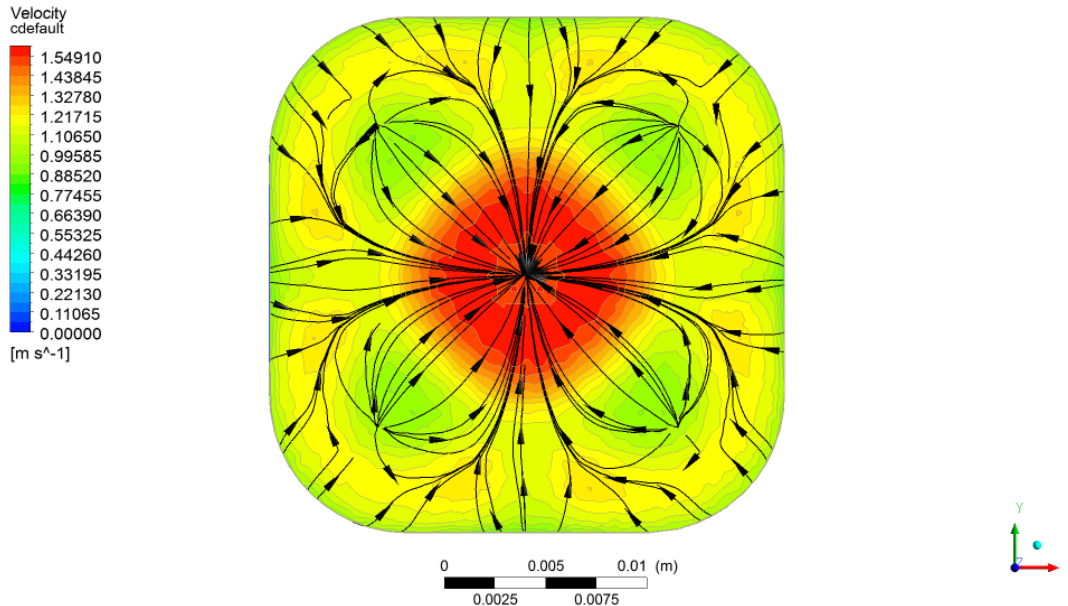
A 2-31. ábra jól mutatja, hogy a belépésnél az áramlási sebesség alig rendelkezik az áramlási irányra merőleges sebesség komponenssel (u és v [m/s]). Az áramvonalak a belépés keresztmetszetében gyakorlatilag egyenesek és párhuzamosak a „ z ” tengellyel, a belépési sebesség pedig állandó.



2-31. ábra: Az áramkép a belépésnél ($z = -35$ mm (Inlet))

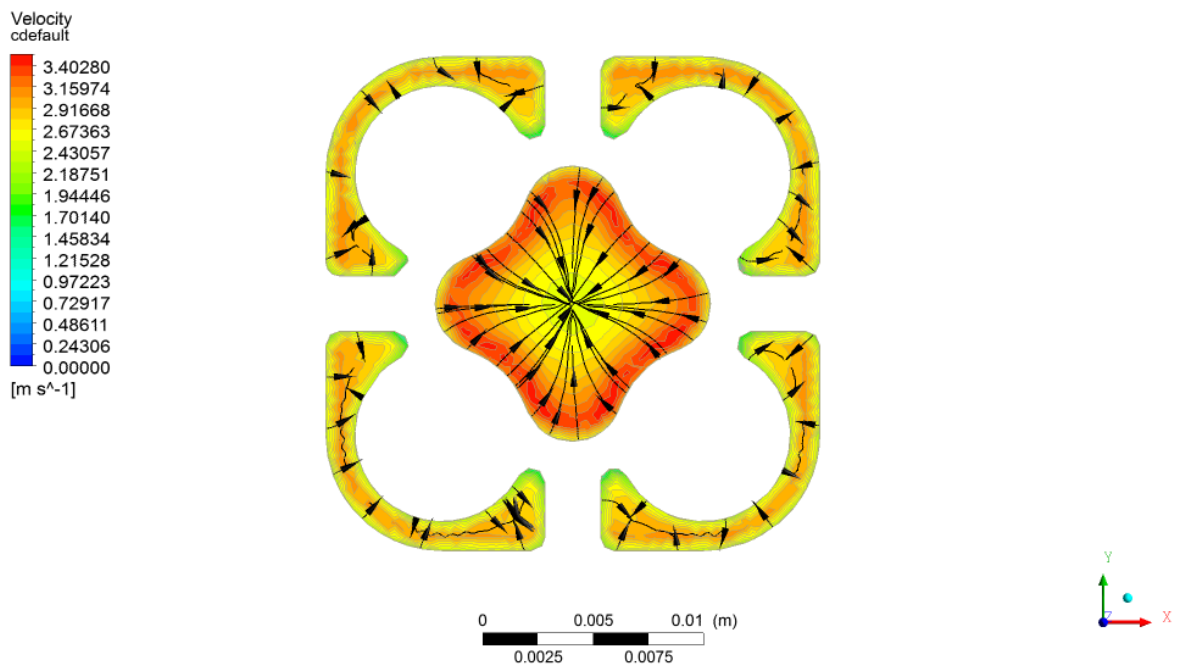
A 2-32. ábra jól mutatja, hogy ahogyan közeledünk a Footpiece-hez, az áramvonalak azok felé a keresztmetszet részek felé tartanak, ahol a Footpiece geometriája átjárható.

Itt a sebesség jellemzően magasabb (lásd 2-32. *ábra*) és kirajzolódik a Footpiece keresztmetszete a sebesség kontúrvonalas eloszlásán.



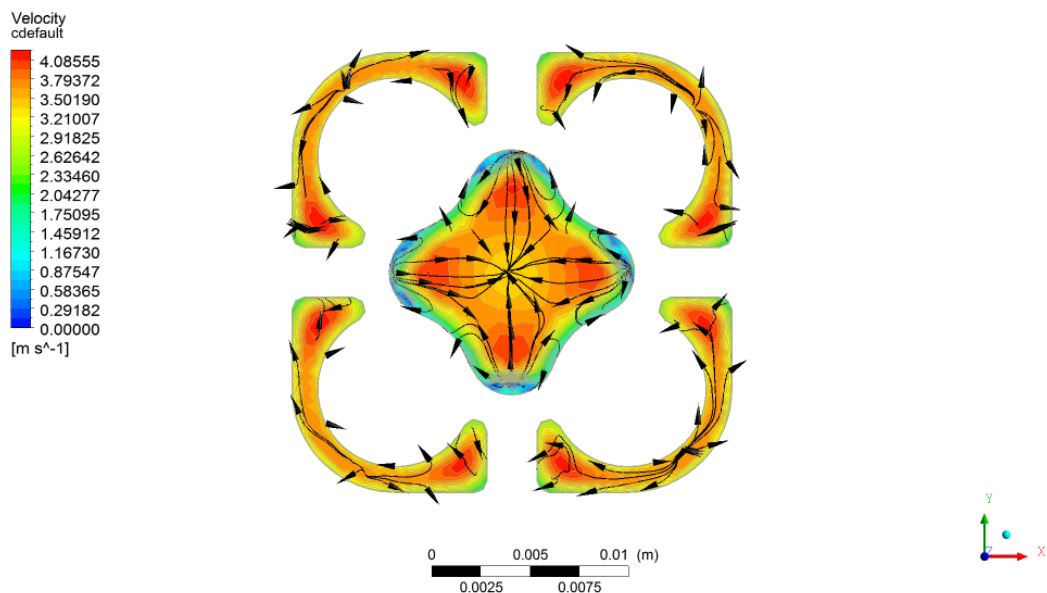
2-32. *ábra*: Az áramkép a Footpiece előtt ($z = -32,625$ mm)

A 2-33. *ábra* mutatja a Footpiece elejét, jól látható, hogy az oldalsó áramlási csatornában a közeg sebessége alacsonyabb és kevesebb áramvonal is van, vagyis az áramlás a középső csatornába koncentrálódik. Ennek oka, hogy a középső csatornában jóval alacsonyabb az áramlási ellenállás, mint a négy oldalsó csatornában. Továbbá ebben a keresztmetszetben az áramlás még kialakulatlan, amit jól mutatnak a szilárd felületek melletti magas sebesség értékek.



2-33. *ábra*: Az áramkép a Footpiece elején ($z = -30,25$ mm)

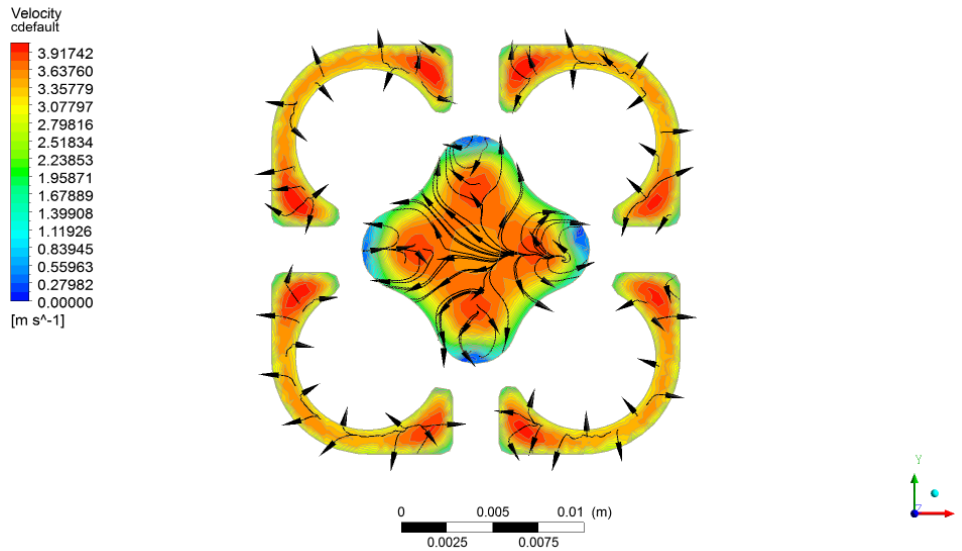
A 2-34. *ábra* mutatja a Footpiece közepén az áramlást. Látható, hogy a szélesebb keresztmetszet részekben a közeg felgyorsul, míg a szilárd falfelületek mellett a tapadás törvényének megfelelően lelassul a közeg.



2-34. *ábra*: Az áramkép a Footpiece közepén ($z = -27,125$ mm)

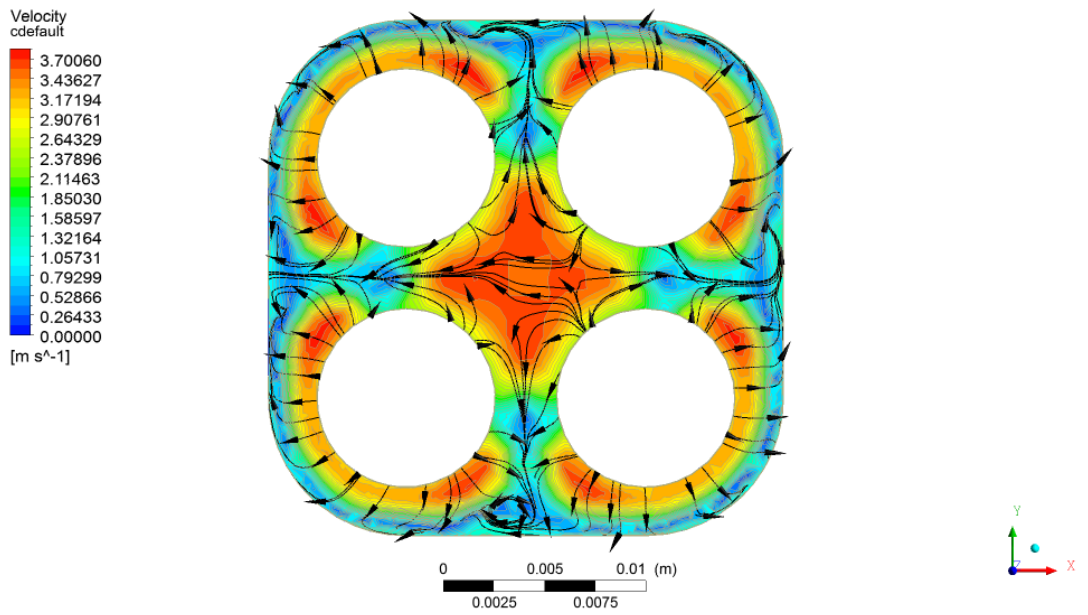
A 2-35. *ábra* mutatja az áramlást a Footpiece végénél felvett keresztmetszetben. Megfigyelhető, hogy az oldalsó és középső csatornákból a közeg elindul az át nem áramlott

keresztmetszeti részek felé (kifelé), mivel az átáramlott keresztmetszet hamarosan nagymértékben kibővül.



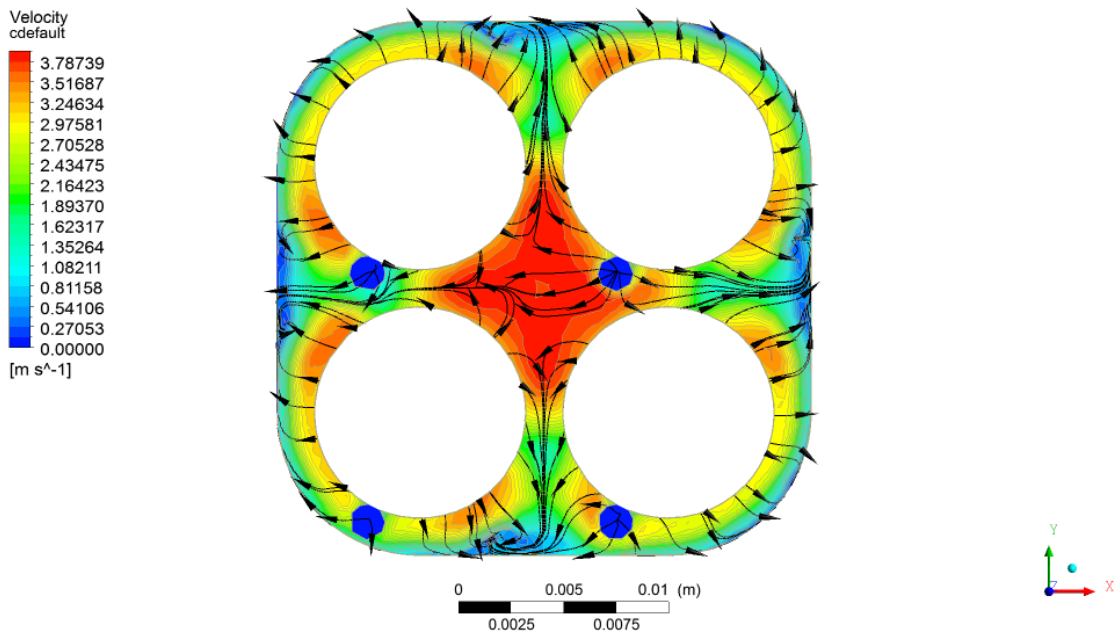
2-35. ábra: Az áramkép a Footpiece végén ($z = -24$ mm)

A 2-36. ábra egy köztes állapotot mutat, ahol a Rod-ok még nem érték el a teljes átmérőjüket (ha visszagondolunk a geometriára, ez a Cap-ek szakasza). Látható, hogy az áramvonalak a Cap felületétől kifelé mutatnak, ahogy a csonka kúp átmérője folyamatosan nő. Az ábrán apróbb örvények kialakulását is megfigyelhetjük, például alul középen. A kontúrvonalas sebességprofil még nagymértékben magán viseli a Footpiece keresztmetszetének nyomát: itt jelentősen magasabbak a sebesség értékek. A tesztkazetta fala mellett mindenhol alacsony sebességgel jellemezhető áramlás alakul ki.



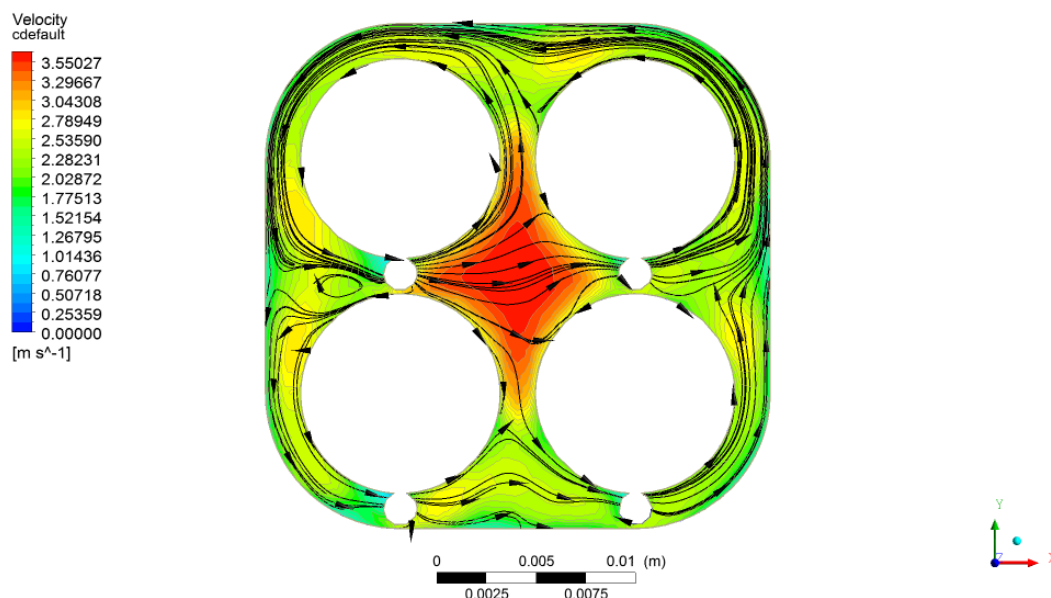
2-36. ábra: Az áramkép a Cap-ek magasságának felénél ($z = -20,875$ mm)

A 2-37. ábra mutatja a helikális távtartók elejét. Látható, hogy az áramvonalak eltartanak a távtartóktól. Továbbá, a középső szubcsatornában figyelhető meg a legmagasabb áramlási sebesség. Ez előnyösnek minősíthető, hiszen ez az egyedüli olyan szubcsatorna, melyet négy oldalról fűtenek a fűtőelem pálcák. Ebben a keresztmetszetben már alig látható a Footpiece keresztmetszetének nyoma a kontúrvonalas sebesség eloszlásban.



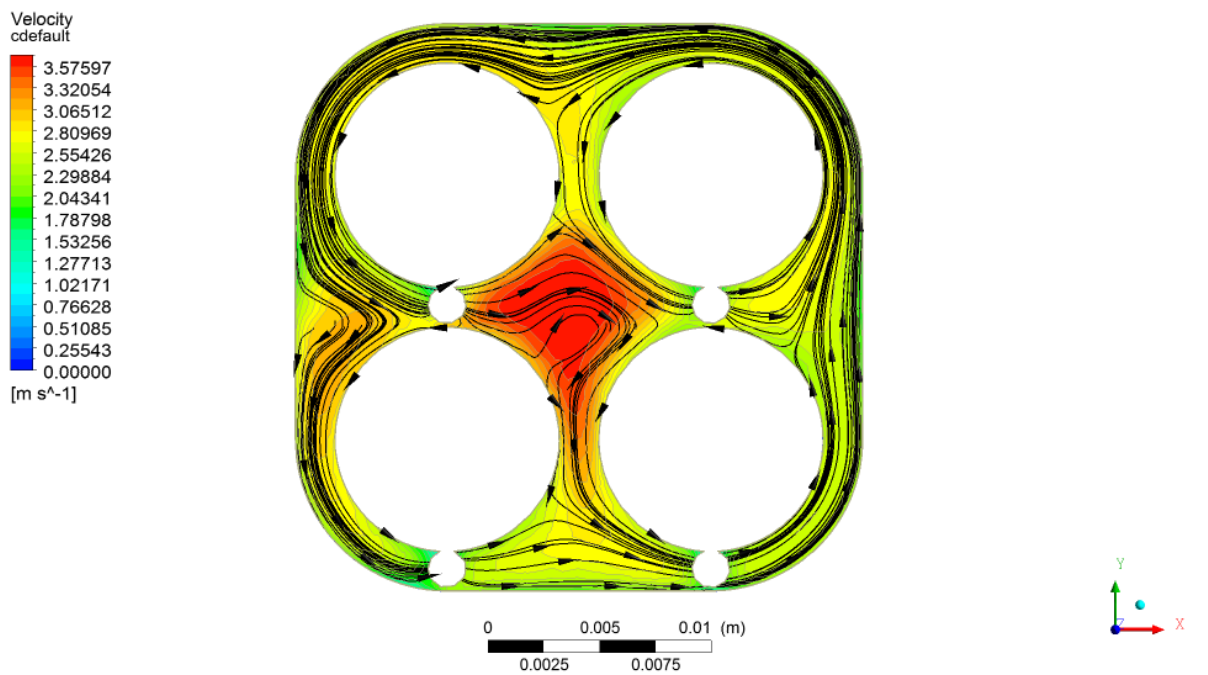
2-37. ábra: Az áramkép a helikális távtartók kezdeténél ($z = -17,75$ mm)

A 2-38. ábra mutatja az áramlást a fűtött szakasz elején. Eddigre már az áramlási sebesség nagyjából homogenizálódott, egyedül a középső szubcsatornában gyorsabb a közeg, ami az alacsonyabb áramlási ellenállásnak köszönhető. A tesztkazetta fala mellett az áramlásban egy, az óra mutató járásával ellentétes fő irány fedezhető fel, ami annak köszönhető, hogy a helikális távtartók ebbe az irányba vezetik az áramlást.



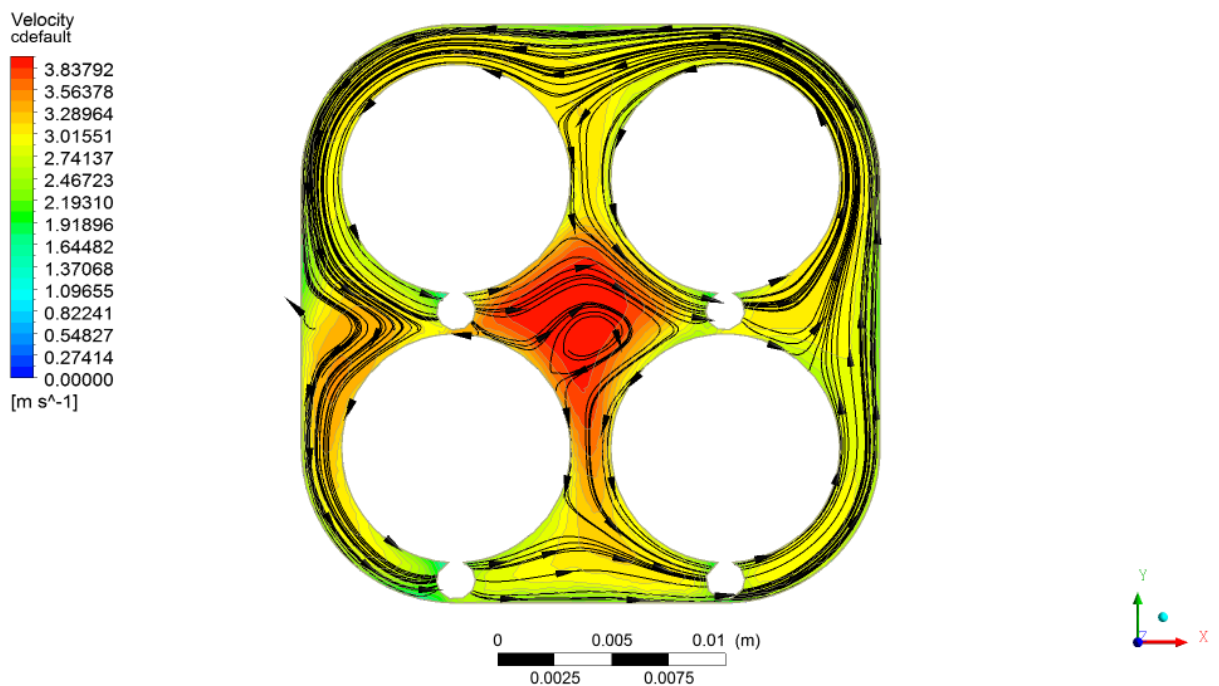
2-38. ábra: Az áramkép a fűtött szakasz kezdetén ($z = 0$ mm)

A 2-39. ábra 250 mm-el feljebb helyezkedik el a fűtött szakasz kezdetéhez képest, ami egy teljes körülfordulást jelent a helikális távtartók számára. Látható, hogy a köráramlás a tesztkazetta fala mellett felerősödött, és az áramlás átlagsebessége is nagyobb lett. Ez utóbbi oka az, hogy a közeg átlagsűrűség a fűtés miatt csökken, ami pedig az állandó tömegáram miatt egy gyorsító hatáson keresztül növeli az átlagsebességet. A legnagyobb áramlási sebességet továbbra is a középső szubcsatornában figyelhetjük meg. Megfigyelhető, hogy a középső szubcsatornába éppen beforgó helikális távtartó által megvezetett közeg egy örvényt kelt a középső szubcsatornában, amely az óramutató járásával megegyező irányú irányítással rendelkezik.



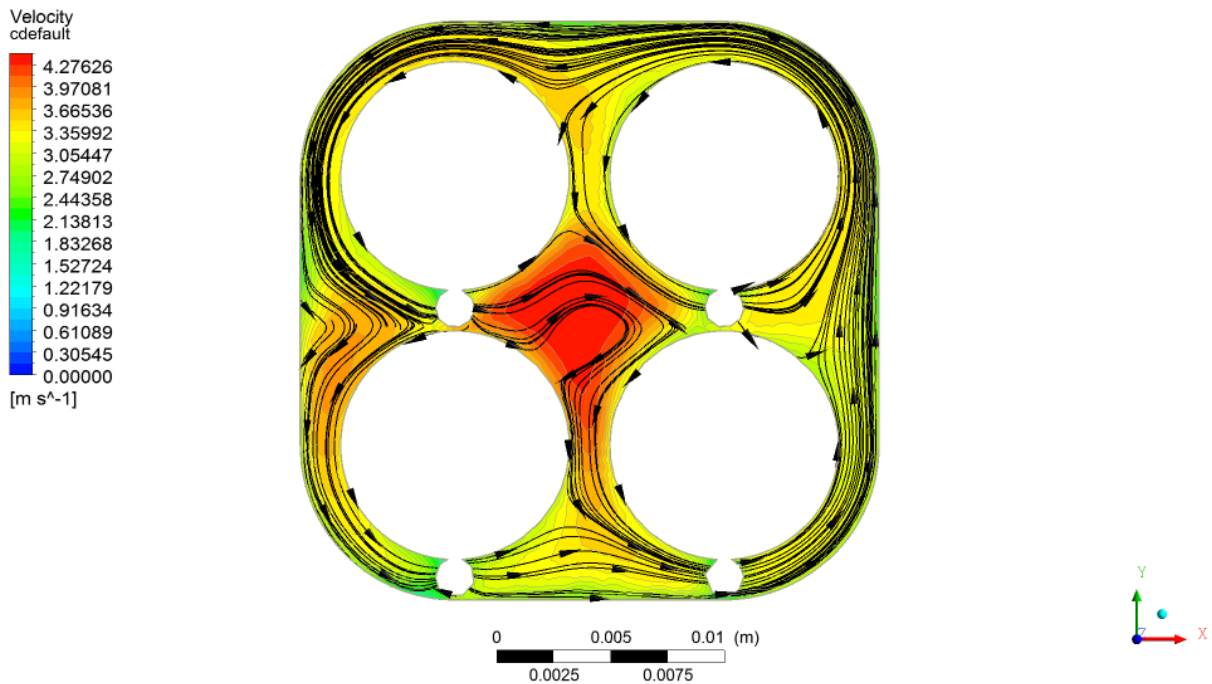
2-39. ábra: Az áramkép a fűtött szakasz első menetemelkedésének végén ($z = 250$ mm)

A 2-40. ábra az előző ábrához képest szintén egy teljes menetemelkedéssel eltolt áramképet mutat. Az előző áramképhez képest nincs sok változás. A közeg sebessége tovább nőtt a fűtés miatti átlagsűrűség csökkenéséből származó, az áramlást gyorsítás hatás miatt.



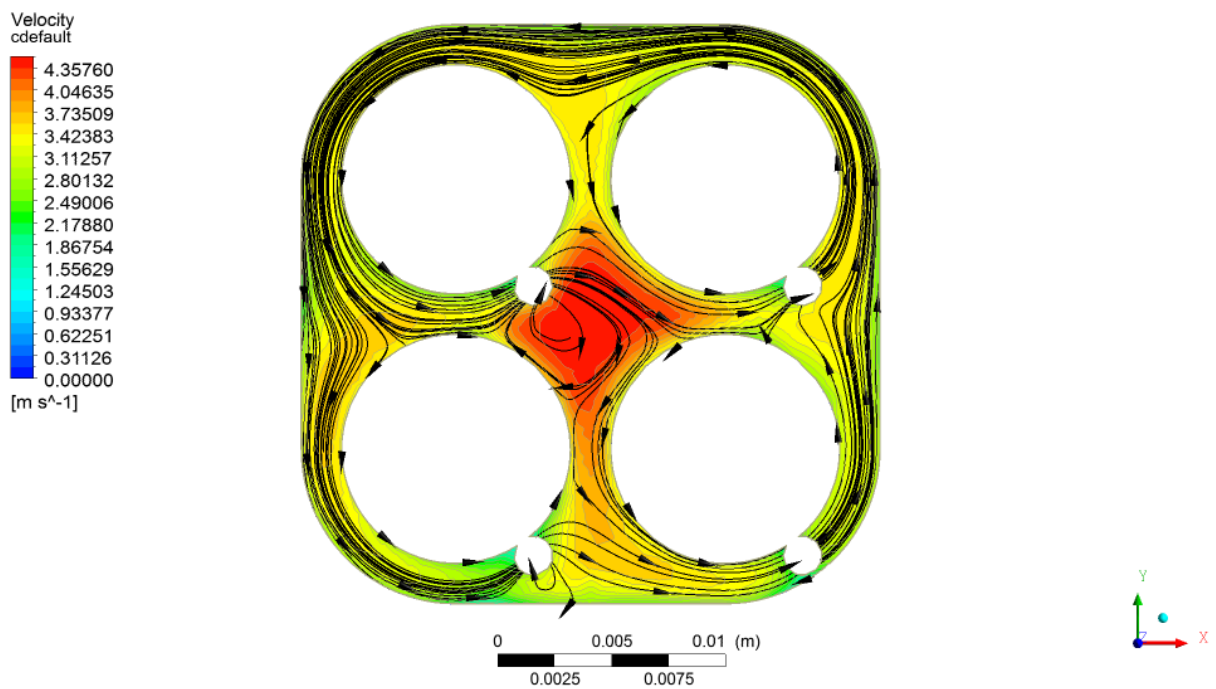
2-40. ábra: Az áramkép a fűtött szakasz második menetemelkedésének végén ($z = 500$ mm)

A 2-41. ábra a fűtött szakasz végét mutatja, szintén egy teljes menetemelkedéssel eltolva (vagyis 250 mm-el feljebb, mint az előző ábra pozíciója). Sok változás nem figyelhető meg, de az áramlás átlagsebessége tovább nőtt a gyorsító hatás következtében, míg a belső örvény pedig valamivel intenzívebbé vált.



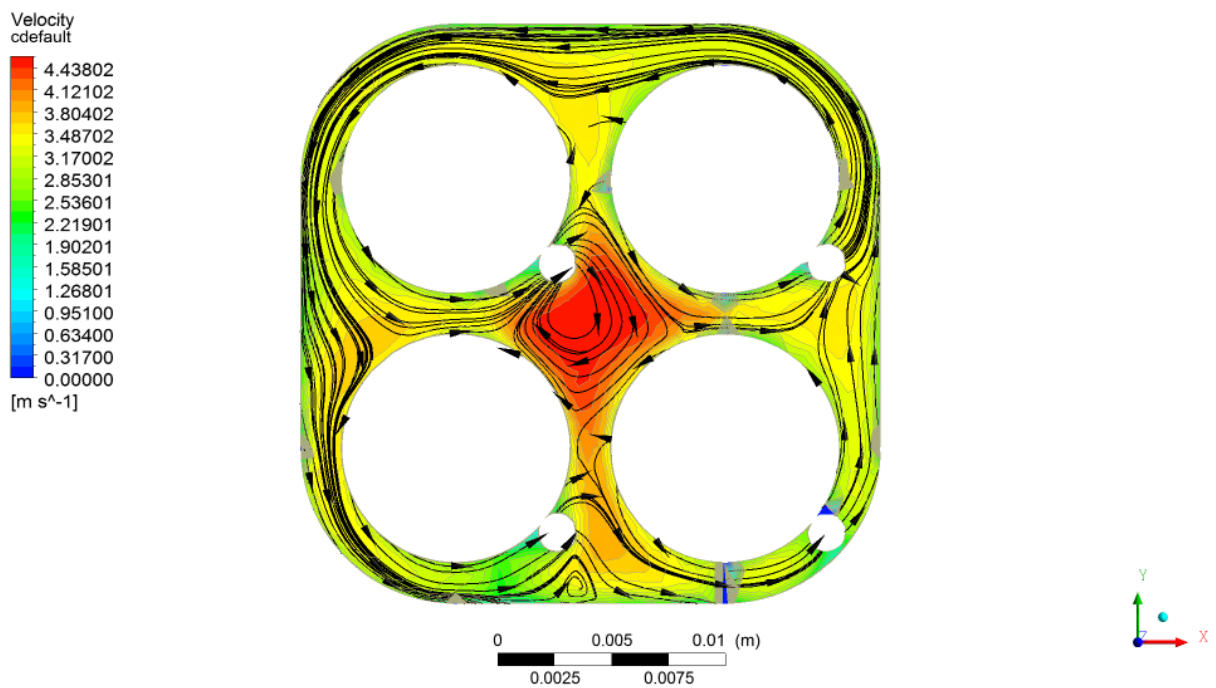
2-41. ábra: Az áramkép a fűtött szakasz harmadik menetemelkedésének végén ($z = 750$ mm)

A 2-42. ábra 10 mm-el az Outlet előtt mutatja az áramképet. Elmondható, hogy jellemben az áramlás már nem változott. Továbbá megfigyelhető, hogy a közepen kialakult örvény kissé arrébb helyezkedik el. Ez a helikális távtartók forgásából következik, mivel a középső szubcsatornába behatoló távtartó huzal pozíciója változik, ami az általa keltett örvény kismértékű eltolódását eredményezi.



2-42. ábra: Az áramkép a kilépés előtt 10 mm-rel ($z = 775$ mm)

A 2-43. ábra az Outlet-en mutatja az áramképet. Lényegi változás nem figyelhető meg az előző ábrához képest: az áramlás maximális sebessége egy kicsit tovább nőtt a gyorsító hatás miatt, a középső örvény pedig elmozdult a távtartó pozíciójának további elfordulása miatt.



2-43. ábra: Az áramkép a kilépésnél ($z = 785$ mm)

2.6.2. A MÉRÉSI EREDMÉNYEKKEL ÖSSZEVETETT SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK

A mérési eredményeket csak nagyon sokára, 2015 nyara végén kaptuk meg. Mint az eredményekből kiderült, a mérésekhez nem is teljes mértékben azokat a peremfeltételeket használták, amelyek a feladat kiírásban szerepeltek. A tömegáram a mérésekben kerekén 0,4 kg/s volt a benchmark kiírásban szereplő 0,390625 kg/s helyett. A fűtőteljesítmény pedig 97 kW volt 100 kW helyett. A termoelemeket a mérési eredmények dokumentációja alapján a Rod-ok belső felületeire erősítették, arról viszont nem kaptunk információt, hogy milyen módon: szimplán a belső felületre, esetleg a belső felületbe vájít horonyba, stb. Az eredményeket közlő dokumentum melléklete szerint a mért hőmérséklet értékek a külső felületre vonatkoznak [15].

Összesen 12 adatsort kaptunk, mi ebből azt választottuk ki, mely legközelebb esett az általunk alkalmazott peremfeltételekhez (lásd 2-7. *táblázat*). Az eredményeket a 2-8. *táblázat* mutatja.

2-7. *táblázat*: Mért jellemzők [15]

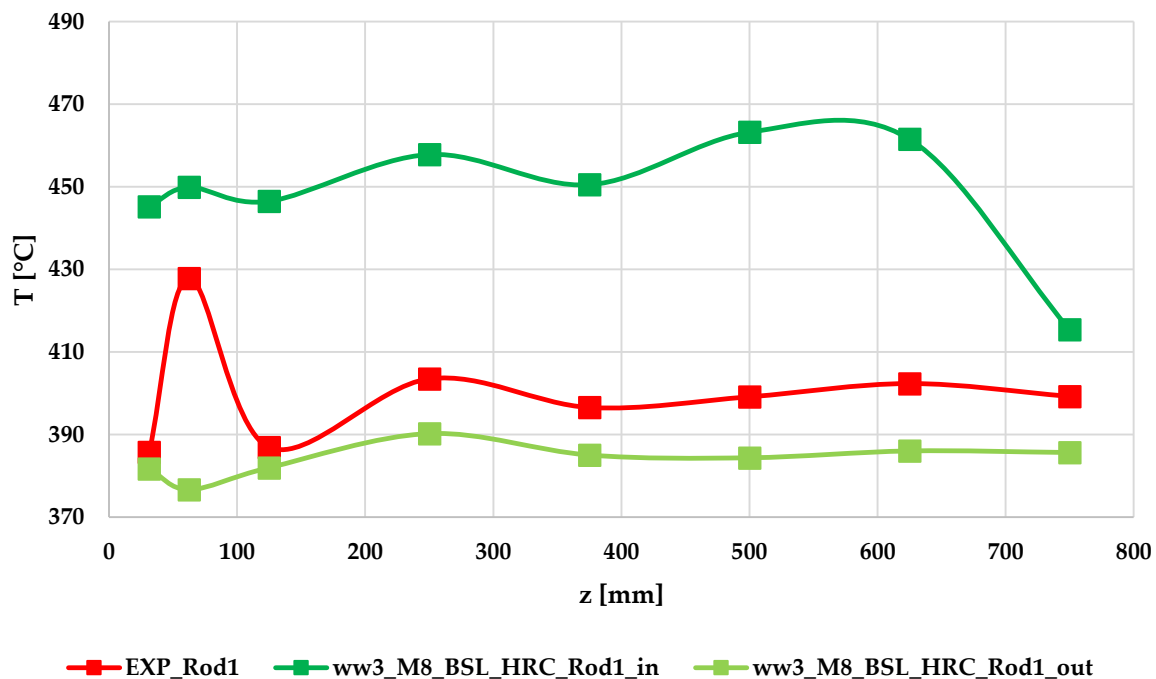
Mért jellemző	Érték
Nyomás [MPa]	24,991
dP [kPa]	17,096
Tömegáram [kg/min]	24,02
Teljesítmény [kW]	96,611
T _{in} [°C]	366,02

2-8. *táblázat*: Mérési eredmények [15]

z [mm]	Szög [°]	T _{Rod1} [°C]	T _{Rod2} [°C]	T _{Rod3} [°C]	T _{Rod4} [°C]
31,25	0	385,73	412,36	385,7	421,04
62,5	315	427,82	423,74	387,09	408,03
125	90	386,9	394,74	407,94	393,52
250	45	403,49	426,17	410,98	427,77
375	180	396,56	401,39	401,25	403,69
500	135	399,14	418,96	413,39	415,14
625	270	402,35	391,01	394,93	394,94
750	225	399,25	415,94	373,06	408,31

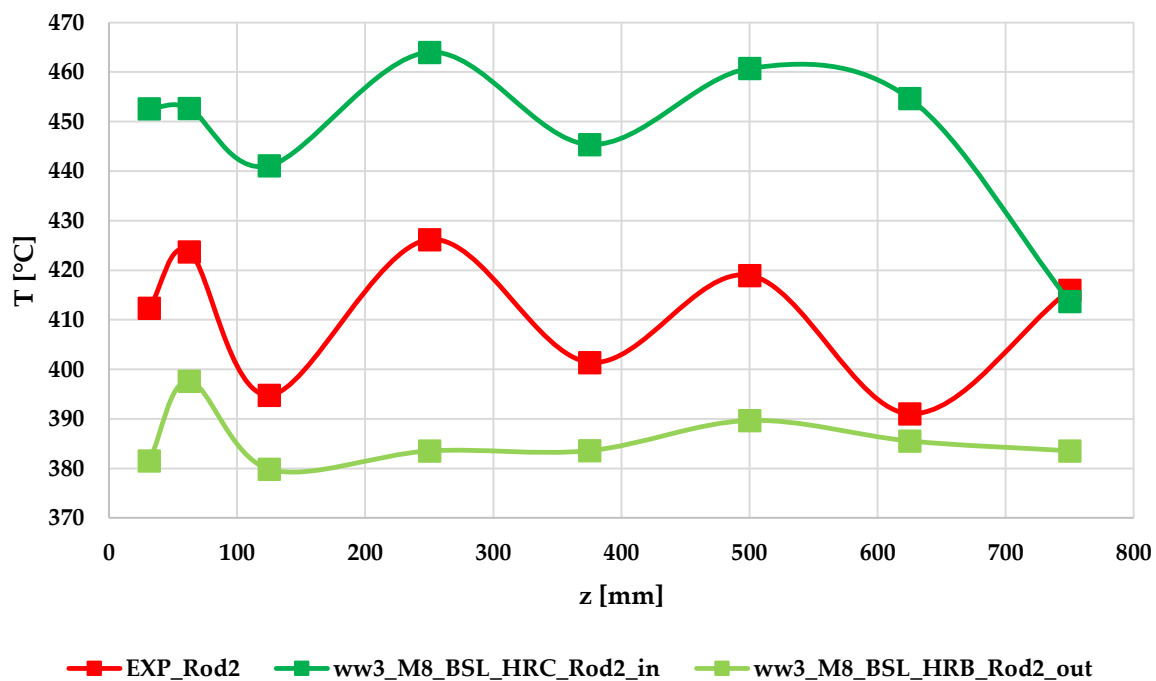
A 2-8. *táblázatban* látható szögeket a 2-2. *ábra* segítségével lehet könnyen elképzelni. A végső eredmények (M8-as háló, HR C határréteg háló és BSL Re Stress turbulencia modell) és a mérési pontok összevetését a 2-29. *diagram*, 2-30. *diagram*, 2-31. *diagram* és 2-32. *diagram* mutatja.

Végső eredmények, Rod1



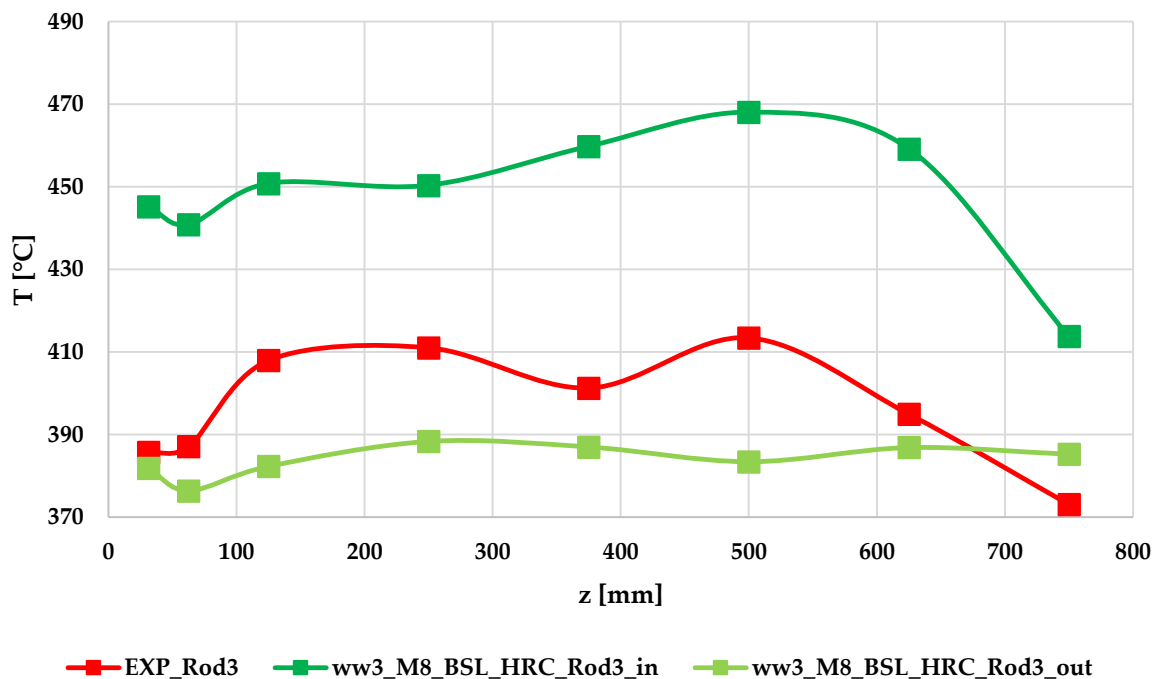
2-29. diagram: A végső eredmények és a mérési eredmények összevetése Rod 1-re

Végső eredmények, Rod2



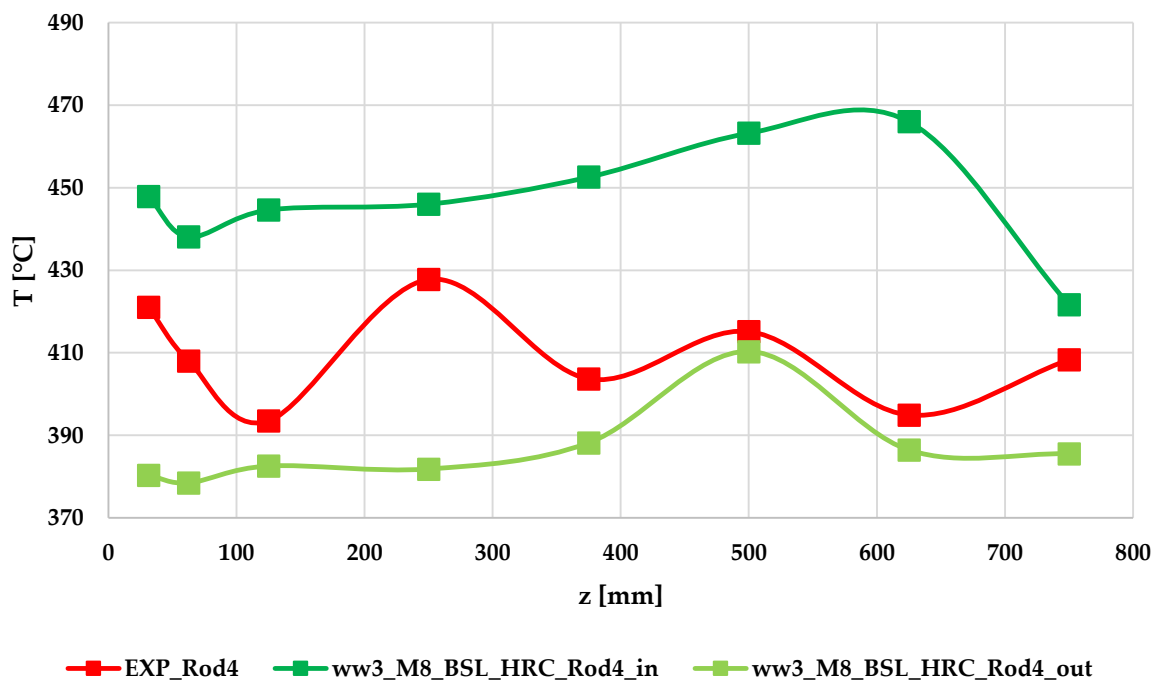
2-30. diagram: A végső eredmények és a mérési eredmények összevetése Rod 2-re

Végső eredmények, Rod3



2-31. diagram: A végső eredmények és a mérési eredmények összevetése Rod 3-ra

Végső eredmények, Rod4



2-32. diagram: A végső eredmények és a mérési eredmények összevetése Rod 4-re

Ismételve az érzékenységi vizsgálatoknál megállapított eredményt, elmondhatjuk, a mérési és a számítási eredmények összevetése nyilvánvalóvá tette, hogy a mért értékek szisztematikusan a számított külső felületi érték fölött és belső felületről kivett számított értékek alatt helyezkednek el. Ebből arra következtetünk, hogy a termoelemek a belső pálcafelületbe munkált hornyokba (esetleg furatokba) lettek rögzítve.

3. A HELIKÁLIS TÁVTARTÓ MENETEMELKEDÉSÉNEK HATÁSA A HŐÁTADÁSRA

3.1. A feladat és a vizsgált geometriák ismertetése

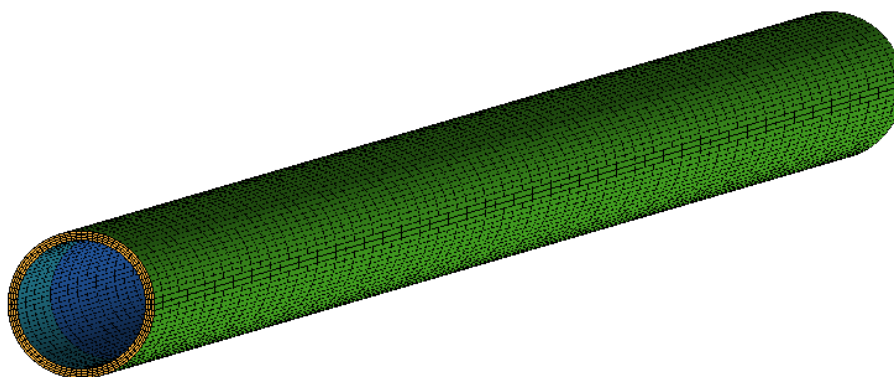
A projekt lezárása után a tanszéken tovább foglalkoztunk az SCWR-FQT projektben bemutatott geometrián. Azt vizsgáltuk, hogy a helikális távtartó menetemelkedésének milyen hatása van a hőátadásra. Összesen hét geometriát terveztünk elkészíteni, melyből az egyik már adott volt (a 2.3.1. és 2.5. fejezetekben bemutatott geometria, melyben a helikális távtartó háromszor tekeredik körbe a fűtőelem pálcák körül). A 3-1. táblázat mutatja, hogy milyen menetemelkedésekkel rendelkező távtartókat terveztünk megvizsgálni.

3-1. táblázat: A menetemelkedések száma

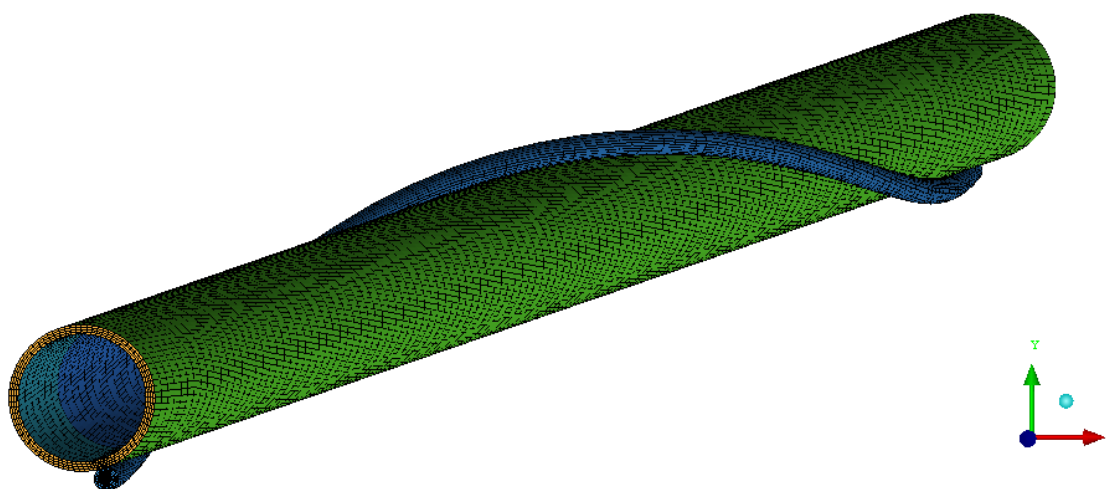
Menetek száma [db]:	0	1	2	3	4	5	6
Menetemelkedés [mm]:	0	750	375	250	187,5	150	125

A geometriai változtatást egyedül a helikális távtartó jelentette, melyet ki kellett szerkesztenünk minden egyes geometriára. A geometriák diszkrétizálását a 2.4. fejezetben bemutatott vizsgálatokból kiindulva végeztük el (tehát M8-as alap háló és HR C típusú határréteg háló). A geometria alapját a 2.5. fejezetben bemutatott továbbfejlesztett geometria adta (éppen ezért a modellek nevei is az új geometriának megfelelő típusú nevet kapták, ww_0-tól ww_6-ig tartó számozással). A CFX paraméterek a 2.3.4. fejezetben bemutatottakkal azonosak.

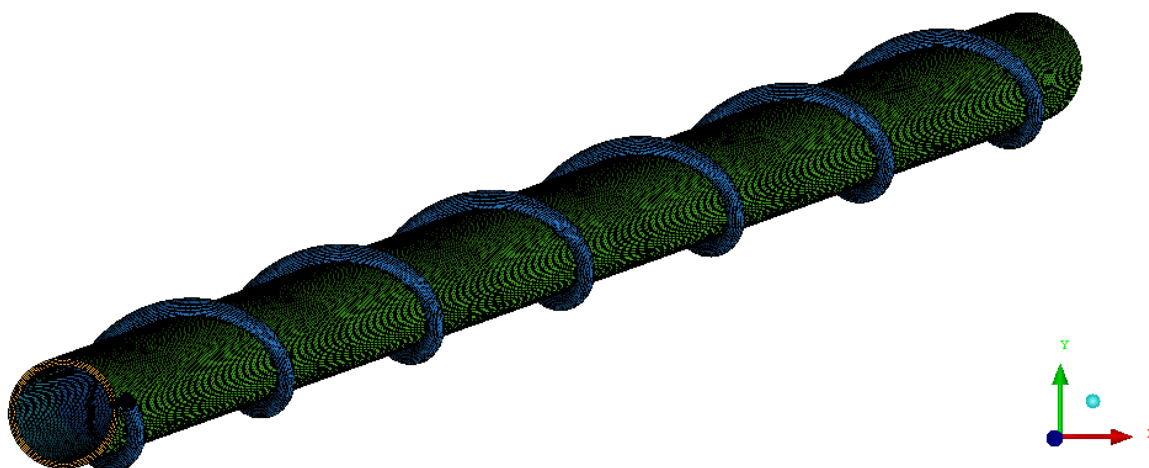
Pár kép a diszkrétizált helikális távtartókról és fűtőelem pálcákról (3-1. ábra, 3-2. ábra, 3-3. ábra):



3-1. ábra: A ww_0 geometria fűtőelem pálcájának hálója



3-2. ábra: A ww_1 geometria fűtőelem pálcájának és helikális távtartójának hálója



3-3. ábra: A ww_6 geometria fűtőelem pálcájának és helikális távtartójának hálója

A minél több volt a menetemelkedések száma, a blokkozást annál kisebb „szeletekből” kellett elkészíteni, hogy a blokkok jól le tudják követni a geometriát. Ennek köszönhetően a fűtőelem pálca és helikális távtartó (Rod & Helix) geometriák elemszámai nőttek, ahogy haladtunk a nagyobb menetemelkedésű távtartókat tartalmazó geometriákig, azonban még a ww_6 esetében is csapán fele akkora elemszámot kaptunk, mint egy ww_3o Rod & Helix esetében (lásd 3-2. táblázat).

3-2. táblázat: Rod & Helix geometriák elemszámai

Menetek száma [db]:	0	1	2	3	4	5	6
Elemek száma: [db]:	40 160	100 320	102 556	179 238	263 242	329 662	517 642

A 3-3. táblázat a modellek teljes elemszámait és a BSL Reynolds Stress turbulencia modelles számítások futási idejét mutatja.

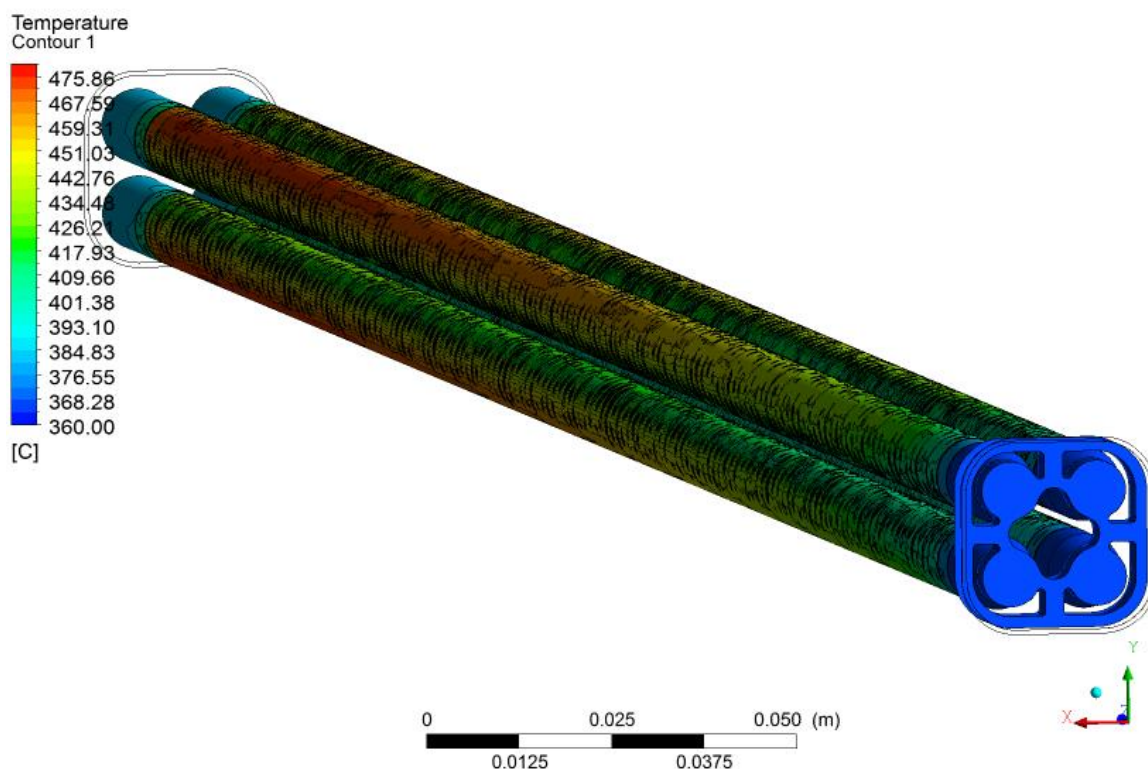
3-3. táblázat: A teljes modellek elemszámai és futási ideje

Menetek száma [db]:	Elemek száma [db]	Futási idők (BSL-Re):	Futáshoz használt szálak
0	15 286 623	1 d, 2 h, 38 min, 26 s	24
1	16 213 499	0 d, 21 h, 22 min, 14 s	24
2	16 707 753	1 d, 21 h, 28 min, 6 s	24
3	16 842 611	1 d, 22 h, 10 min, 18 s	24
4	16 598 540	1 d, 4 h, 47 min, 55 s	16
5	17 400 552	1 d, 13 h, 0 min, 59 s	16
6	18 387 737	1 d, 22 h, 43 min, 35 s	24

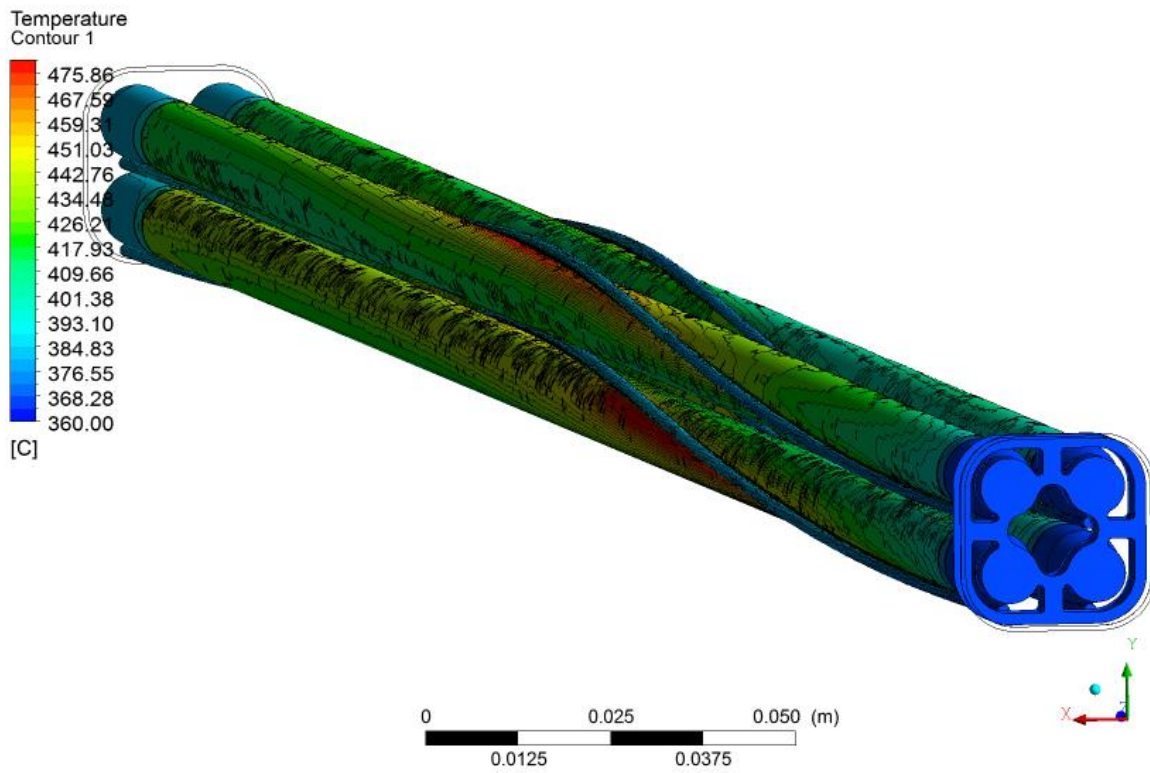
3.2. Eredmények bemutatása

A számítások futása nem olyan régen fejeződött be, így a kiértékelések még folyamatban vannak. Jelenleg csak előzetes eredmények bemutatására van lehetőségünk, melyek alapján a trendek már látszanak, azonban részletes eredmények még nem állnak rendelkezésre.

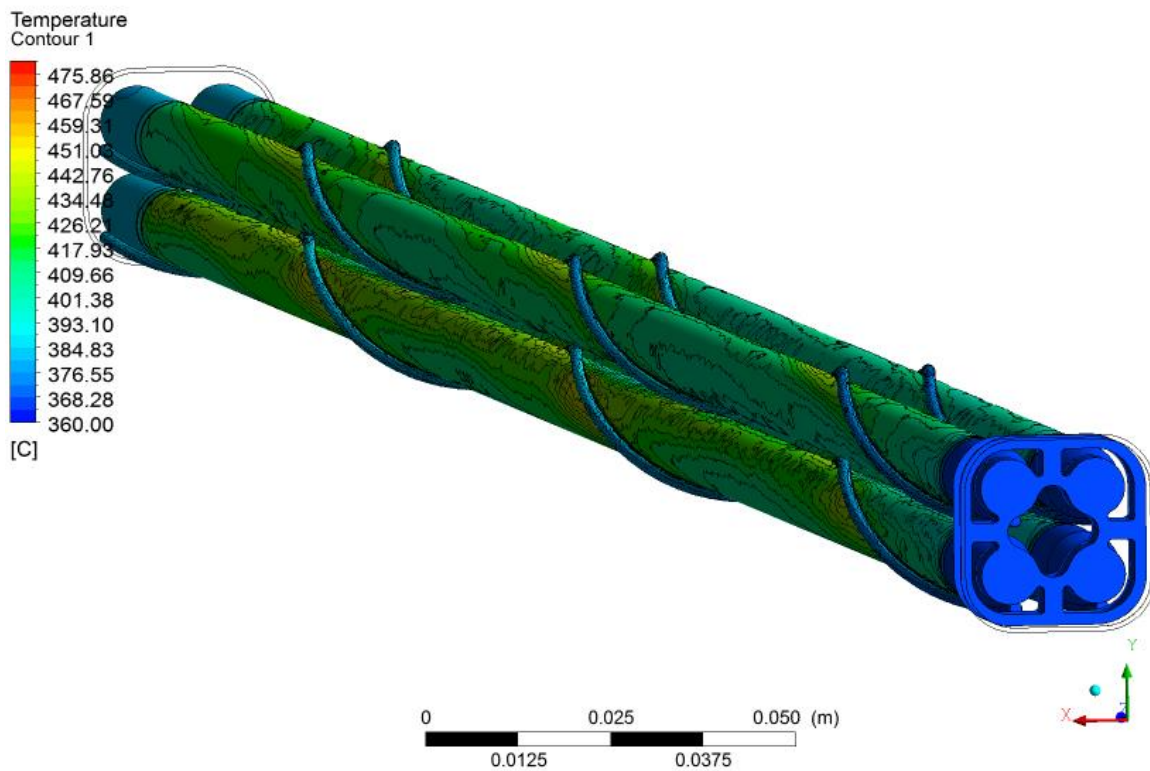
Eddig csak a hőmérséklet és a sűrűség alakulását vizsgáltuk vizuálisan. A 3-4. ábra, 3-5. ábra, 3-6. ábra és 3-7. ábra a hőmérséklet alakulását mutatják a távtartók menetemelkedési számának függvényében. Megfigyelhető, hogy a Rod-ok felszínének hőmérséklete a tekeredések számának növekedésével csökken.



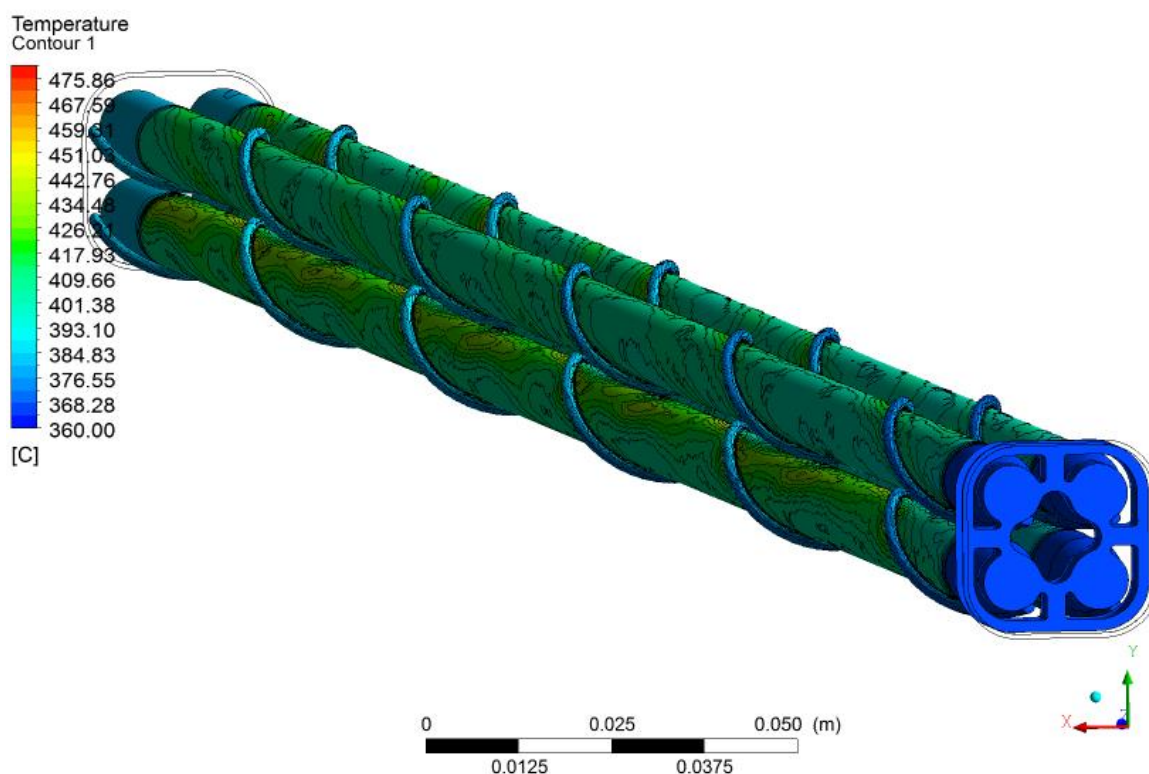
3-4. ábra: A hőmérséklet kontúrvonalas eloszlás a ww_0 geometria esetén a szilárd elemek felületén



3-5. ábra: A hőmérséklet kontúrvonalas eloszlás a ww_1 geometria esetén a szilárd elemek felületén

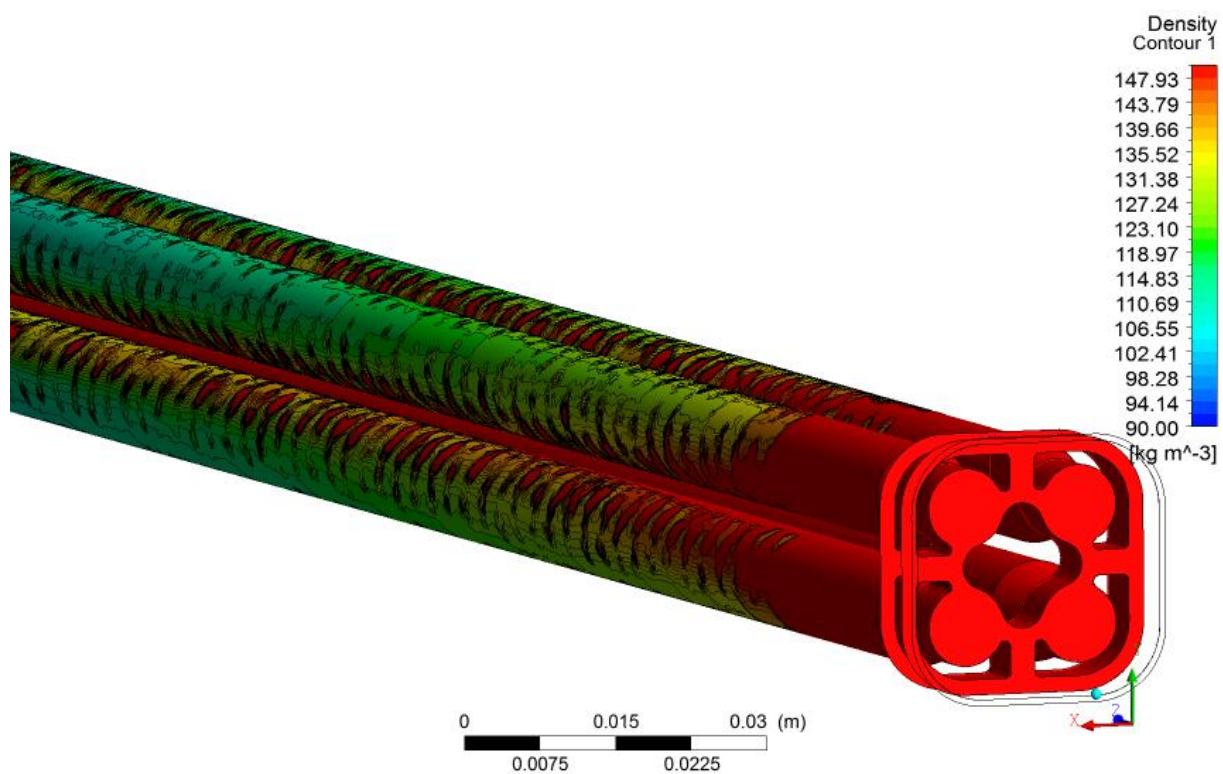


3-6. ábra: A hőmérséklet kontúrvonalas eloszlás a ww_3 geometria esetén a szilárd elemek felületén

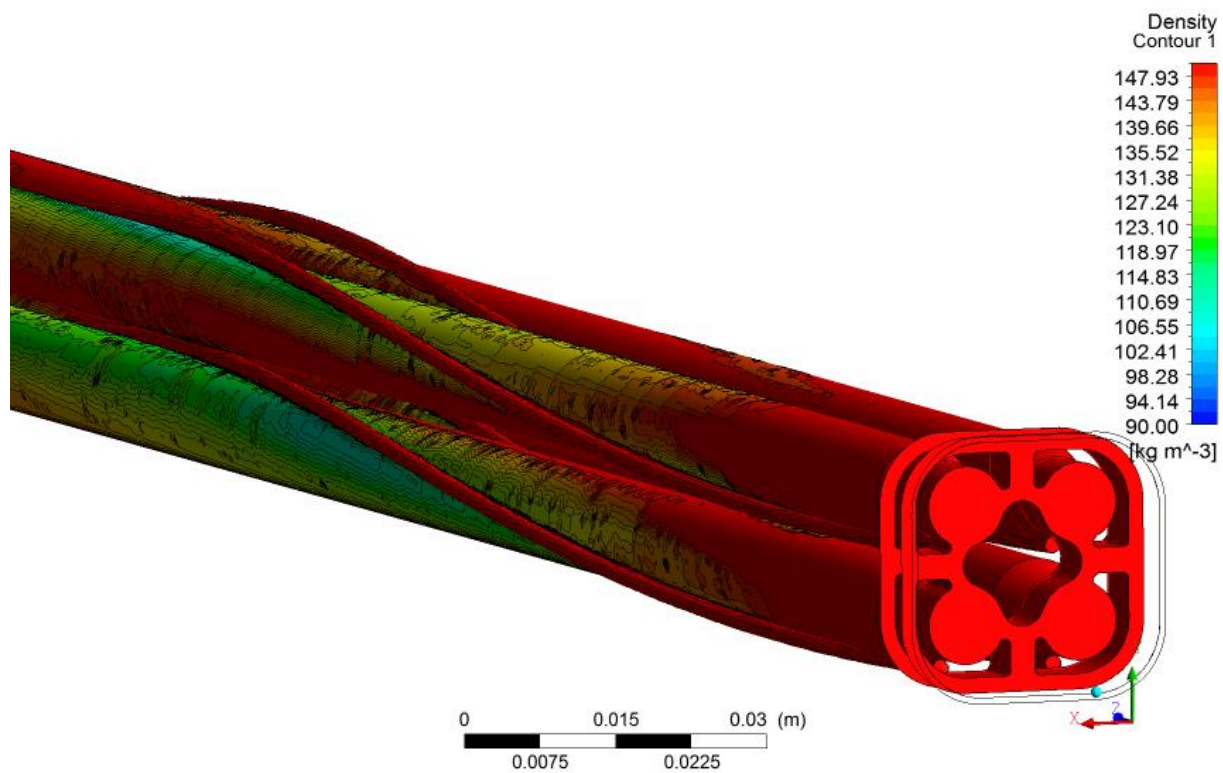


3-7. ábra: A hőmérséklet kontúrvonalas eloszlás a ww_5 geometria esetén a szilárd elemek felületén

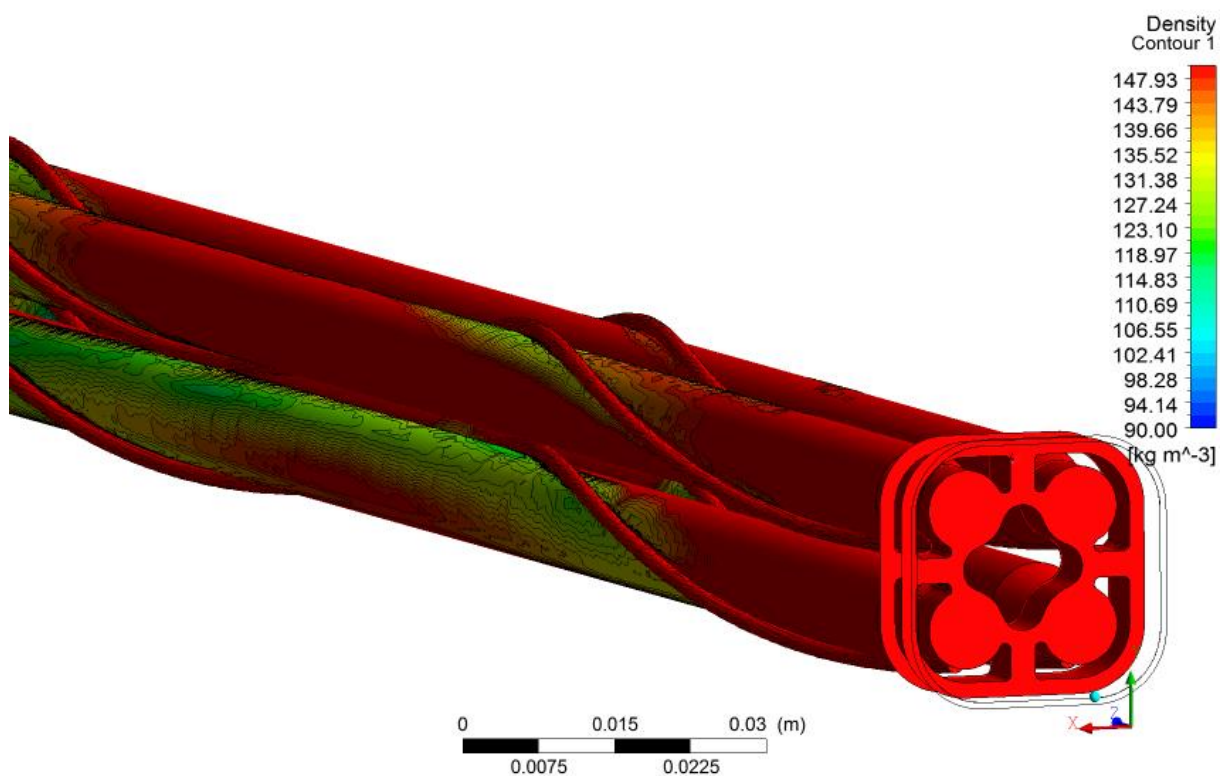
A másik vizuálisan vizsgált paraméter a sűrűség. A vizuális vizsgálatot nehezzé tette, hogy a pszeudókritikus fázisátmenet után a hűtőközeg sűrűsége egy nagyságrendet esik, és a változások igen rövid idő alatt mennek végbe. A jobb szemléltethetőség érdekében ezért a színskála felső határát 150 kg/m^3 -ra állítottuk be, noha a közeg 570 kg/m^3 körüli sűrűséggel lép be a vizsgálat tartományba. A 3-8. ábra, 3-9. ábra, 3-10. ábra és 3-11. ábra mutatja a sűrűség változási trendeket. Akárcsak a hőmérséklet esetében, itt is megfigyelhető, hogy minél nagyobb a menetek száma a távtartón, annál nagyobb marad a közeg sűrűsége közvetlenül a pálcák felszínén, vagyis elmondható, hogy a távtartók menetemelkedési számának növelése javítja a hőátadást.



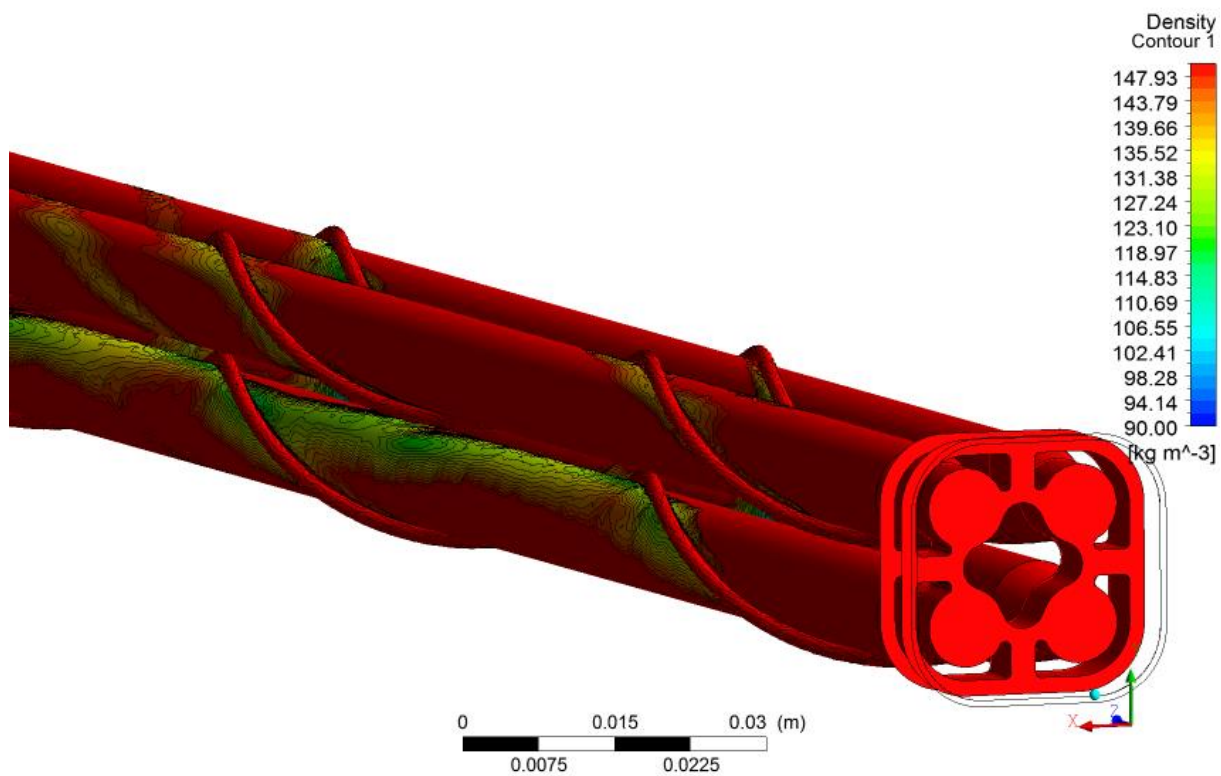
3-8. ábra: A sűrűség kontúrvonalas eloszlás a ww_0 geometria esetén a szilárd felületeken



3-9. ábra: A sűrűség kontúrvonalas eloszlás a ww_2 geometria esetén a szilárd felületeken



3-10. ábra: A sűrűség kontúrvonalas eloszlás a ww_4 geometria esetén a szilárd felületeken



3-11. ábra: A sűrűség kontúrvonalas eloszlás a ww_6 geometria esetén a szilárd felületeken

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A TDK dolgozatomban ismertettem az SCWR-FQT európai uniós projekt keretében elvégzett vak benchmark feladat megoldását, az utólagosan megkapott mérési eredményekkel való összevetését a számítási eredményeknek, valamint a benchmark tapasztalataira alapuló továbbfejlesztett számításokat.

Elsőként bemutattam a benchmark kiírást, az általunk a megoldásnál használt CFD megközelítést, a megépített geometriát és annak hálózását. Ezt követően érzékenységvizsgálatokat végeztem: hálóérzékenységi, határréteg háló-érzékenységi és turbulencia modell érzékenységi vizsgálatokat.

A hálóérzékenységi vizsgálatban egy az M4 alaphálónál kevesebb elemet (M2) és egy annál több elemet (M8) tartalmazó hálót vizsgáltunk meg. A vizsgálatok alapján az M2 háló egyértelműen kevés elemet tartalmaz, az M8 háló a nagyobb elemszám miatt elméletileg pontosabb eredményeket ad az M4-nél, és vélhetőleg még így is kevesebb elemet tartalmaz az optimálisnál, azonban további vizsgálatokat már nem tudunk végezni az erőforrásaink végessége miatt. Végül úgy döntöttünk, hogy az M8-as hálót fogjuk alkalmazni a továbbfejlesztett modellben.

A határréteg hálóérzékenységi vizsgálat egyértelműen megmutatta, hogy a HR C, vagyis a legsűrűbb határréteg háló a legjobb választás a három közül az y_1^+ értékeket alapul véve.

A turbulencia modell érzékenységi vizsgálat alapján elmondható, hogy a három modell között lényegi eltérés nincs, egyedül a kiugró turbulens kinetikus energia csúcserkéiben tér el lényegesen az SST modell a másik kettőtől. Ez alapján úgy döntöttünk, hogy a BSL Re Stress modellel végezzük el a végső számításokat, mivel a szakirodalom alapján a BSL Reynolds Stress modell a legfejlettebb a három vizsgált modell közül, amely ráadásul a másik kettővel ellentétben anizotróp turbulenciát modellez.

A mérési és a számítási eredmények összevetése nyilvánvalóvá tette, hogy a mért értékek szisztematikusan a számított külső felületi érték fölött és belső felületről kivett számított értékek alatt helyezkednek el. Ebből arra következtetünk, hogy a termoelemek a belső pálcafelületbe munkált hornyokba (esetleg furatokba) lettek rögzítve.

A benchmark feladat elvégzése során összegyűlt tapasztalatokra támaszkodva továbbfejlesztettük a CFD modellünket a ww_3 geometriára, majd további hat geometriát építettünk meg. Az immár hét geometria közötti különbség a helikális távtartók menetemelkedésében mutatkozik: a helikális távtartók nélküli geometria mellett az 1, 2, 3, 4, 5 és 6 menetemelkedést modelleztük. A számítási eredmények előzetes kiértékelése alapján elmondható, hogy a fűtőelem pálcák felszínének hőmérséklete a menetemelkedések számának növekedésével csökken. Ezt jelzi az is, hogy minél nagyobb a

menetek száma a távtartón, annál nagyobb marad a közeg sűrűsége közvetlenül a pálcák felszínén. Vagyis elmondható, hogy a távtartók menetemelkedési számának növelése javítja a hőátadást, ami egybevág a korábbi kísérleti eredményekkel. Azt, hogy ennek mi a pontos fizikai oka, a hét geometriára elvégzett számítások további részletes kiértékelése hivatott eldönteni.

5. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] J. BUONGIORNO-P.E MACDONALD (2003): *Supercritical Water Reactor (SCWR), Progress Report for the FY-03 Generation IV R+D Activities for the Development of the SCWR in the U.S.*, Forrás (2014.12.03-án): http://nuclear.inl.gov/gen4/docs/scwr_annual_progress_report_gen-iv_fy-03.pdf
- [2] *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*, ISSUED BY THE OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY FOR THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM (2014)
- [3] DR. CSOM GYULA (2005): *Nemzeti összefogás a 21. század atomenergetikájáért*, Forrás (2014.12.03-án): http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/dokumentumok/jegyzetek/Fenntarthato/2007_2008_tavasz/IV_generacio_DrCsomGyula.pdf
- [4] DR. ASZÓDI ATTILA, KISS ATTILA (2008): *A BME NTI hozzájárulása a Termohidraulikai számítások című 3. sz. részfeladathoz - Új nukleáris energiatermelési módszerek technológiai elemeinek fejlesztése NAP-NUKENERG projekt*, BME NTI kutatási jelentés, Budapest.
- [5] Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszódi Attila: *Az SCWR-FQT tesztszakasz be- és kilépő részének CFD analízise*, Nukleon, VII. évf. (2014) 169
- [6] PIORO, I. L., DUFFEY, R. B., (2007): *Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications*, ASME Press, New York, USA.
- [7] DR. ASZÓDI ATTILA, KISS ATTILA (2008): *A BME NTI hozzájárulása a Termohidraulikai számítások című 3. sz. részfeladathoz - Új nukleáris energiatermelési módszerek technológiai elemeinek fejlesztése NAP-NUKENERG projekt*, BME NTI kutatási jelentés, Budapest.
- [8] T. SCHULENBERG, J. STARFLINGER, J. HEINECKE (2008): *Three pass core design proposal for a high performance light water reactor*, Proceedings of the Second COE-INES International Symposium, INES-2, November 26-30, 2006, Yokohama, Japan, Publikálva: Progress in Nuclear Energy, Volume 50, Issues 2-6, March-August 2008, Pages 526-531
- [9] J. HOFMEISTER C. WAATA, J. STARFLINGER, T. SCHULENBERG, E. LAURIEN (2006): *Fuel assembly design study for a reactor with supercritical water*, Nuclear Engineering and Design, Volume 237, Issue 14, August 2007, Pages 1513-1521

- [10] T. SCHULENBERG, J. STARFLINGER (eds.) (2012): *High Performance Light Water Reactor – Design and Analyses*, KIT Scientific Publishing, ISBN 978-3-86644-817-9
- [11] *Seventh Framework Programme – SCWR Fuel qualification test* (2010)
- [12] DIRK C. VISSER (2014): *SCWR-FQT WP2 task 2.4 – Specification of blind benchmark on SWAMUP*
- [13] *Ansys CFX-Solver Modeling Guide*, Release 14.0, (2011)
- [14] 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.
- [15] *Report on out-of-pile SWAMUP test results and test data base*, CHINA NUCLEAR POWER TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE (2015)