



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET



ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

SCW-SMR koncepció reaktorfizikai és termohidraulikai vizsgálata
Serpent 2, RELAP5 és Apros kódok segítségével

Készítette:

Mészáros Péter

fizikus MSc hallgató

Konzulensek:

Dr. Babcsány Boglárka

egyetemi adjunktus

Varju Tamás

tudományos segédmunkatárs

Budapest, 2023

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Babcsány Boglárkának és Varju Tamásnak a dolgozatom készítése során nyújtott segítségéért, tanácsaiért, ismeretanyagom folyamatos bővítéséért.

TARTALOMJEGYZÉK

Ábrák jegyzéke	ii
Táblázatok jegyzéke.....	iii
Diagramok jegyzéke	iv
1. Bevezetés	1
1.1. Célkitűzések	1
1.2. A dolgozat felépítése.....	2
2. Áttekintés	3
2.1. Serpent 2	3
2.2. RELAP5.....	4
2.3. Apros.....	4
3. Szuperkritikus vízhűtésű reaktorkoncepció fejlesztése	6
3.1. Áttekintés a szuperkritikus vízhűtésű reaktorokról	6
3.2. Röviden a kis moduláris reaktorokról.....	9
3.3. Az SCW-SMR.....	11
4. Előzmények.....	17
5. A számításokhoz használt modellek	20
5.1. A Serpent 2 modell	20
5.1.1. RELAP5 csatolás	20
5.1.2. Apros csatolás	23
5.2. Az Apros modell	24
5.3. A RELAP5 modell	26
6. Számítási eredmények.....	28
6.1. Serpent 2 – RELAP5 csatolt számítások eredményei	28
6.2. Serpent 2 – Apros csatolt számítások eredményei	36
6.3. A két számítássorozat összehasonlítása	45
7. Összefoglalás és kitekintés.....	47
8. Felhasznált források.....	49
9. Függelék	51

ÁBRÁK JEGYZÉKE

1. ábra: A víz fázisdiagramja [9].....	6
2. ábra: Az SCWR reaktor sematikus ábrája [14]	8
3. ábra: HPLWR felépítése [15].....	9
4. ábra: A tervezett pálcakialakítás [16]	11
5. ábra: A 40 pálcából álló kazetta tervezett elrendezése [16].....	11
6. ábra: A kazetta fejrésznének tervezett kialakítása [16]	11
7. ábra: A kazetta lábresznének tervezett kialakítása [16]	12
8. ábra: A kazetták perforált lemezekbe történő illeszkedése a fejrésznél (bal) és a lábresznél (jobb)	12
9. ábra: Reaktor előlnézeti (bal) és oldalnézeti (jobb) metszeti képe [16]	13
10. ábra: A reaktor zónája az azt körülvevő szerkezeti elemekkel és reflektorral [16]	14
11. ábra: Az üres (bal) és a zónát tartalmazó (jobb) reaktortartály [21]	15
12. ábra: A tartály belső elrendezése és a benne zajló áramlások [21].....	15
13. ábra: A reaktorkosár szerkezete [21]	16
14. ábra: Az üzemanyagkazetta felépítése.....	20
15. ábra: Serpent 2 modell felülnézeti (bal) és előlnézeti (jobb) képe	21
16. ábra: Az Apros modell [23].....	24
17. ábra: A felmelegedési szintek belső szerkezete [24]	25
18. ábra: A RELAP5 modellhez tartozó nodalizáció [25]	27

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: A kazetta geometriai méretei	21
2. táblázat: Kazetták közötti függőleges távolság	22
3. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások.....	28
4. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások és bizonytalanságuk.....	29
5. táblázat: Az effektív sokszorozási tényező értékei, változása és bizonytalansága.....	30
6. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások.....	37
7. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások és bizonytalanságuk.....	37
8. táblázat: Az effektív sokszorozási tényező értékei, változása és bizonytalansága.....	38
9. táblázat: A két számítássorozat fontosabb eredményeinek összehasonlítása.....	46

DIAGRAMOK JEGYZÉKE

1. diagram: A felmelegedési szintek maximális és átlagos lineáris teljesítménysűrűségei [20]	14
2. diagram: A moderáltági görbe [22]	17
3. diagram: Reflektorrégió vastagságának hatása a reaktivitástartalékra [22].....	19
4. diagram: A teljesítményeloszlás változása.....	29
5. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban	30
6. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása az átlagos kazettákban.....	31
7. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása a forró kazettákban.....	31
8. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása a forró kazettákban.....	31
9. diagram: Moderátor hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban.....	32
10. diagram: Moderátor sűrűségének változása az átlagos kazettákban.....	32
11. diagram: Moderátor hőmérsékletének változása a forró kazettákban.....	32
12. diagram: Moderátor sűrűségének változása a forró kazettákban	33
13. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban	33
14. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása a forró kazettákban.....	34
15. diagram: Üzemanyag maximális hőmérsékletének változása	34
16. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban.....	35
17. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása a forró kazettákban	35
18. diagram: A teljesítményeloszlás változása.....	37
19. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban	38
20. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása az átlagos kazettákban.....	39
21. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása a forró kazettákban.....	39
22. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása a forró kazettákban.....	39
23. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása a hideg kazettákban.....	40
24. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása a hideg kazettákban	40
25. diagram: Moderátor hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban.....	40
26. diagram: Moderátor sűrűségének változása az átlagos kazettákban.....	41
27. diagram: Moderátor hőmérsékletének változása a forró kazettákban.....	41
28. diagram: Moderátor sűrűségének változása a forró kazettákban	41
29. diagram: Moderátor hőmérsékletének változása a hideg kazettákban	42
30. diagram: Moderátor sűrűségének változása a hideg kazettákban	42
31. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban	43
32. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása a forró kazettákban.....	43
33. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása a hideg kazettákban	43
34. diagram: Üzemanyag maximális hőmérsékletének változása	44
35. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban.....	44
36. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása a forró kazettákban	45

1. BEVEZETÉS

Napjainkban hatalmas problémát jelent megfelelő mennyiségű villamos- és hőenergia előállítása megfizethető áron, környezetbarát technológiák felhasználásával. Számos energiatermelési mód létezik, azonban az olcsóbb technológiák általában környezetszennyezőek, míg a környezetbarát technológiák drágák. Erre a problémára jelenthetnek megoldást a nukleáris erőművek. Atomerőművek esetén egy egyszeri nagyösszegű beruházást követően évtizedekig lehet energiát termelni kedvező áron, üvegházhatású gázok kibocsátása nélkül.

Az Európai Parlament a közelmúltban elfogadta a Taxonómia Rendeletet, ami 2020. július óta van hatályban. Ez a rendelet lényegében egy besorolási rendszer, ami meghatározza a környezetvédelmi szempontból fenntartható gazdasági tevékenységeket. A különböző kategóriák pontos definiálása révén segít a cégeknek, befektetőknek tevékenységeik fenntarthatóvá tételében. Az Európai Unió ezzel a rendelettel a 2050-re meghatározott klímacélok elérését szeretné elősegíteni. [1] Az Európai Bizottság 2021-ben kiadott egy jelentést, ami ennek a kiegészítéséről szól. Ez megszavazásra került és 2022 januárja óta érvényes. Ennek 2022 nyarán megszavazták egy módosítását, ami szigorú feltételekkel ugyan, de fenntartható energiatermelési módnak titulálta a nukleáris energiatermelést. Ez egy rendkívül jó hír a nukleáris iparnak, hiszen jelentős mértékben elősegítheti az atomenergia békés célú alkalmazásának Európai Unión belüli elterjedését, ugyanis fenntarthatósági szempontból egy csoportba került a megújuló energiaforrásokkal. Az Európai Unió már a rendelet elfogadása és módosítása előtt is támogatta a nukleáris szektort, de az új szabályozás miatt még nagyobb, a nukleáris ipart érintő támogatások várhatóak újabb, hatékonyabb, biztonságosabb technológiák kifejlesztésére. [2]

A BME Nukleáris Technikai Intézete még 2020-ban konzorciumi tagként elnyerte az EU/EURATOM/H2020 pályázatok egyikét, az ECC-SMART projektet, így 2020 szeptembere óta kutatást végez az ECC-SMART projekten belül. Az ECC-SMART projekt célja egy szuperkritikus vízű kis moduláris reaktorkonceptió az SCW-SMR fejlesztése. A projekt keretein belül a BME NTI többek között részt vesz a reaktorfizikai és a termohidraulikai számítások elvégzésében is. Az atomreaktorok rendkívül bonyolult szerkezetek, üzembe helyezésük előtt rengeteg számítás elvégzése szükséges, hogy garantálni lehessen a biztonsági követelmények maradéktalanul történő betartását. A számítástechnika folyamatos és gyors ütemű fejlődése miatt egyre pontosabb számításokra van lehetőség. Ez egyre jobban optimalizált reaktorkonceptiók kidolgozását teszi lehetővé, ugyanis egyre kevesebb elhanyagolást kell tenni, egyre kisebb az eredmények bizonytalansága. A projekt célja egy új, hatékony és biztonságos reaktor kifejlesztése.

1.1. Célkitűzések

Dolgozatomban bemutatom a koncepció optimalizálása, valamint pontosabb hőmérsékleteloszlás, nyomáseloszlás és teljesítményeloszlás meghatározása érdekében végzett csatolt reaktorfizikai és termohidraulikai számításokat és azok eredményeit. Ezen számítások

elvégzéséhez elkészítettem két SCW-SMR reaktormodellt a Serpent 2 Monte Carlo program felhasználásával. Az egyik inputot a RELAP5 rendszerkóddal, míg a másikat az Apros rendszerkóddal történő gyenge csatoláshoz használtam fel. A RELAP5 modellt a pisai partner-egyetemünk képviselőjében Prof. Walter Ambrosini készítette, és a vele történő számításokat is ő végezte el, míg az Apros modellt konzulensem Varju Tamás készítette és használta számítások elvégzésére. A Serpent számításokat a RELAP5-tel történő csatolás során az általam fejlesztett modellt és eszközöket felhasználva, konzulensem Dr. Babcsányi Boglárka, míg az Apros-szal történt csatolás során én futtattam le.

A Serpent 2 inputjában szükséges megadni a reaktort felépítő anyagok izotópösszetételét, sűrűségét, illetve hőmérsékletét. A kapott számítási eredmény pedig tartalmazza a zóna teljesítményeloszlását. A RELAP5 és az Apros pedig pont ezeket a teljesítményeloszlásokat hasznosítja inputadatként, majd ezekből kiindulva kiszámolja a reaktorra jellemző hőmérséklet- és sűrűségviszonyokat. A pontos hőmérséklet-, sűrűség- és teljesítményeloszlás meghatározásához tehát szükséges egy iterációs eljárás a kódok által szolgáltatott eredmények felhasználásával. Ezen iterációs számításorozatok lefuttatására kerültek, nekik köszönhetően sikerült jó pontossággal meghatározni az SCW-SMR zónakoncepció egyensúlyi termohidraulikai és reaktorfizikai állapotát. A kapott eredmények pedig felhasználhatók további zónaoptimalizációs számítások elvégzésére.

1.2. A dolgozat felépítése

A rövid bevezetés után egy áttekintés következik. Ebben ismertetem az iteráció során használt három kód alapelveit, felépítését, valamint működését, különös tekintettel a Serpent 2-re, hiszen ezt a kódot használtam én. Az áttekintést követően ismertetem a modellezett SCW-SMR reaktorkoncepció tervezett felépítését, használt anyagokat, valamint a főbb biztonsági korlátokat. Az ezt követő előzmények című fejezetben pedig bemutatom a projektben korábban elvégzett feladatokat, amik megalapozzák a dolgozatomban bemutatott számításorozatok elvégzését. Miután ez megtörtént, részletesen bemutatom a két Serpent 2-ben elkészített reaktormodelleket, illetve a RELAP5 és az Apros modelleket is, valamint a modellezés során alkalmazott egyszerűsítéseket, közelítéseket, elhanyagolásokat. Mindemellett röviden ismertetem az iteráció során végbement kommunikáció folyamatát, és a számolt, illetve megkapott eredmények feldolgozásának a mikéntjét. Mindezt olyan részletességgel, hogy az olvasó rekonstruálni tudja az elvégzett szimulációkat a dolgozat elolvasása után. Az utolsó hosszabb témakör pedig a számítási eredmények bemutatása, és annak a vizsgálata, hogy az elvárásokkal összhangban a számítások valóban konvergálnak-e. Dolgozatomat összefoglalással, konklúziók levonásával, valamint a potenciális továbbfejlesztési lehetőségek összegyűjtésével zárom.

2. ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben bemutatom a dolgozatban közölt számítások során felhasznált kódok, név szerint a Serpent 2, a RELAP5 és az Apros működési elvét, felépítését, az általuk felhasznált, illetve kiszámolt adatokat.

2.1. *Serpent 2*

A Serpent egy háromdimenziós, folytonos energiás neutron- és fotontranszport kód. A fejlesztése 2004-ben kezdődött a finnországi Technical Research Centre of Finland (VTT) intézményben, és azóta is folyamatosan tart. [3] A program a számításokhoz Monte-Carlo-módszert alkalmaz. A Monte-Carlo-módszer egy olyan eljárás, amely segít meghatározni sztochasztikus események várható kimenetelét. Emiatt minden eredmény bizonytalansággal terhelt, aminek az értéke csökkenthető az elvégzett szimulációk számának növelésével. A determinisztikus kódokkal ellentétben a Monte-Carlo-kódok a számítás során modellezett folyamatokhoz hozzárendelnek egy valószínűségi változót, ami megadja a különböző kimenetekhez tartozó valószínűségeket. A kód a valószínűségek figyelembevételével véletlenszerűen sorsol számokat, ami elvezet egy végkimenetelhez. A végkimenetel minden számítás során más lehet. Amennyiben kellő mennyiségű számítást elvégeztünk a végeredményeknek lesz egy eloszlása, ami megadja a folyamat várható értékét és annak bizonytalanságát. [4] A Monte-Carlo-programok nagyon pontos számítások elvégzésére képesek, azonban nagyon sokszor el kell végezni a számítást ahhoz, hogy a bizonytalanság kellően alacsony legyen, ami rendkívül hosszú programfutási időket eredményezhet a determinisztikus kódokhoz képest. A számítások időigényét nagy mértékben lehet csökkenteni párhuzamosítással.

A Serpent folytonos energiás Monte-Carlo-kód számos különböző fajta számítás elvégzésére képes. Lehet vele futtatni neutrontranszport, fotontranszport, illetve csatolt neutron- és fotontranszport számításokat is. A kód klasszikus ütközéskinetika és ENDF reakciótörvények alapján modellezi a neutronokat. A szükséges hatáskeresztmetszet értékeket a program külön erre a célra létrehozott adatkönyvtárakból nyeri ki. [3] Az ezekben levő értékek folytonos energiás adatok, így nincs szükség közelítésekre. A program a számításokhoz inputadatként kezeli a modellezni kívánt szerkezet geometriai felépítését, az anyagösszetételt, az anyagok hőmérsékleteit, valamint sűrűségeit. A számításoknak számos különböző eredménye lehet. Ilyenek például a különböző csoportállandók, a neutronsűrűség és a teljesítményeloszlás. A meghatározni kívánt adatokat detektorok definiálásával lehet kinyerni. A kód képes kiéegszámítások végrehajtására is, ami lehetőséget biztosít arra, hogy a teljes kampányhossz alatt tudjuk, hogy mi történik a reaktorban. A meghatározott csoportállandók lehetőséget biztosítanak determinisztikus számítások elvégzésére. A teljesítményeloszlás segítségével pedig lehet csatolni a kódot egy rendszerkódhoz, és csatolt számítások elvégzésére nyílik lehetőség, ami még pontosabb számítási eredményeket képes biztosítani.

2.2. RELAP5

A RELAP5 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) egy amerikai rendszerkód, amit az Idaho National Laboratory (INL) fejlesztett ki. Eredeti célja atomreaktor balesetek és üzemi tranziensek állandósult állapotbeli és tranziens best estimate modellezése volt könnyűvízes reaktorokban. Azonban a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően már többfelé különböző közeget lehet vele szimulálni. [5]

A pisai partneregységünknek és a BME NTI-nek egyaránt a RELAP5/mod3 kódverzióhoz van hozzáférése, az elvégzett számítások ennek felhasználásával történtek. A kód felhasználásával modellezhető események köre nagy. Ilyenek például a hűtőközegvesztéses üzemzavarok, vagy a külső táp elvesztése. A kód azonban nem csak üzemzavarok, hanem a normál üzem modellezésére is kiválóan alkalmas. Mivel egy rendszerkódról beszélünk a teljes reaktor viselkedését képes leírni. Rendelkezik termohidraulikai modullal, ami a zónában levő áramlások leírásához szükséges, illetve a pontos hőstruktúrák figyelembevételére is képes. [6] Rendelkezik beépített reaktorfizikai modullal is, ami a pontkinetikai egyenletet oldja meg. A kód képes két komponensű, kétfázisú áramlások, illetve szuperkritikus közegek modellezésére is, ami elengedhetetlen jelen számítássorozat véghezviteléhez.

Mindezen tulajdonságok miatt a RELAP5 alkalmas az SCW-SMR koncepció modellezésére. Amennyiben megadunk bemeneti adatként teljesítményeloszlást, képes kiszámolni a reaktorban található anyagok sűrűségét és hőmérsékletét, így alkalmas a Serpent 2-vel való iterációs számítássorozat véghezvitelére.

2.3. Apros

Az Apros (Advanced PROCESS Simulator) a RELAP5-höz hasonlóan egy rendszerkód, tehát a teljes reaktor viselkedésének vizsgálatára képes. A Serpent 2-höz hasonlóan ezt a kódrendszert is a finn VTT, illetve a Fortum energetikai vállalat fejlesztette ki. A program megalkotásának az volt a célja, hogy létrehozzanak egy felhasználóbarát megoldást, ami lehetővé teszi komplex rendszerek (atomerőművek, energiarendszerek, ipari folyamatok) pontos, átfogó szimulációját és tervezését. A legfontosabb felhasználási irányok többek között a biztonságelemzés, operátor tréning és esetleges új komponensek, eljárások engedélyeztetése. [7] Magyarországon jelenleg ez az egyik legelterjedtebb rendszerkód köszönhetően annak, hogy az elsők között tették alkalmassá VVER típusú reaktorok modellezésére. A jó finn-magyar kapcsolatoknak, illetve a Pakson és Loviisa-ban üzemeltetett azonos reaktortípusnak (VVER-440) is fontos szerepe volt ebben. A kód széles körben validált, így az eredményei megbízhatónak tekinthetők.

Az Apros egy egydimenziós rendszerkód. Alapvetően termohidraulikai számításokra alkalmas, de képes reaktordinamikai, szabályozási és egyéb számításokra is. A termohidraulikai modell egy dimenzióban old meg mérlegegyenleteket (energiamegmaradási, impulzusmegmaradási és kontinuitási egyenletek), az áramok meghatározására, a gőz és víz fázisra. Ez összességében hat darab egyenletet jelent, de további egyszerűsítésekkel a számuk

csökkenthető. A hőmérsékleti viszonyokat a hővezetés általános differenciálegyenletének kétdimenziós megoldásával határozza meg. A termohidraulikai modellhez kapcsolva képes reaktordinamika, irányítás- és szabályozástechnika, elektromos hálózatot érintő, kontén- mentben zajló folyamatok, valamint várható üzemanyagsérülés számítására is. Ez biztosítja a lehetőséget a teljes rendszer vizsgálatára mind normál üzemi, mind üzemzavari és baleseti körülmények között, emiatt nevezhető a kód rendszerkódnak. [8]

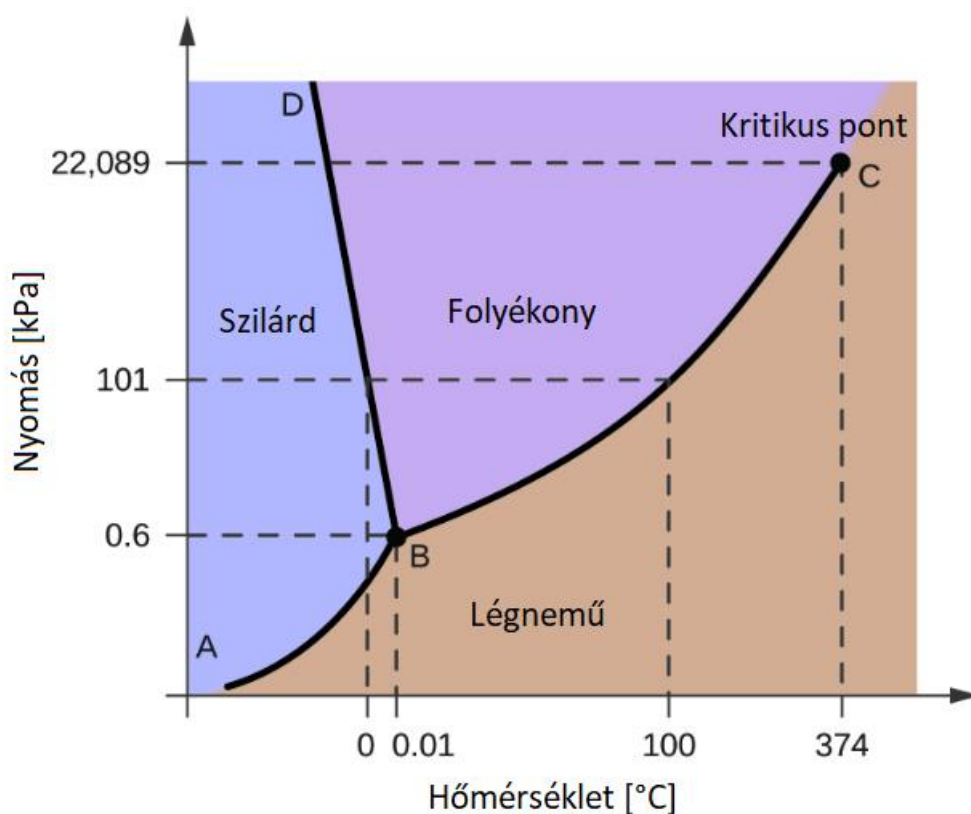
A kód elterjedt a nemzetközi gyakorlatban, mivel egyszerű és kényelmes a használata, hiszen a felhasználó előre elkészített komponensek felhasználásával, azok összekötésével tudja elkészíteni a modelljét. Az elkészült kapcsolás után a komponensekre be kell állítani a kívánt perem- és kezdeti feltételeket, valamint az adott komponensre jellemző méreteteket, illetve egyéb jellemzőket. Amennyiben ez megtörtént már csak a futtatás van hátra. További előnye a gyors futás. Egyszerűbb modellek esetében már egy átlagos PC teljesítménye is elég ahhoz, hogy valós idejű (vagy akár gyorsabb) számításokat lehessen végezni. Emiatt a program fontos szerepet tölt be az operátorok képzésében is. [8]

3. SZUPERKRITIKUS VÍZHŰTÉSŰ REAKTORKONCEPCIÓ FEJLESZTÉSE

Ebben a fejezetben bemutatom a már létező szuperkritikus vízhűtésű reaktorkoncepciók működési elveit, paramétereit és a fontosabb ebbe a csoportba tartozó reaktorokat. Mindemellett ismertetem a dolgozat témájául szolgáló SCW-SMR reaktorkoncepció jellemzőit.

3.1. Áttekintés a szuperkritikus vízhűtésű reaktorokról

A Földön található anyagok többféle halmazállapotban is megtalálhatók. Azt, hogy az anyag milyen halmazállapotú hőmérséklete és nyomása alapján lehet eldönteni. Azt a diagramot, ami megmutatja, hogy egy adott anyag bizonyos körülmények között milyen halmazállapotú, fázisdiagramnak nevezzük. A víz fázisdiagramja megtekinthető az 1. ábrán.



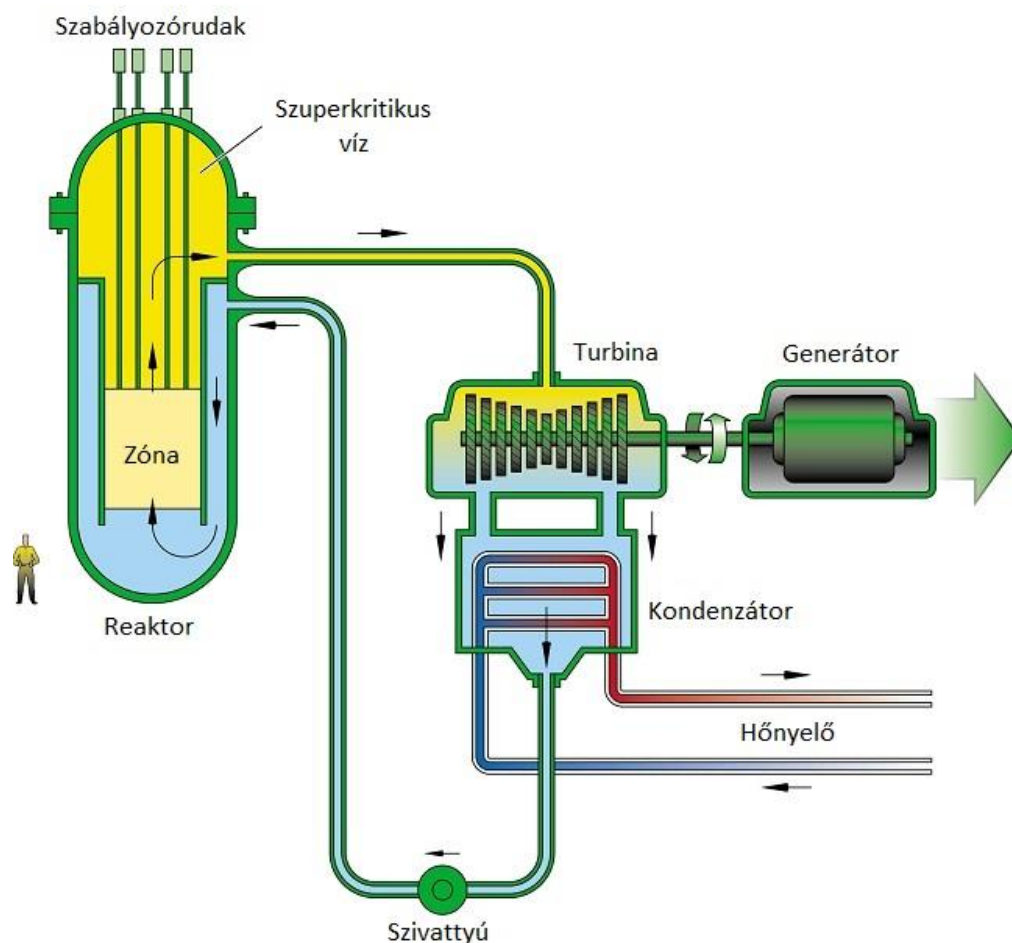
1. ábra: A víz fázisdiagramja [9]

Az 1. ábrán látható, hogy a folyékony és a gőz halmazállapotú vizet egy vonal választja el egymástól, amely mentén megtörténik a fázisátalakulás. Azonban ez a vonal a C pontban véget ér. Ezt a pontot kritikus pontnak nevezzük és könnyűvíz esetében a hozzá tartozó nyomás- és hőmérséklet értékek rendre 22089 kPa és 374 °C. Amennyiben a víz nyomása és hőmérséklete meghaladja a kritikus ponthoz tartozó értékeket már nem lesz fázisátalakulás a folyadék és gáz fázisok között. Emiatt itt már nem beszélhetünk ezen fázisokról, hiszen nem lehet megkülönböztetni őket. Így létrejön egy új fázis, amit szuperkritikus víznek nevezünk.

Szuperkritikus vízhűtésű szénerőművek már léteznek (sőt ultra-szuperkritikusak is). Emiatt logikus gondolat a technológiát implementálni a nukleáris iparban is, számos előnyös tulajdonsága miatt. Egyfelől a magasabb hőmérsékleteknek köszönhetően magasabb hatásfok érhető el, másrészt mivel a hűtőközeg egyfázisú, forráskrisis fellépésétől sem kell tartani. Emellett a reaktorból kihagyható a gőzfejlesztő, így egyszerűbbé tehető az erőmű. [10] Ez azt jelenti, hogy jóval kevesebb pénzből több energiát lehet előállítani a felhasználással. Az előnyök mellett azonban hátrányok is tartoznak a technológiához. Egyfelől a szuperkritikus vízhűtés miatt rendkívül magas hőmérsékletek lépnek fel a zónán belül normál üzemi körülmények között is. Ennek következtében számos az iparban megszokott anyag nem használható az ilyen reaktorokban. Csak hogy egy példát említsek, a pálcaburkolat legelterjedtebb anyaga a cirkónium, de a zónában tapasztalható magas nyomás és hőmérséklet miatt elfogadhatatlan mértékben megnőne a cirkónium korróziósebessége. Emiatt a korróziónak jobban ellenálló anyagokat terveznek alkalmazni. Ilyenek például a nikeltartalmú rozsdamentes acélok. Ám ezeknek a mikroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszete jóval nagyobb, mint a cirkóniumnak. Az ezáltal lekötött többlet reaktivitást magasabb dúsítás alkalmazásával lehet kompenzálni. [11] További megoldandó problémát jelent a kritikus pont felett található pszeudokritikus tartományban való gyors és nagymértékű változás a víz anyagjellemzőiben. Ebben a rövid pszeudokritikus tartományban az anyagjellemzők (sűrűség és fajhő) akár több nagyságrendet is változhatnak, így ezen tartomány részletes vizsgálata elengedhetetlen. [12]

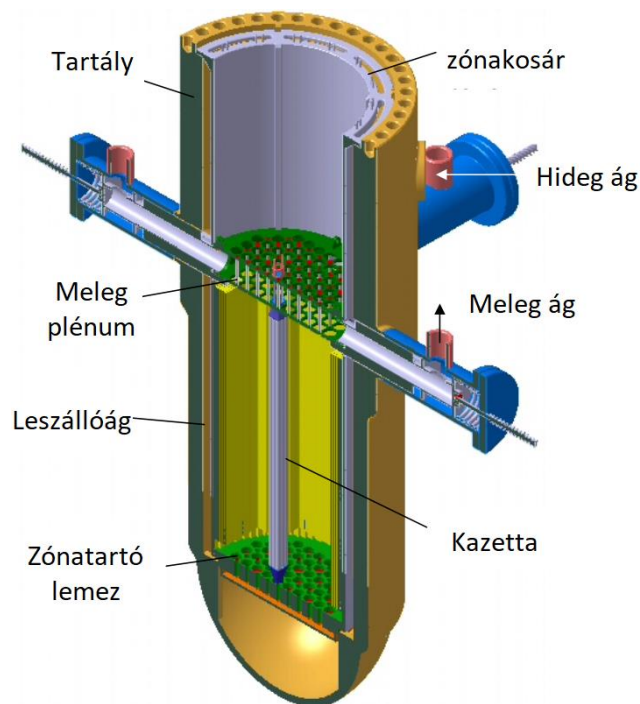
Hagyományos szuperkritikus erőművet azért lehetett már építeni, mert nem szükséges olyan szintű és mennyiségű számítás és engedélyeztetés elvégzése, mint egy atomerőműnél, hiszen egy-egy meghibásodás esetén az erőmű egyszerűen leállítható, de egy atomerőmű esetén a remanens hő miatt minden üzemzavari helyzetben is szükséges a hőelvezetés. A szuperkritikus víz üzemzavari viselkedésének pontos megértéséhez pedig rengeteg számítás, mérés elvégzése szükséges. Ezek miatt egy hagyományos erőmű meghibásodásának lehetséges következményei majdnem elhanyagolhatóak egy atomerőmű meghibásodásának potenciális következményeihez képest. Amennyiben valami elromlik egy hagyományos erőműben, elég kicserélni az alkatrészt és folytatódhat is az üzem.

A szuperkritikus vízhűtésű reaktor ötlete már régen felmerült. 2001-ben megalapult a 4. Generációs Nemzetközi Fórum (Generation IV. International Forum, röviden GIF), azzal a céllal, hogy előmozdítsa bizonyos 4. generációs reaktorkoncepciók fejlesztését, és 2030-ra működő reaktorok legyenek a koncepciókból. A szervezet a világ 13 vezető nukleáris iparral rendelkező országát, valamint az Európai Uniót tömöríti magába. A GIF kiválasztott hat technológiát, amely fejlesztését indokoltnak látta. Ezek a következők: gázhűtésű gyorsreaktor (GFR), ólomhűtésű gyorsreaktor (LFR), sóolvadékos reaktor (MSR), nátriumhűtésű reaktor (SFR), szuperkritikus vízhűtésű reaktor (SCWR) nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR). [13] Mivel a szuperkritikus vízhűtésű reaktor felkerült erre a listára, számos ország kezdett foglalkozni a fejlesztésével. Az SCWR reaktor sematikus rajza megtekinthető a 2. ábrán.



2. ábra: Az SCWR reaktor sematikus ábrája [14]

A legelőrehaladottabb állapotban a japán, a kanadai, illetve az Európai Unió fejlesztésű SCWR-ek vannak, hiszen a GIF-en belül ez a három ország, illetve országcsoport vezeti az SCWR-rel kapcsolatos kutatásokat az együttműködési megállapodások értelmében. Japánban termikus (Super LWR) és gyors (Super Fast LWR) szuperkritikus vízhűtésű reaktort is terveznek. A Super LWR reaktor hasonlóan néz ki, mint egy nyomottvízes reaktor (PWR). A szabályozórudak vertikálisan mozognak, a felhasznált moderátor és hűtőközeg könnyűvíz. A Super Fast LWR reaktor esetében a negatív reaktivástényezőt szilárd moderátor felhasználásával érik el. Az európai fejlesztésű reaktort High Performance Light Water Reactor-nak (HPLWR) hívjuk, aminek a tartályon belüli felépítése megtekinthető a 3. ábrán.



3. ábra: HPLWR felépítése [15]

A HPLWR is hasonlít egy termikus PWR-re. A kazettákon belül található egy moderátorcsatorna. A hűtőközeg három lépésben melegszik fel 280°C-ról 500°C-ra. A zóna alatt és fölött keverőterek találhatók, amik arra szolgálnak, hogy a felmelegedési szintek között homogenizálják a hűtőközeg hőmérsékletét. A fő cél a koncepció tervezése során a minél alacsonyabb burkolathőmérsékletek elérése volt. A reaktor elektromos teljesítménye 1000 MW. A kanadai koncepció lényegében a CANDU reaktorok egy továbbfejlesztett változata. Ez egy nyomott csöves típus, térben szeparált hűtőközeggel és moderátorral. [10] [14]

A HPLWR reaktor fejlesztése során számos probléma merült fel. A háromlépcsős felmelegedés miatt ugyan csökkent a maximális burkolathőmérséklet, azonban nem kellő mértékben. Több felmelegedési lépcső alkalmazásával a burkolathőmérsékletet még jobban lehet csökkenteni. A számítások során az adódott, hogy a maximális teljesítményű részekben melegszik túl a burkolat. Erre a felmelegedési lépések számának növelése mellett a teljesítményük csökkentése, és egyenletessé tétele jelenthet megoldást. Emellett a magas hőmérsékletek miatt cirkónium helyett rozsdamentes acél burkolatokat alkalmaztak, ami nagyobb neutronabszorpciós hatáskeresztmetszettel rendelkezik, így növelni kellett a dúsításon. Az említett problémák kiküszöbölése végett született meg az SCW-SMR reaktorkoncepció, ami lényegében a HPLWR reaktorkoncepció egy továbbfejlesztett kis moduláris változata. [16]

3.2. Röviden a kis moduláris reaktorokról

Az első atomreaktorok az 1950-es években készültek el. Azoknak az egységteljesítménye meglehetősen alacsony volt, néhány megawatt. Legfőképp kísérleti reaktorok voltak, illetve

a későbbi második generációs reaktorok prototípusai. A második generációs reaktorok voltak az elsők, amelyeket kereskedelmi forgalomba hoztak, és hálózatra termeltek áramot. A fejlődés egyértelműen abba az irányba mutatott, hogy minél nagyobb teljesítményű erőművek készüljenek, hiszen az egyszeri beruházási költség annál alacsonyabb a megtermelt áram mennyiségére fajlagosítva. Az egységteljesítményük általában 400 és 1200 MW közé esett. Ezen konstrukciók biztonsági rendszerei jellemzően aktívak. Ez alól többek között a hidroakkumulátor, valamint különböző biztonsági lefúvató szelepek képeznek kivételt. A jelenleg üzemelő atomerőművek jó része ebbe a csoportba tartozik, például a Pakson üzemelő VVER-440 reaktorok is. A harmadik generációs reaktorok is hasonló trendeket követnek, mint a második generációs társaik. A legfőbb cél a költséghatékonyság és a biztonság növelése, amit pontosabb számításokkal és még nagyobb (akár 1700 MW) teljesítménnyel szeretnének elérni. Itt már hangsúlyosabb szerepet kapnak a passzív biztonsági rendszerek is. Ebbe a csoportba tartoznak a jelenleg épülő reaktorok, köztük a Pakson tervezett VVER-1200-as blokkok is. Ezt követi a negyedik generáció. Itt az eddigiekkel összhangban szintén a nagyfokú gazdaságosság és a lehető legnagyobb biztonság a fő cél, de itt már a fenntarthatóság is kiemelt szerephez jut. Azonban a korábbiakkal ellentétben már nem az egységteljesítmény növelésével, hanem új, hatékonyabb technológiák felhasználásával kívánják maximalizálni a gazdaságosságot. Ennek egyik iránya a korábban már említett a GIF által kijelölt hat támogatott negyedik generációs reaktorkoncepciók, míg a másik a kis moduláris reaktorok fejlesztése. [17]

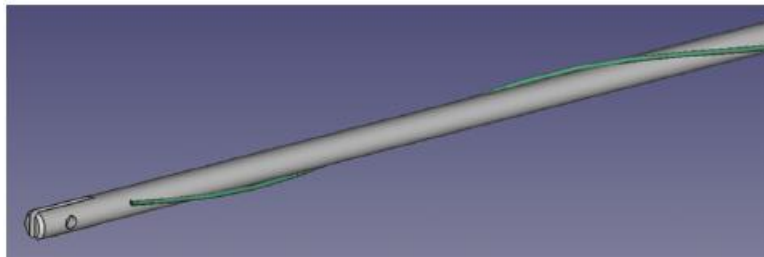
A kis moduláris (SMR) reaktorok ötlete első hallásra teljes mértékben szembemegy mindazzal, amerre a nukleáris ipar a kezdetektől tartott, hiszen az egységteljesítményük kisebb, mint 300 MW. Ugyanakkor kisebb méretük miatt jóval egyszerűbb alkatrészeket gyártani hozzájuk, azokat szállítani, illetve telephelyet találni és létesíteni. Moduláris mivoltuk miatt már a gyárban részben összeszerelik, és a helyszínre szállítás után a felépítés sokkal rövidebb időt vesz igénybe, mint a harmadik generációs társaiknál. Emellett sorozatgyárthatóak is lesznek, ami a tervezési költségre gyakorol kedvező hatást, hiszen jelenleg minden telephelyre külön módosításokat kell eszközölni a tervekben. Az SMR reaktorokban szinte kizárólag passzív biztonsági rendszerek találhatók, amik egyrészt nagyobb biztonságot adnak társaiknál, másrészt alkalmazásuk csökkenti a karbantartási költséget. A tervezett kampany-hossz meglehetősen hosszú (egyes koncepciók esetén akár 30 év is lehet [18]), így sokkal kevesebb bevételkieséssel járnak az átrakások miatti leállások. A gazdaságossági szempontok mellett számos más előnye is van az SMR reaktoroknak a nagy teljesítményűekhez képest. Sokkal kisebb a környezeti hatásuk a kisebb méretük miatt. Egyszerűbb felépítésük és passzív biztonsági rendszereik miatt sokkal biztonságosabban üzemeltethetők. Kis méretük miatt olyan helyekre is telepíthetők, amelyek nem rendelkeznek egy nagy reaktor befogadására megfelelő villamos hálózattal, valamint mindentől távol eső helyekre, ahol nincsen szükség annyi energiára, amennyit egy nagy reaktor megtermel. [19]

Az ECC-SMART projekt az SCW-SMR reaktorkoncepció kifejlesztését tűzte ki célul, ami a korábban bemutatott HPLWR reaktorkoncepció átdolgozása egy kis moduláris reaktorrá.

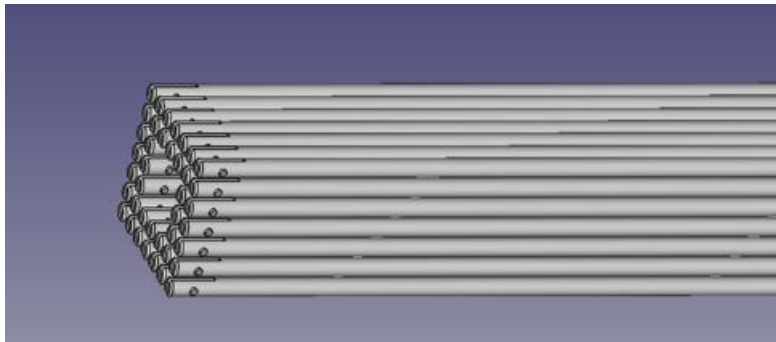
3.3. Az SCW-SMR

Az SCW-SMR reaktor ötlete a HPLWR reaktorokra végzett számítások tanulságai miatt született meg. A koncepció kidolgozóit Ivan Otic és Thomas Schulenberg. A HPLWR reaktor legnagyobb megoldandó problémája a korábbiakban is említett pálcaburkolat túlmelegedés volt. Ennek csökkentése a felmelegedési szintek számának növelésével és a szintek közötti keveréssel megoldható. Az SCW-SMR koncepcióban a széntüzelésű szuperkritikus erőművekhez hasonlóan hét lépésben melegszik fel a hűtőközeg.

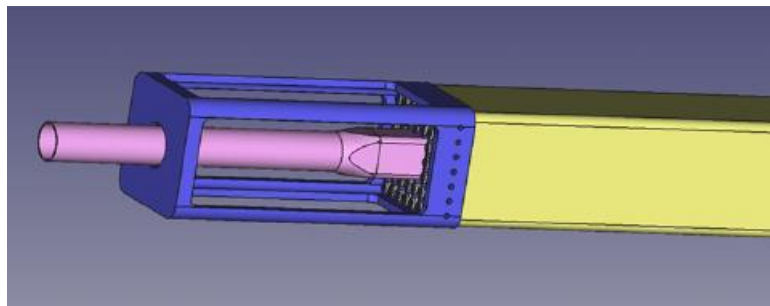
A következőkben a koncepció részletes bemutatása következik a kisebb alkotóelemektől a nagyobbak felé haladva. A 4-7. ábrákon láthatóak a tervezett pálca- és kazettkialakítások.



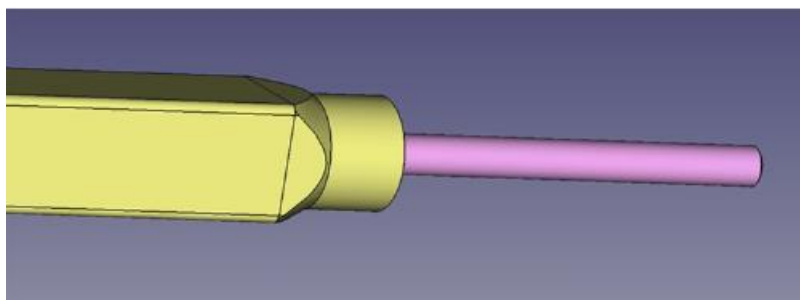
4. ábra: A tervezett pálcakialakítás [16]



5. ábra: A 40 pálcából álló kazetta tervezett elrendezése [16]

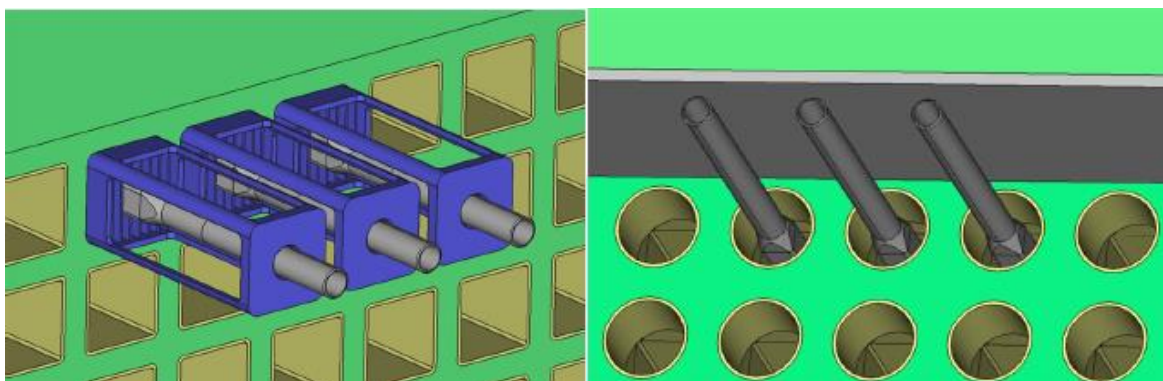


6. ábra: A kazetta fejrészének tervezett kialakítása [16]



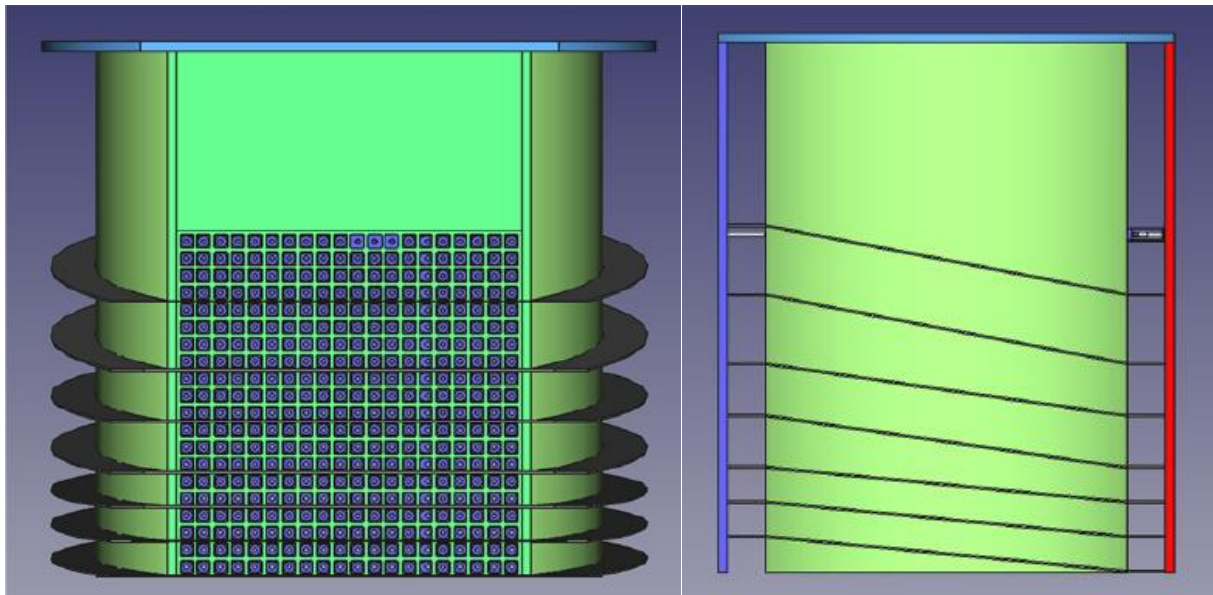
7. ábra: A kazetta lábrészének tervezett kialakítása [16]

A 4. ábrán a tervezett pálcakialakítás látható. Ennek aktív hossza 1680 mm, külső átmérője pedig 8 mm. A végén levő furat a pálca rögzítésében játszik szerepet, míg a zöld színnel ábrázolt, a burkolatra csavart helikális távtartó feladata a pálca körüli áramlások keverése a jobb hőátadás elősegítése érdekében. Az 5. ábrán a pálcák kazettákban belüli elrendezése látható. Minden kazetta 40 pálcát tartalmaz négyzetes rács elrendezésben. A kazetta közepén egy 3x3-as területen nincsenek pálcák, ugyanis ott található a moderátorcsatorna. A moderátorcsatornát a pálcákat körülvevő hűtőközegetől egy fal választja el. A 6. ábrán a kazetták fejrésze, míg a 7. ábrán a lábrészük látható. Sárga színnel a kazettafal került jelölésre. A kazetták kialakításuknak megfelelően a fejrésznél egy négyszögesen, míg a lábrésznél egy körösen perforált lemezbe illeszkednek, ami a 8. ábrán tekinthető meg.



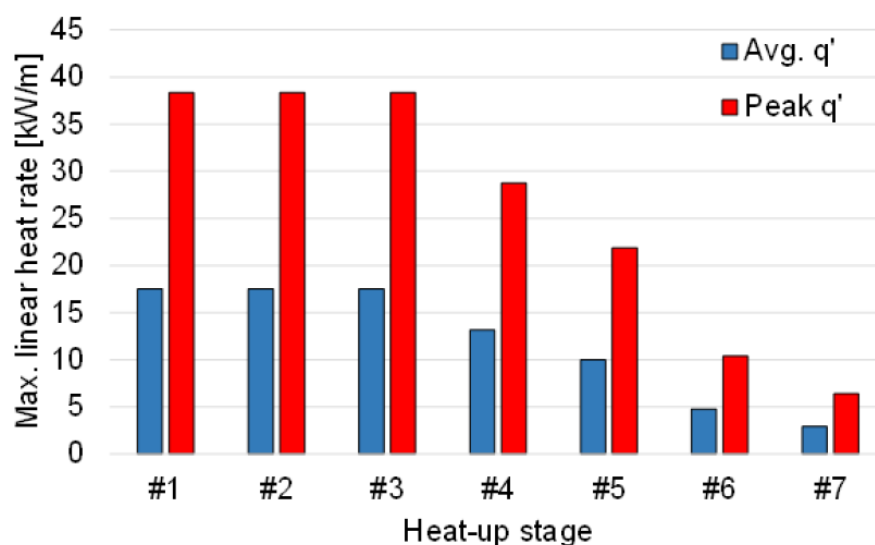
8. ábra: A kazetták perforált lemezbe történő illeszkedése a fejrésznél (bal) és a lábrésznél (jobb)

Ezen lemezek szerepe kettős, ugyanis a kazetták rendezésén túl a hűtőközeg- és moderátor pléniumok egymástól történő elválasztásáért is felelnek. A kék színű rész a pálcák rögzítésére szolgál, illetve átrakások során ez biztosít lehetőséget az üzemanyag zónából történő kiemelésére és berakására. A rózsaszín rész a moderátorcsatorna fala. Ennek mindkét oldalán van egy hengeres meghosszabbítása, amik átmennek a zóna elején és végén található perforált lemezeken. [16] A kazetták bekerülnek a zónatartóba, melynek előlnézeti és oldalnézeti képét a 9. ábrán lehet megtekinteni.



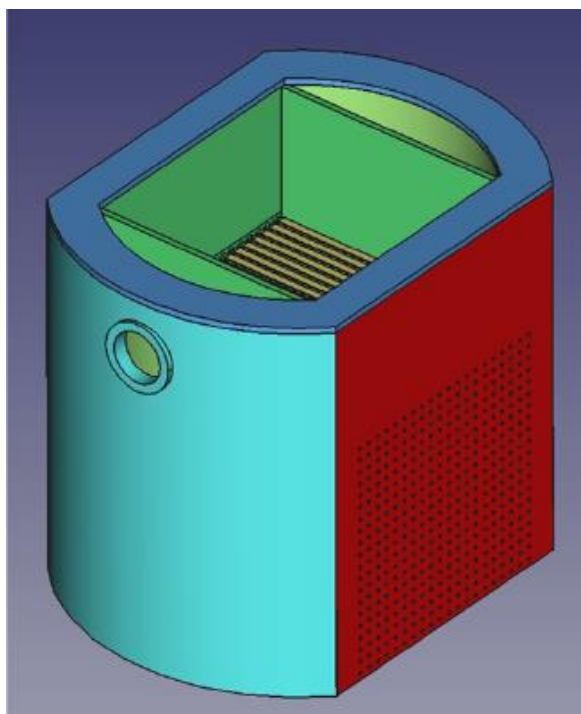
9. ábra: Reaktor előlnézeti (bal) és oldalnézeti (jobb) metszeti képe [16]

A 9. ábrán a reaktor előlnézeti képén megtekinthető a kazetták elrendezése a zónán belül. Látható, hogy a zóna 20x20, azaz összesen 400 vízszintesen elhelyezett kazettát tartalmaz, illetve, hogy a reaktor a függőleges tengelyre szimmetrikus elrendezésű. A 9. ábrán az is látszik, hogy a hűtőközeg felmelegedése hét lépésben történik. Az első három felmelegedési szinten két-két, az azt követő kettőben három-három, míg a legfelső kettőben négy-négy kazettasor található. Erre a felosztásra azért van szükség, mert a közeg melegedésével csökken a sűrűsége, tehát adott tömegáramhoz sokkal nagyobb térfogatáram tartozik. Emiatt változatlan áramlási keresztmetszet esetén a zóna felső részén nagymértékben megnőne az áramlási sebesség, ezáltal a nyomásesés is. Ennek elkerülése céljából került a felsőbb szintekre több kazetta, mert így nő az áramlási keresztmetszet, ami kompenzálja a térfogatáram növekedést. A hőmérsékleti kritériumok, nevezetesen a pálcaburkolatra vonatkozók elérése érdekében a célként kitűzött lineáris teljesítménysűrűség-eloszlás nem egyenletes, hanem az első három szinten egyforma, a negyedik szinttől kezdve pedig csökkenő. A cél eloszlás az 1. diagramon látható. [16] [20]



1. diagram: A felmelegedési szintek maximális és átlagos lineáris teljesítménysűrűségei [20]

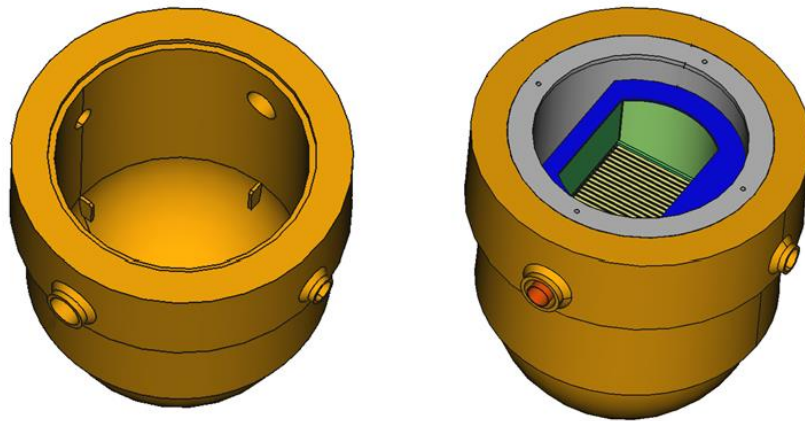
Az eddigiekben bemutatott zónát egy reflektorrégió és különböző szerkezeti elemek is körülveszik. A zóna ezen régiókkal kiegészített felépítése megtekinthető a 10. ábrán.



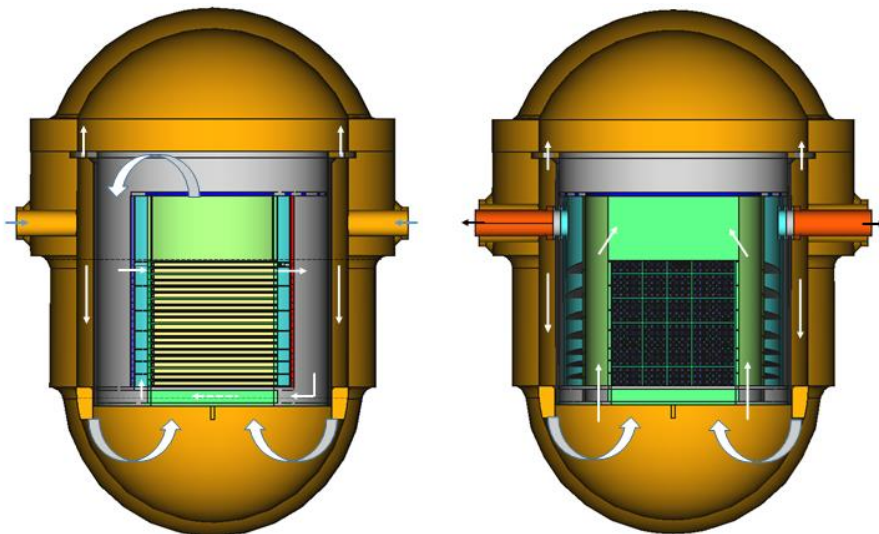
10. ábra: A reaktor zónája az azt körülvevő szerkezeti elemekkel és reflektorral [16]

A 10. ábrán a türkizzel jelölt elemen lévő csomkokon (elöl és hátul) keresztül távozik a zónán áthaladt szuperkritikus víz. A bejövő közeg ezekhez képest 90°-kal elforgatott, két szintén átellenes irányból áramlik be. Átrakás esetén ez az egész szerkezet kiemelésre kerül a reaktortartályból, és 90 fokkal elforgatva belekerül egy medencébe. A pirossal jelölt rész a

zóna elején található. Átrakások során ez leemelésre kerül a zónáról, ezáltal a kazetták hozzáférhetővé válnak az átrakógép számára. Miután ez megtörtént, a fejrésznél megfogva a kazetták eltávolíthatók, lecserélhetők. [16] A reaktortartály, ami a 10. ábrán található részt tartalmazza, a 11. ábrán látható módon néz ki. A tartályon belüli áramlásokat, illetve a tartály belső elrendezését a 12. ábra hivatott szemléltetni.



11. ábra: Az üres (bal) és a zónát tartalmazó (jobb) reaktortartály [21]

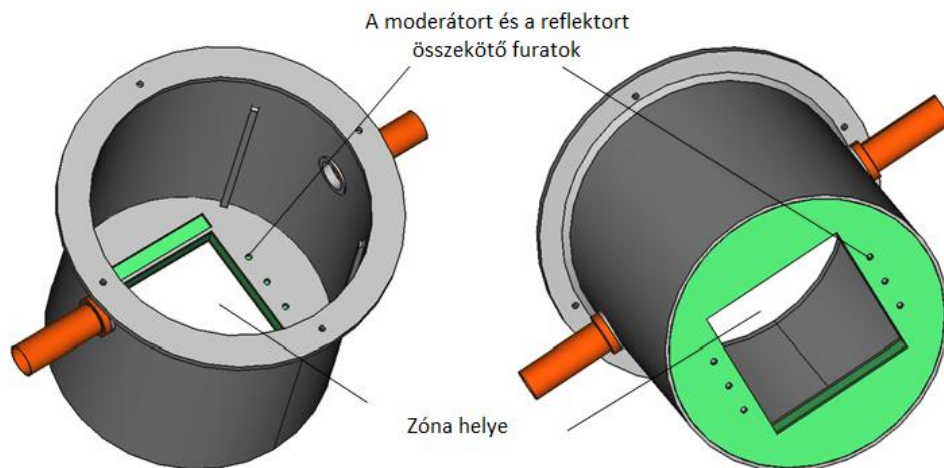


12. ábra: A tartály belső elrendezése és a benne zajló áramlások [21]

A 11. ábrán látható, hogy összesen négy vezetéken keresztül tud a tartályba víz kerülni és onnan távozni. Ezekből kettő egymással szemben levő csomak a hidegági, a másik kettő egymással szemben elhelyezkedő pedig melegági. A tartályon belül található a szürke színű reaktorkosár, azon belül pedig a zónaszerkezet. A szürke rész egy perem segítségével ül fel a tartályra, és ezen a peremen található néhány furat.

A tartályon belüli áramlások a következőképpen írhatók le a 12. ábra felhasználásával. A víz beáramlik a tartályba valamelyik beömlő csomakon keresztül. A nagyobb része elkezd áramolni a zóna alja felé, míg egy kis része felfelé, ugyanis a 11. ábra szürke részén látható

furatokon keresztül is kialakul egy bypass áramlás. A lefelé menő közeg a zóna alá jut, és onnan a legnagyobb része megkezd a felfelé áramlást a kazetták között. A kisebb része pedig a reaktorkosár alján lévő furatokon keresztül a reflektorrégióba kerül, és azzal keveredve kezdi meg a felfelé áramlást. A reaktorkosár szerkezetét a 13. ábra szemlélteti.



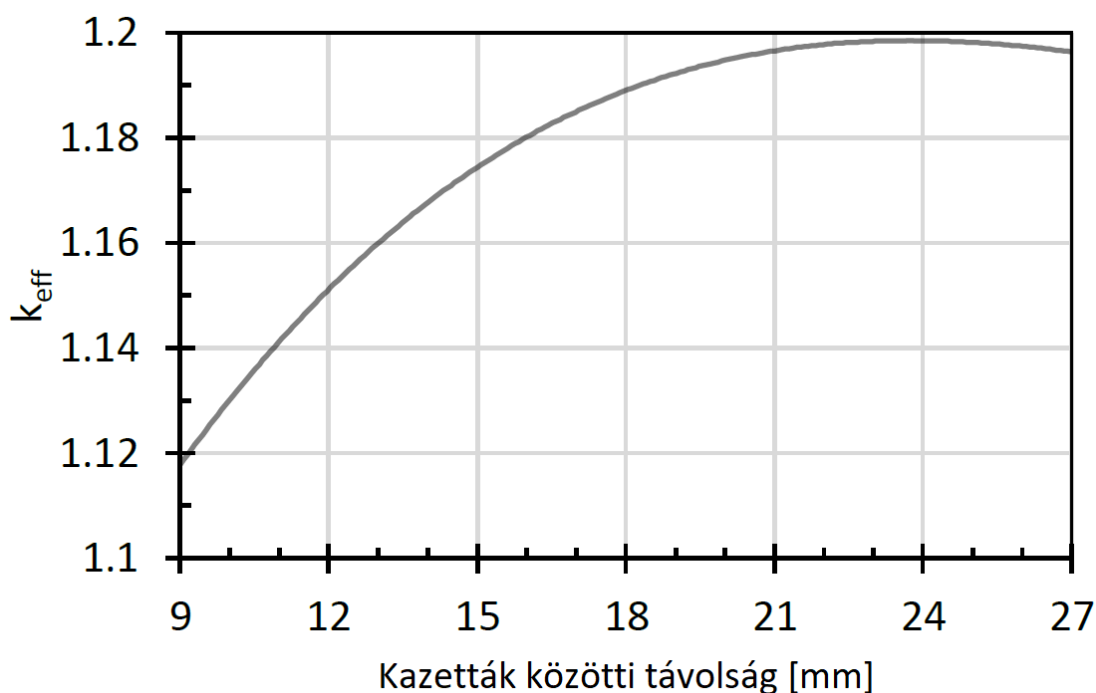
13. ábra: A reaktorkosár szerkezete [21]

Miután a moderátor víz átment a zónán, a zóna fölött újra összekeveredik a reflektor régió átfolyt vízzel, majd később a kezdeti bypass során felfelé áramlott közeggel is. Ezt követően megindul lefelé a zóna mellett, és újra átmegy a zónán, de ezúttal a vízszintes kazetták belüli moderátorcsatornán keresztül. Itt még nem következett be felmelegedési szintekre történő felosztás, tehát minden kazettán párhuzamosan történik az áramlás egyforma belépő moderátorhőmérséklet mellett. Miután átáramlott a zónán egy keverésen esik át, így a különböző kazetták eltérő hőmérsékletűre felmelegedett moderátorban a hőmérséklet kiegyenlítődik. Ezután a víz elkezd lefelé áramolni, és a kazetták fejrésztől visszaáramlik a lábrészhez. Innentől kezdve már hűtőközegekről beszélhetünk. A hűtőközeg átáramlik az első pálcák közötti hűtőközeg-csatornán keresztül, majd feláramlik egy szintet, és újra átáramlik a pálcák közötti téren. Minden felmelegedési szint után átesik egy keverésen, ami a hőmérséklet kiegyenlítését hivatott elősegíteni. Miután a hűtőközeg mind a hét felmelegedési szinten áthaladt, távozik a tartályból a kiömlő csomópontokon keresztül szuperkritikus víz formájában. [16]

4. ELŐZMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem a zónaoptimalizálási folyamat során korábban elvégzett, a számításaimat megalapozó eredményeket, amelyek alapján felépítettem a reaktormodelljeimet. A zónaoptimalizálásnak alapvetően három fő célja volt. Egyfelől a kampányhossz növelése, ami kétféle módon történhet. A kampányeleji effektív sokszorozási tényező (reaktivitástartalék) növelésével, illetve a kiegész sebességének csökkentésével. Másrészt az 1. diagramon ábrázolt teljesítményprofil elérése vertikálisan. Végül pedig horizontális irányban teljesítménykiegyenlítés. A kezdeti számítások során adódtak problémák. Még hozzá az, hogy a koncepcióban szereplő kiindulási paraméterek a három célból egyiknek sem feleltek meg, még csak távolról sem. Nem volt elegendő a reaktivitástartalék, és egyik iránybeli teljesítményeloszlás sem felelt meg a várakozásoknak. Ezek kiküszöbölésére, kijavítására került elvégzésre egy zónaoptimalizálási számítássorozat. Az ennek keretein belül elvégzett számítások során még nem volt termohidraulikai-reaktorfizikai csatolás.

Az elsőként vizsgált paraméter a kazetták közötti távolság volt. A koncepció kidolgozói eredetileg 21,5 mm függőleges kazettatávolsággal terveztek, azonban hamar kiderült, hogy ez túl nagy. A 2. diagramon látható moderációs görbén ez már majdnem a felülmoderált tartományba esik.



2. diagram: A moderáltági görbe [22]

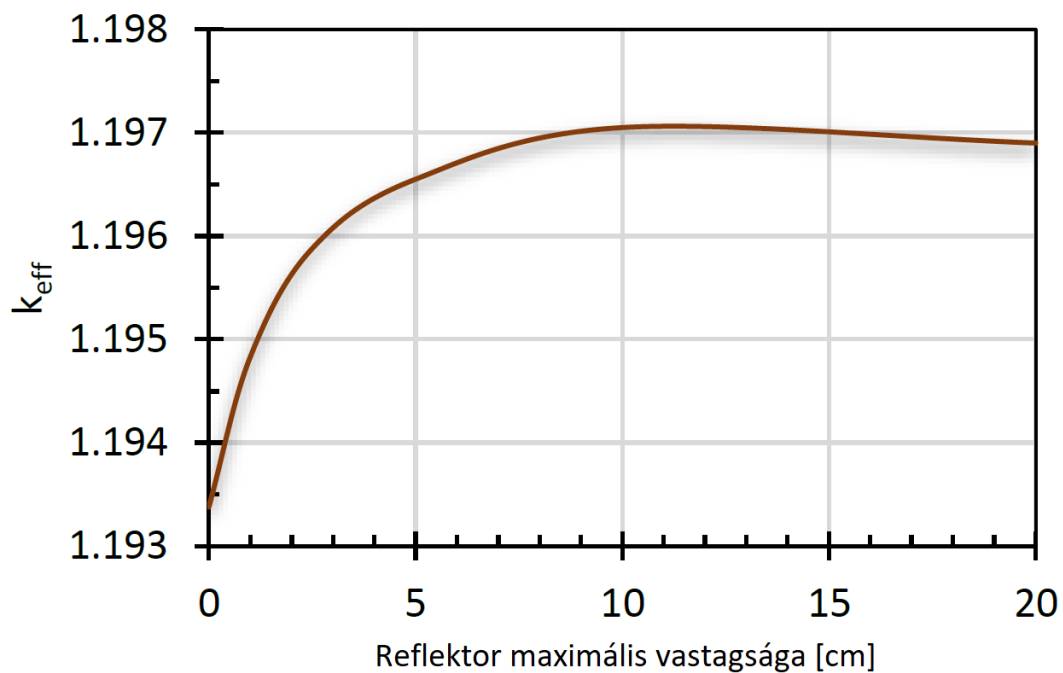
Az elvégzett számítások öt százalékos egyenletes dúsítást feltételeztek, és az adódott, hogy minél kisebb a kazetták közötti távolság annál nagyobb kazettateljesítmény érhető el, azonban az erőteljes alulmoderáltság miatt a kampányeleji effektív sokszorozási tényező annál kisebb. [22] Ennek az eredménye az lett végül, hogy a kazettatávolság nem egyenletes,

hanem 9 és 21 mm között változik, hiszen így elérhető a kellően nagy reaktivitástartalék és a kellően magas lineáris hőteljesítmény sűrűség a kezdeti szinteken egyaránt. Emellett a felső szinteken csökkenthető a moderáltság, ezáltal kisebb teljesítmény érhető el a zóna tetején. A kazetták közötti pontos függőleges távolságokat az 5. fejezetben lévő 2. táblázatban mutatom be.

Egy további probléma volt az, hogy a kezdetben feltételezett öt százalékos egyenletes dúsítással nem lehetett elérni elegendő reaktivitástartalékot, ami a burkolatanyagként alkalmazott nikkeltartalmú rozsdamentes acél nagy neutronabszorpciós hatáskeresztmetszetének köszönhető. Emellett a kívánt teljesítményeloszlásoknak sem felelt meg a zóna ilyen dúsítás mellett, így annak növelése elengedhetetlen volt. Amennyiben ez a növelés egyenletes módon történik, nem elérhető sem a kívánt szintenkénti teljesítményeloszlás, sem a horizontális teljesítménykiegyenlítés. Emiatt szükséges különböző dúsítású kazetták alkalmazása, hogy a zóna tetején a teljesítményt csökkenteni lehessen és a fellépő eloszlás megfeleljen az 1. diagramon látható eloszlásnak. [22] Ennek a végeredménye három különböző kazetta alkalmazása lett, melyből az egyik 9,5%-os MOX üzemanyagot, a másik kettő pedig 7,5%-os, illetve 9%-os urán-dioxid üzemanyagot tartalmaz. A MOX üzemanyag azért került bevezetésre, mert a használata csökkenti a kiegészi görbe meredekségét, ezáltal hosszabb kampányt tesz lehetővé.

A szuperkritikus víz alkalmazása jelentősen magasabb hőmérsékleteket eredményez a zónában, mint amilyen az eddigi reaktorokban volt tapasztalható. Így a megszokott anyagok nem minden esetben alkalmazhatóak. Ebbe a kategóriába tartozik a cirkónium is, hiszen a magas nyomás és hőmérséklet következtében megnövekedett korróziósebesség miatt nem kerülhet kapcsolatba a szuperkritikus vízzel. A helyette alkalmazni tervezett rozsdamentes acél azonban sokkal nagyobb neutronabszorpciós hatáskeresztmetszettel rendelkezik. A használni kívánt SS-310S anyag nikkeltartalma miatt elnyelőként viselkedik, emiatt jelentősen csökkenti az effektív sokszorozási tényező értékét. [22] Ennek a megoldása az lett, hogy a kazettafal és a moderátorcsatorna fala esetében egy háromrétegű elrendezés alakult ki. A szuperkritikus vízzel érintkező réteg maradt az SS-310S, de a moderátorral érintkező oldalon Zircaloy-4 anyagot terveznek alkalmazni, míg a két réteg közé ittriummal stabilizált cirkónia, kerámia szigetelés került. A cirkónia szigetelés a moderátor felé történő hőveszteség minimalizálása érdekében került bevezetésre. Ez az elrendezés biztonságos, hiszen nem érintkezik a cirkónium a szuperkritikus vízzel, illetve előnyös is, hiszen a nikkeltartalmú anyagok vastagsága jelentősen lecsökkent, ezzel pozitív hatást gyakorol a reaktivitástartalék értékére.

A neutronháztartás szempontjából rendkívül fontos jelentőséggel bír a zóna mellett található reflektorrégió. Az, hogy érdemes használni, már az elejétől kezdve egyértelmű volt, de az ideális reflektorvastagság meghatározása számításokat igényelt. A 3. diagramon a reflektorrégió maximális vastagságának a reaktivitástartalékra gyakorolt hatása látható.



3. diagram: Reflektorrégió vastagságának hatása a reaktivitástartalékra [22]

Látható, hogy öt cm felett már gyakorlatilag nincs hatása a további emelésnek, így ez lett az ideális vastagság. Mindezek mellett a kezdeti reaktivitástartalék növelésére még a zónában található hasadóanyag mennyiségének növelése is vizsgálatra került, azonban a kazeták számának növelése nem gyakorolt akkora hatást a reaktivitástartalékra, hogy gazdaságos legyen ezen a téren változtatásokat eszközölni a koncepción. [22]

Az optimalizálás során meghatározott módosítások felhasználásával már lehetőség nyílt a modellek elkészítésére, felépítésüket a következő fejezetben fogom ismertetni.

5. A SZÁMÍTÁSOKHOZ HASZNÁLT MODELLEK

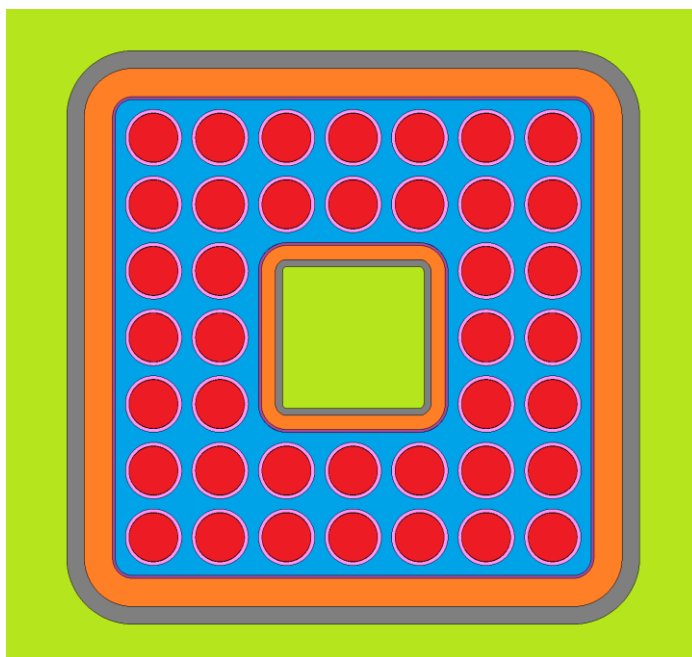
Ebben a fejezetben bemutatom a számításokhoz használt modellek felépítését, hiányosságait, és a bevezetett egyszerűsítéseket, elhanyagolásokat.

5.1. A *Serpent 2* modell

Ebben az alfejezetben bemutatom mind a RELAP5-tel való, mind az Apros-szal való csatoláshoz készült *Serpent 2* modellt. Mind a két modellt én készítettem el. Az Apros-szal csatolt számításokat én, míg a RELAP5-tel történő csatoláshoz szükséges számításokat Dr. Babcsány Boglárka végezte. Az elkészített modellek a 4. fejezetben bemutatott optimalizálás júliusi állapota alapján készültek.

5.1.1. RELAP5 CSATOLÁS

A modellek közül ez készült el hamarabb. Csak a zóna fele került lemodellezésre a vertikális szimmetriatengely miatt. A másik része egy szimmetria peremfeltétel segítségével került figyelembevételre. A modell emiatt 200 kazettát tartalmaz, melyeknek a felépítése megtekinthető a 14. ábrán.



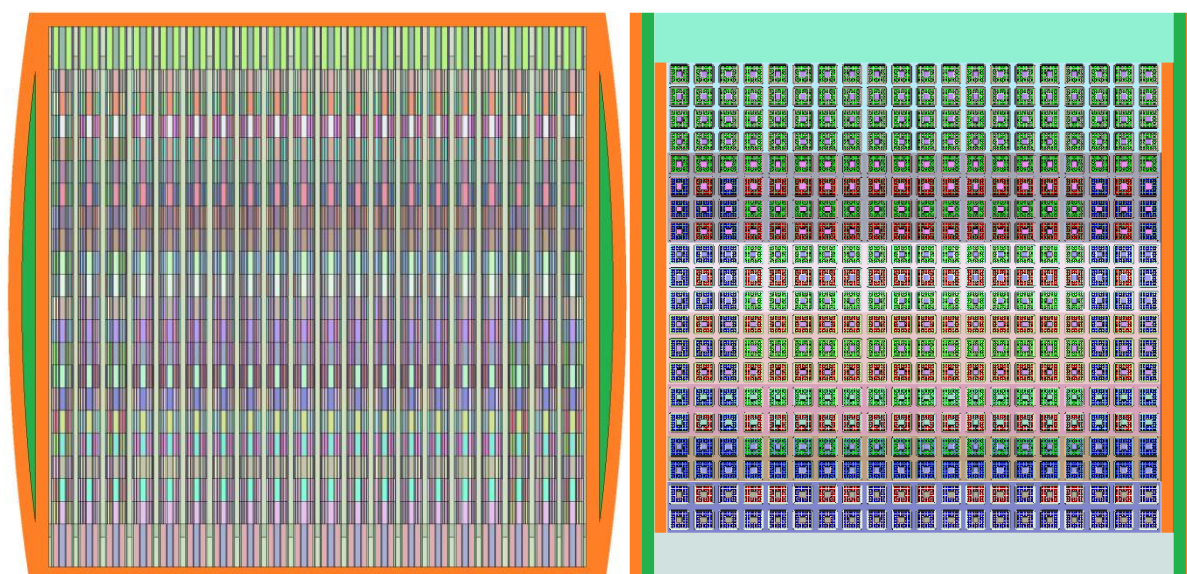
14. ábra: Az üzemanyagkazetta felépítése

A 14. ábrán látható kazetta geometriai méreteit az 1. táblázatban gyűjtöttem össze. Az ábrán zöld színnel jelöltem a moderátort, kékkel a hűtőközeget. A moderátorcsatorna falában és a kazettafalban található rozsdamentes acélrégiót lila, a Zircaloy-4 régiót szürke, míg a kettő között található szigetelést narancssárga szín jelzi. A pálcárcsban az üzemanyagot pirossal, a burkolatot pedig rózsaszínnel jelöltem. A pálcárcsosztás 9.44 mm.

1. táblázat: A kazetta geometriai méretei

Moderátorcsatorna fal			Kazettafal			Pálca	
	oldalhossz [mm]	lekerekítés [mm]		oldalhossz [mm]	lekerekítés [mm]		átmérő [mm]
Zircaloy-4 belső	20,5	0,9	SS310S belső	67,5	2,5	üzem- anyag	6,9
Szigetelés belső	22,1	1,7	Szigetelés belső	68,3	2,9	gázrész	7
Szigetelés külső	26,1	3,7	Szigetelés külső	76,3	6,9	burko- lat	8
SS310S külső	26,9	4,1	Zircaloy-4 külső	81,3	9,4		

A modellemben az 1. táblázatban leírt felépítéssel rendelkező kazettából összesen 200 darabot használtam fel. Az elrendezésük megegyezik a korábban a zónakoncepció tárgyalása során bemutatott elrendezéssel. Annyi a különbség, hogy a szimmetria miatt csak a zóna felét építettem meg. Az ezek alapján megépített zónamodell megtekinthető a 15. ábrán, felülnézetben és oldalnézetben.



15. ábra: Serpent 2 modell felülnézeti (bal) és oldalnézeti (jobb) képe

Itt fontosnak tartom kiemelni, hogy míg a rendszerkódok a tartályt és annak teljes tartalmát figyelembe veszik, addig az én modellemben csak a reaktorkosáron belüli rész szerepel. Ez egy elhanyagolás a valósághoz képest, de a neutronháztartás szempontjából releváns szerkezeti elemek modellezésre kerültek. A 15. ábrán narancssárgával jelölt rész a zónát körülvevő rozsdamentes acél szerkezeti elemeket takarja, míg a zölddel jelölt rész a berilliumból álló reflektor. Itt fontosnak tartom megemlíteni, hogy a valós reaktorban ezen a régióan keresztüláramlik a második bypass során némi moderátor. A rendszerkódok felhasználásá-

val készült modellekben pedig ez a régió teljes mértékben vizet tartalmaz. Az üzemanyag-régiókat három különböző színnel jelöltem. Ennek az az oka, hogy az optimalizációs számítások során meghatározott zónatérkép három különböző dúsítású üzemanyagot tartalmaz. A zölddel jelölt pálcák 7,5% dúsítású urán-dioxid, a késsel jelölt pálcák pedig 9% dúsítású urán-dioxid pasztillákat tartalmaznak. A pirossal jelölt pálcák a kiégés sebességének csökkentése miatt 9,5%-os MOX-ot tartalmaznak. Látható, hogy a zóna alatt és felett is van egy vízrégió. Ez a zónakoncepció alján és tetején található víztereket modellezi. A kazetták közötti vízszintes irányú távolság egységesen 15 mm, míg a szintek közötti függőleges irányú távolság a zónaoptimalizáció során említett okok miatt eltérő. Ezeket a távolságokat a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Kazetták közötti függőleges távolság

Alsó határ (szint)	Felső határ (szint)	Távolság [mm]
1	2	21
2	3	16,5
3	4	12
4	5	16,5
5	6	21
6	7	18
7	8	15
8	9	15
9	10	13,5
10	11	12
11	12	12
12	13	10,5
13	14	9
14	15	9
15	16	9
16	17	9
17	18	9
18	19	9
19	20	9

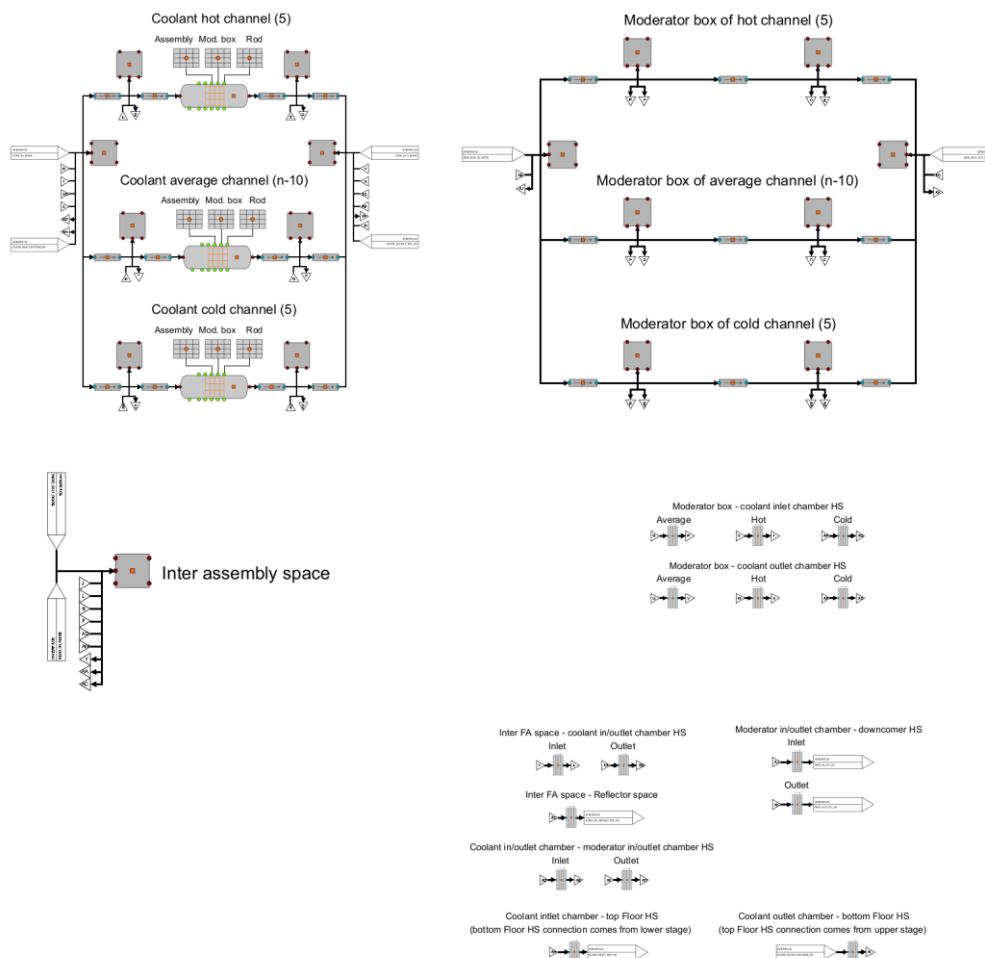
A 15. ábrán látható, hogy a modellben a kazetták fűtött hossza axiális irányban 20 részre van felosztva. Ezek mellett a belépésnél és a kilépésnél is van plusz egy-egy régió, amiben már nem található üzemanyag. A kazettamodellekben emiatt meg lehet adni mind a hét felmelegedési szintre, minden anyagra 20, illetve 22 (pálcák nincsenek a belépő és a kilépő szakaszban, így azokat csak 20 részre lehet felbontani) axiális régióban külön-külön hőmérséklet- és sűrűségértékeket. A RELAP5 modell kétcsatornás, tehát kiszámolja a moderátor, a hűtőközeg és az üzemanyag hőmérséklet- és sűrűségeloszlását minden felmelegedési szinten 22 axiális régióra az öt legmelegebb kazettában és a maradék (átlagos) kazettákban.

Ennek figyelembevételére lehetőség van külön értékeket megadni az átlagos és forró kazettákra. Ez így rengeteg különböző anyagi régiót jelent. A Monte-Carlo-kódok memóriaigénye miatt szükséges volt néhány egyszerűsítést tenni, hogy a számításokat le tudjam futtatni. Egyfelől a modellben a hőmérsékletértékeket 0,5 kelvinre kerekítettem, másfelől pedig az energiaháló rekonstrukció toleranciáját megnöveltem 0,05-re. Ez utóbbi lényegében azt jelenti, hogy a folytonos hatáskeresztmetszet könyvtárakból diszkrét pontokban vesz ki értékeket, a megadott rácsávolság alatti szomszédos pontokat pedig összevonja. Próbaszámítások segítségével sikerült igazolni, hogy a hőmérsékleti kerekítés nem okoz a Serpent egy szigma számítási bizonytalanságát meghaladó eltérést az eredményekben. Az energiaháló rekonstrukció toleranciájának növelése valamivel nagyobb hatást okoz, azonban ez sem túl jelentős. Enélkül nem lehetett lefuttatni a számítást memóriahiány miatt, szóval ezt a kompromisszumot muszáj volt megkötni. A szerveren, amin a számításokat futtattam 256 GB memória áll rendelkezésre, és a korábban említett egyszerűsítések segítségével sikerült a memóriaigényt bevenni ez alá. Az utolsó elvégzendő lépés a tervezett 290 megawattos teljesítmény beállítása volt, így minden akadály elhárult a számítások elvégzése előtt.

5.1.2. APROS CSATOLÁS

Az Apros-szal való csatoláshoz felhasznált modell lényegében a RELAP5-tel való csatoláshoz használt modell átalakított, továbbfejlesztett változata. A két modell eléggé hasonló, úgyhogy ezen modell leírásban csak a RELAP5-ös modellhez képesti eltéréseket emelném ki. A legnagyobb különbséget az okozza, hogy az Apros modell háromcsatornás, tehát kiszámolja a kívánt sűrűség- és hőmérsékletértékeket az öt legnagyobb teljesítményű, az öt legkisebb teljesítményű, illetve a maradék átlagos kazettákra. Így Serpent 2 oldalon is lehetőség nyílik pontosabb eloszlások megadására az inputfájlokban. Emiatt ezen modellben külön hőmérséklet- és sűrűségértéket lehet megadni anyagonként 20 axiális régióra és mind a 200 kazettára. A számítások során alkalmazott módszertant a későbbiekben részletesen be fogom mutatni. Ez összességében még több különbözően felparaméterezett anyagi régiót jelent, mint a RELAP5-ös esetben, tehát egyszerűsítések tétele ebben az esetben is szükséges. A modell képes arra, hogy minden kazettát anyagonként és axiális szintenként külön kezeljen, azonban a számítások során csak az üzemanyag, a moderátor, valamint a hűtőközeg régiókra alkalmaztam ilyen részletes felbontást. A többi anyagra egy egész zónára kiterjedő átlagos érték került megadásra. Ez nem okoz jelentős eltérést az eredményekben, hiszen a szerkezeti anyagok hőmérsékletének változása a vizsgált tartományon nem eredményez jelentős változást a neutronabszorpciós hatáskeresztmetszetükben. Emellett a RELAP5-ös modellhez hasonlóan a hőmérsékleteket itt is kerekíteni kellett, azonban a fél kelvinre történő kerekítés nem volt elegendő, ezért egy kelvinre kerekítettem. Mind a két elhanyagolásra sikerült próbaszámításokkal igazolni, hogy nem okoznak nagyobb eltérést a Serpent 2 számítási bizonytalanságánál. Az energiaháló rekonstrukció toleranciájának növelése itt is megtörtént, új értéke a RELAP5 iterációhoz hasonlóan 0,05 lett.

áramlásokat, illetve annak hőstruktúráját. Az egyetlen hőterjedés, ami eddig nem került be a modellbe az a tartály és a környezet közötti hőátadás. A 3.3 fejezetben ismertetett hűtőközeg- és moderátorútvonalak mindegyike megtalálható a modellben. A kettes pontban elválik egymástól a főáram (lefelé), és a reaktorkosár peremén levő furatok miatti bypass áramlás (felfelé). A hármas pontban a reflektor régióval való összeköttetés miatt egy másik bypass áramlás válik el a főágtól. Miután ez utóbbi két ág feláramlott a zóna fölé a négyes pontban újra egyesülnek. Az első bypass pedig az ötös pontban keveredik össze a főárammal. Ezután már a teljes tömegáram megindul lefelé a zóna egyik oldalán, és szétosztódik hét részre, hogy a moderátorcsatornákon keresztül átáramoljon a kazettákon. Ezt a hatos pont jelöli. A zóna után, a nyolcas pontban egyesül a hét ág, majd megindul lefelé, hogy aztán immáron hűtőközegként áthaladhasson egyesével a hét felmelegedési szinten, majd ezt követően távozik a tartályból. A nyolcas pont fölött elhelyezkedő hetes pont az áramlás felett kialakult pangó térrészt jelöli, ami egyébként több helyen is kialakulhat a reaktoron belül. Az ábrán az „SC stage” felíratú elemek úgynevezett Apros felhasználói komponensek, melyek további belső komponenseket fognak össze. A modellben ezek az egyes felmelegedési szinteket, az ott végbemenő folyamatokat jelképezik. A belső felépítésüket a 17. ábra szemlélteti.



17. ábra: A felmelegedési szintek belső szerkezete [24]

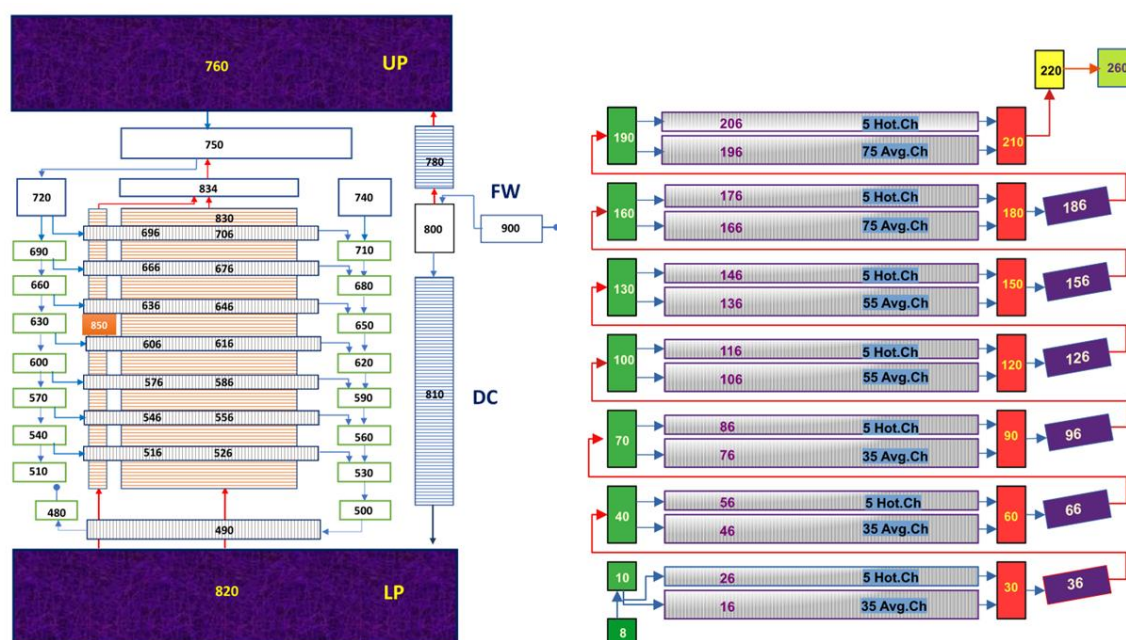
A felhasználói komponensek belső szerkezetében található a hűtőközeg régiót, a kazetták közötti, valamint a csatornán belüli moderátor régiókat leíró modell. Kazetták közötti moderátor esetére felmelegedési szintenként egy átlagos hőmérsékletet határoz meg. Ezzel szemben a moderátorcsatornán belüli moderátor és a hűtőközeg három részre oszlik, egy fűtött szakaszra, illetve az azt megelőző és követő fűtetlen részre. A fűtött szakasz további húsz nódusra oszlik. A modell háromcsatornás, tehát mind a hét felmelegedési szinten meghatározza az öt legmelegebb, az öt leghidegebb, illetve az átlagos kazettákra vonatkozó értékeket, összesen 22 axiális nódusra. Ezek mellett még itt található a pálcák, a moderátorfal, a kazettafal és néhány további szerkezeti elem hőstruktúrája, illetve a Serpent 2 számításokkal meghatározott teljesítményeloszlást beállító komponensek sora.

5.3. A RELAP5 modell

A RELAP5 modellt a BME NTI egyik konzorciumi partnere, a Pisai Egyetem képviselőjében Prof. Walter Ambrosini készítette, és a szükséges számításokat is ő futtatta le az iteráció során. A felépített Apros és RELAP5 modellek között viszonylag kevés különbség van, hiszen a cél az, hogy minél hasonlóbb eredményeket kapjunk a különböző kódok felhasználásával, azonban pár eltérés azért akad.

- A legfontosabb ezek közül az az, hogy az Apros modell háromcsatornás, míg a RELAP5 modell csupán kétcsatornás. A RELAP5 modellben öt forrócsatorna van felmelegedési szintenként, a többi kazetta pedig az átlagos értékek meghatározásában játszik szerepet.
- Az Apros modell pontosabban veszi figyelembe a reaktorban lejátszódó hőterjedést, hiszen a tartályon belül minden lehetséges folyamattal számol. Az egyedüli folyamat, ami nem szerepel a modellben az a tartály és a környezet közti hőátadás. Ezzel ellentétben a RELAP5 modellben csak az üzemanyag-pálcában, a kazettafalban, a moderátor csatornafalban lejátszódó, valamint a tartály és a környezet közötti folyamatok kerültek modellezésre.
- Az Apros modellben a pálcák tíz radiális szekcióra lettek felosztva (a program korlátjai miatt), míg a RELAP5 modellben a radiális felbontás ennél több szekcióból áll.
- A zóna elhelyezkedése sem egyezik meg a két modellben. Az Apros modellben a kazetták aktív része a négyzetes tér közepén, míg a RELAP5 modellben a belépő oldal felé eltolva találhatók. Emiatt a modellben a fűtött szakasz előtt csak egy egyben modellezett belépő tér van.
- Az utolsó említésre méltó különbség pedig az, hogy a RELAP5 modell jóval korábban készült el. A reaktor modellezése a róla készült CAD modell előtt megtörtént, így néhány adat nem egyezik meg tökéletesen a CAD modell alapján készült Apros adatokkal. Ennek a felülvizsgálata időközben megtörtént, és ma már minden eltérés kijavításra került.

A számításokhoz használt RELAP5 modellhez tartozó nodalizáció felépítése megtekinthető a 18. ábrán.



18. ábra: A RELAP5 modellhez tartozó nodalizáció [25]

A 18. ábrán látható a RELAP5 modell által alkalmazott nodalizáció, ami nagyon hasonlít az Apros-ban alkalmazottra. A bal oldalon a moderátorra vonatkozó nodalizáció található. A 900-as komponensben lép be a víz a tartályba, majd a 800-as komponensnél figyelhető meg a főáram és a feláramlás szétválása. A főáram azután bekerül a zóna alá (820-as komponens) majd újra szétválik. Ezután feláramlik a zónán, majd a 834-es komponensben egyesül a reflektorrégióból kiáramló bypassal, a 750-es komponensben pedig a kezdeti feláramlással. Majd lefordul és áthalad a moderátorcsatornákon. Miután ez megtörtént újra beáramlik a zóna alá és megkezdí az útját immáron hűtőközegként, ami a 18. ábra jobb oldalán látható. Az ábrán zölddel a belépő plénium komponensei, pirossal a kilépő pléniumé, míg lilával a két szint közötti feláramláshoz tartozó komponensek kerültek ábrázolásra. A hűtőközeg lentől felfelé halad végig a felmelegedési szinteken, és minden szinten látható a kétcsatornás felbontás, ami öt darab forró és a maradék átlagos csatornákból áll.

Mindezek ismeretében elmondható, hogy az Apros modell jelenleg valamivel előrehaladottabb állapotban van, mint a RELAP5 modell, az általa szolgáltatott eredmények némiképp pontosabbak. Viszont a RELAP5 modell jelenleg fejlesztés alatt áll, aminek a fő célja a tartályon belüli hőstruktúrák pontosabb figyelembevétele. Amennyiben ez megtörténik, ez a modell is pontosabban tudja majd modellezni a reaktor viselkedését, és ez lehetőséget biztosít egy új Serpent 2 – RELAP5 iterációs számítássorozat elvégzésére.

6. SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK

Az SCW-SMR zónakoncepció termohidraulikai és reaktorfizikai paraméterei erősen csatoltak a zónaoptimalizálás során kialakult zónatöltettel, anyagokkal és geometriával. A célom az volt, hogy minél pontosabban meghatározzam a zónán belüli hőmérséklet-, sűrűség- és teljesítményeloszlást. Ehhez az egyensúlyi állapot meghatározása szükséges, amelynek részét képezi egy iterációs eljárás. Ebben a fejezetben a két (Serpent 2 – Apros és Serpent 2 – RELAP5) lefuttatott számításorozat eredményeiről, illetve a számítások során alkalmazott módszertanról értekezek.

6.1. Serpent 2 – RELAP5 csatolt számítások eredményei

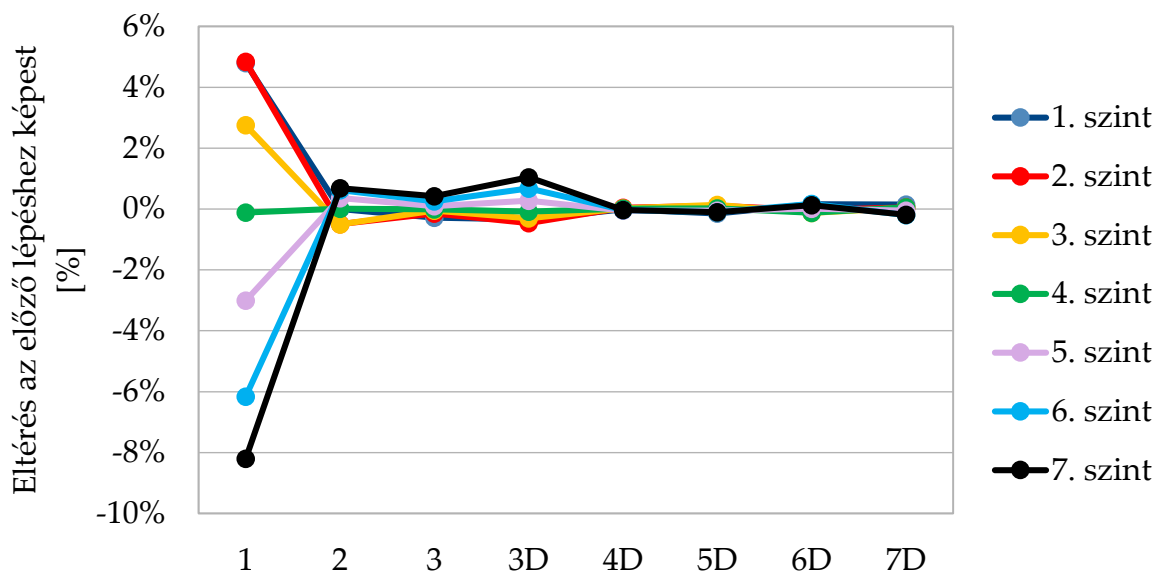
Az általam felépített Serpent 2 modellel az első gyengén csatolt számításorozatot Dr. Babcsány Boglárka és Prof. Walter Ambrosini végezte el. A két program között a kommunikáció Excel fájlokban, e-mailen keresztül történt, de az inputírás MATLAB szkriptek segítségével valósult meg, tehát az iteráció részben automatizált volt. A RELAP5 outputadatai hőmérséklet- és sűrűségeloszlások voltak a moderátorra, a hűtőközegre és a fűtőelemre vonatkozóan az átlagos és forró csatornákra. Ezekből az értékekből meghatároztam a többi szerkezeti elem hőmérsékletét is, a Serpent 2 modellbe inputként minden anyagra, minden szinten, átlagos és forró kazettákra vonatkozó értékek kerültek megadásra. A számítások eredményei pedig a zónabeli teljesítményeloszlások voltak felmelegedési szintenként átlagos és forró kazettákra, 20 axiális nódusban. A számításorozat eredményeit a 3-5. táblázatokban és a 4-17. diagramokon ábrázoltam, illetve az iterációs lépések közötti eltérések szélsőértékeit az 1. mellékletben lehet megtekinteni.

3. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások

Iterációs lépés	Szintenkénti teljesítmény (MW)						
	1. szint	2. szint	3. szint	4. szint	5. szint	6. szint	7. szint
0.	34,61	49,88	48,20	56,84	41,66	36,18	22,63
1.	36,27	52,30	49,52	56,78	40,40	33,95	20,78
2.	36,27	52,04	49,27	56,78	40,55	34,16	20,92
3.	36,17	51,96	49,25	56,78	40,59	34,25	21,01
3D.	36,05	51,72	49,10	56,73	40,70	34,48	21,23
4D_korr	36,04	51,75	49,11	56,74	40,68	34,47	21,22
5D_korr	35,99	51,80	49,18	56,75	40,66	34,43	21,20
6D	36,05	51,78	49,11	56,68	40,66	34,49	21,22
7D	36,10	51,81	49,14	56,72	40,64	34,42	21,18

4. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások és bizonytalanságuk

iterációs lépés	Szintenkénti teljesítmény eltérése az előzőhöz képest (%)						
	1. szint	2. szint	3. szint	4. szint	5. szint	6. szint	7. szint
0-1.	4,79%	4,84%	2,75%	-0,11%	-3,01%	-6,16%	-8,20%
1-2.	0,00%	-0,49%	-0,50%	0,01%	0,36%	0,62%	0,69%
2-3.	-0,29%	-0,14%	-0,06%	-0,01%	0,09%	0,25%	0,42%
3-3D	-0,34%	-0,47%	-0,31%	-0,08%	0,28%	0,68%	1,04%
3D-4Dk	-0,01%	0,04%	0,03%	0,02%	-0,05%	-0,04%	-0,03%
4Dk-5Dk	-0,15%	0,10%	0,14%	0,02%	-0,06%	-0,11%	-0,11%
5Dk-6D	0,16%	-0,03%	-0,13%	-0,12%	0,01%	0,17%	0,13%
6D-7D	0,14%	0,05%	0,05%	0,06%	-0,06%	-0,20%	-0,19%
	Szintenkénti teljesítmény bizonytalansága (%)						
összes	0,31%	0,27%	0,26%	0,29%	0,34%	0,42%	0,56%



4. diagram: A teljesítményeloszlás változása

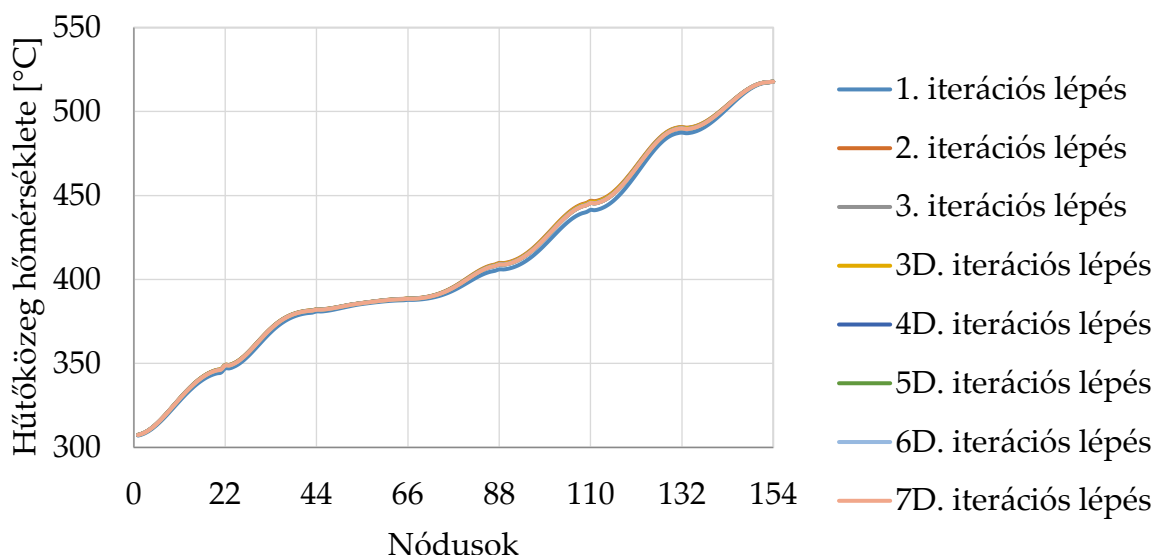
A 3. táblázatban a szintenkénti teljesítményeloszlások, míg a 4. táblázatban ezek iterációs lépések közötti, szintenkénti változása, illetve a teljesítmények Serpent 2-höz tartozó egy szigma számítási bizonytalansága látható. A 4. táblázatban feltüntetett adatok a 4. diagramon kerültek szemléltetésre. A számítási bizonytalanság minden iterációs lépés során megközelítőleg ugyanannyi volt, ezért csak egy értéket adtam meg, ami az összes lépésre vonatkozik. A 4. táblázatban látszik, hogy a 3. és a 3D lépések között jelentős mértékben megnő a teljesítményekben az eltérés, a változás kikerült a Serpent 2 számítási bizonytalanságán kívülre. Ennek az oka egy a RELAP5 oldalán a kiértékelésben bekövetkezett módosítás volt, amit a későbbiekben be fogok mutatni. A 3. táblázat adatai alapján látható, hogy a szintenkénti teljesítmények az alsó szinteken jóval magasabbak, mint a felsőkön ennek az oka az 1.

diagramon bemutatott teljesítményeloszlásra való törekvés. Azonban azt nagyon nehéz elérni. A modellemben felhasznált adatok a zónaoptimalizálási feladat egy korábbi szakaszából vannak, ezért nem követik pontosan azt.

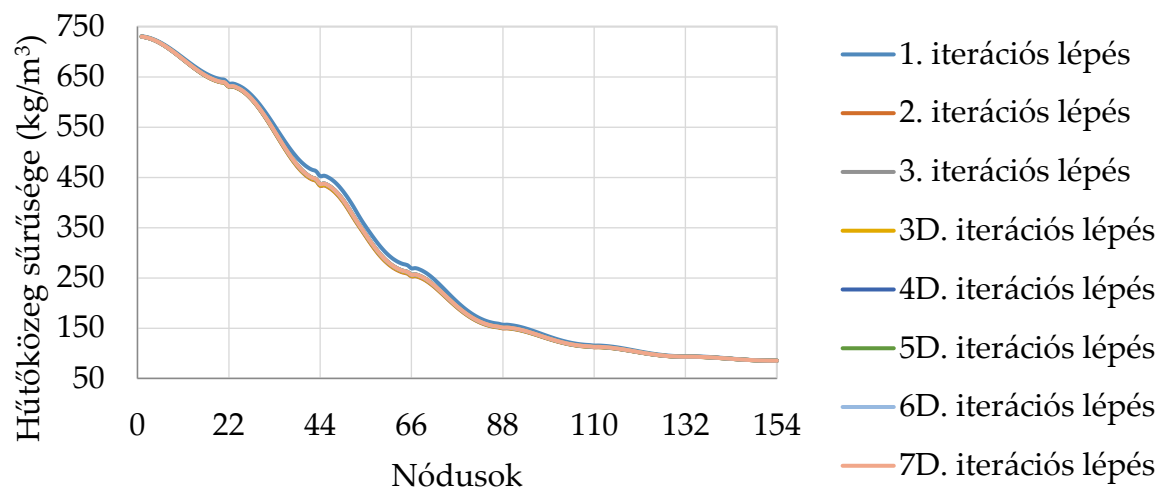
5. táblázat: Az effektív sokszorozási tényező értékei, változása és bizonytalansága

Iterációs lépés	k_{eff}	Δk_{eff} [pcm]	1σ [pcm]
0	1,22842		5
1	1,23475	515	5
2	1,23407	-55	5
3	1,23416	7	5
3D	1,23322	-76	5
4D_korr	1,23329	6	5
5D_korr	1,23338	7	5
6D	1,23329	-7	5
7D	1,23329	0	5

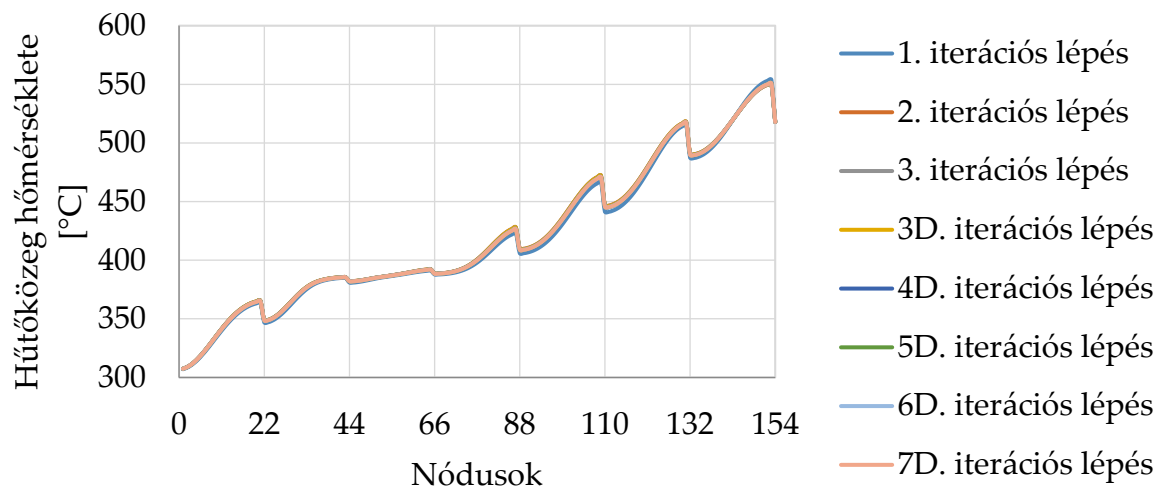
Az 5. táblázatban az effektív sokszorozási tényező értékeit, annak változását, valamint a Serpent hozzájuk tartozó számítási bizonytalanságát tüntettem fel. Az effektív sokszorozási tényező értékében is megfigyelhető egy jelentős változás a 3. és 3D iterációs lépések között, aminek az oka ugyanaz, mint a teljesítményeloszlás esetében. A konvergensenek tekintett effektív sokszorozási tényező értéke 1,23329 a kampány elején. Ez igen jelentős reaktivástartalékot jelent, ez lehetővé teszi az SMR reaktorokra jellemző legalább két év hosszúságú kampány elérését.



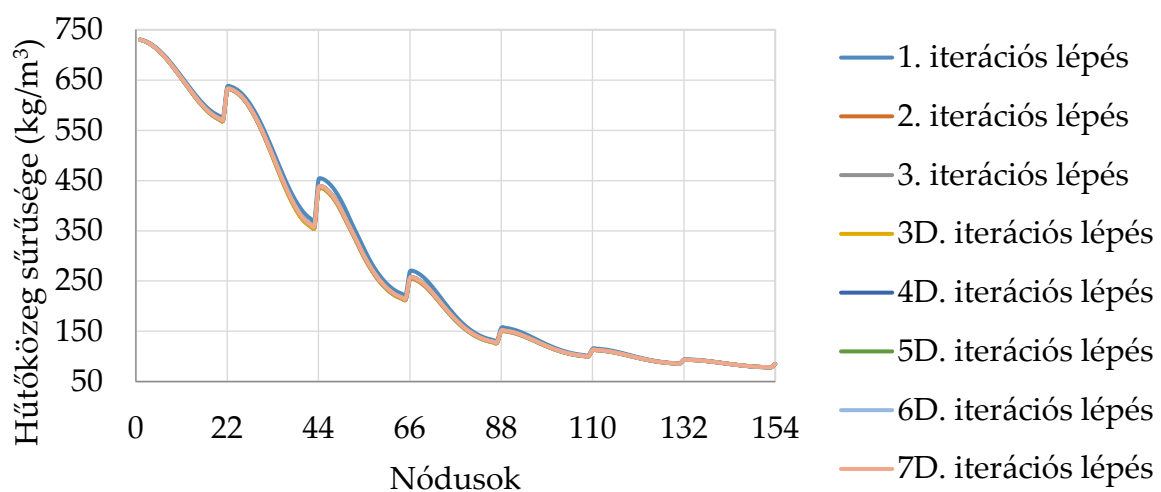
5. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban



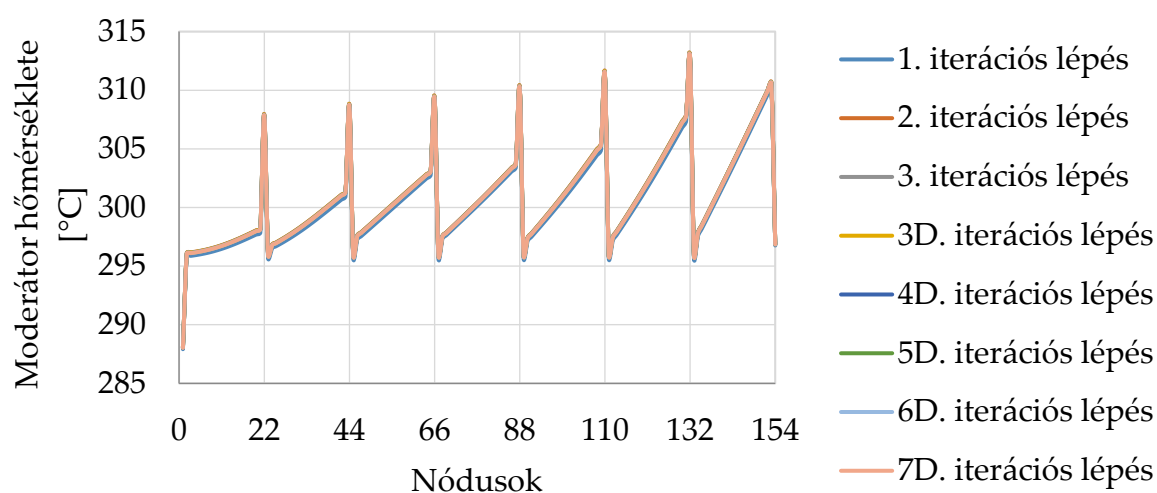
6. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása az átlagos kazettákban



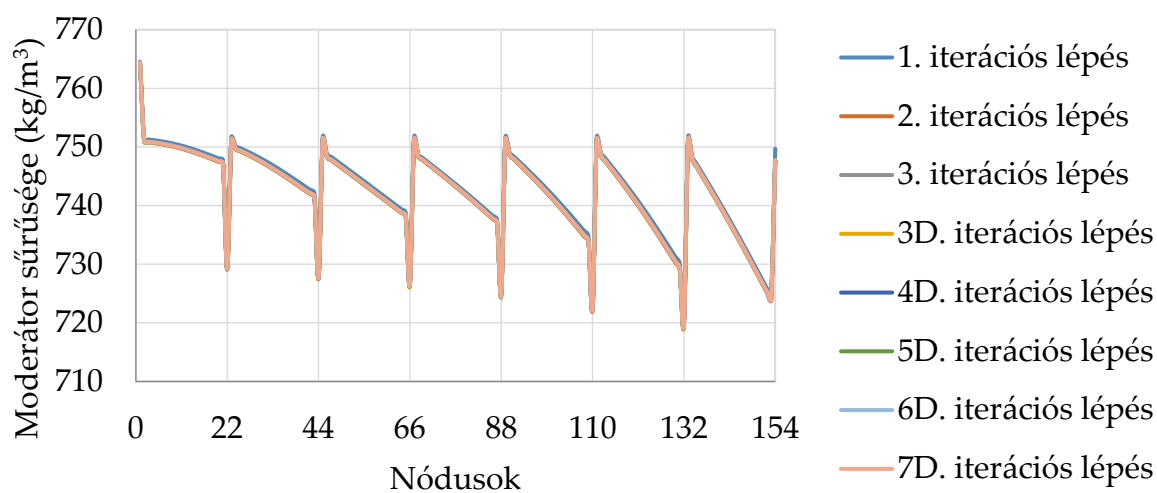
7. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása a forró kazettákban



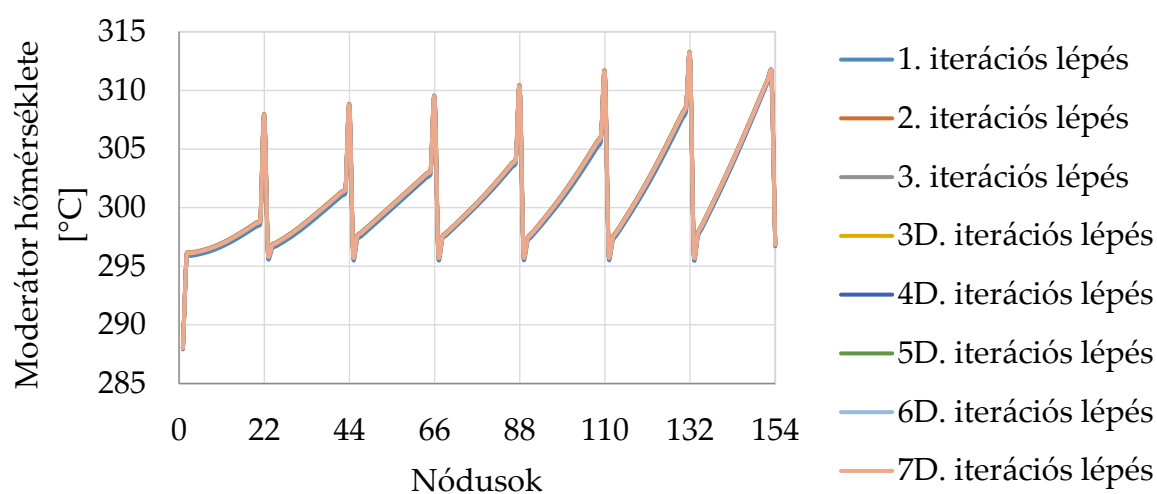
8. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása a forró kazettákban



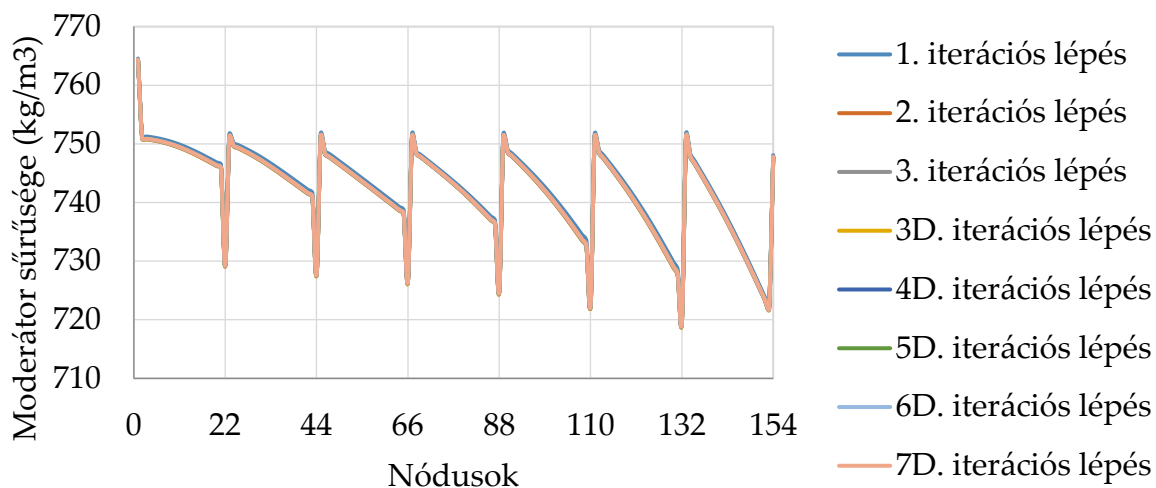
9. diagram: Moderator hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban



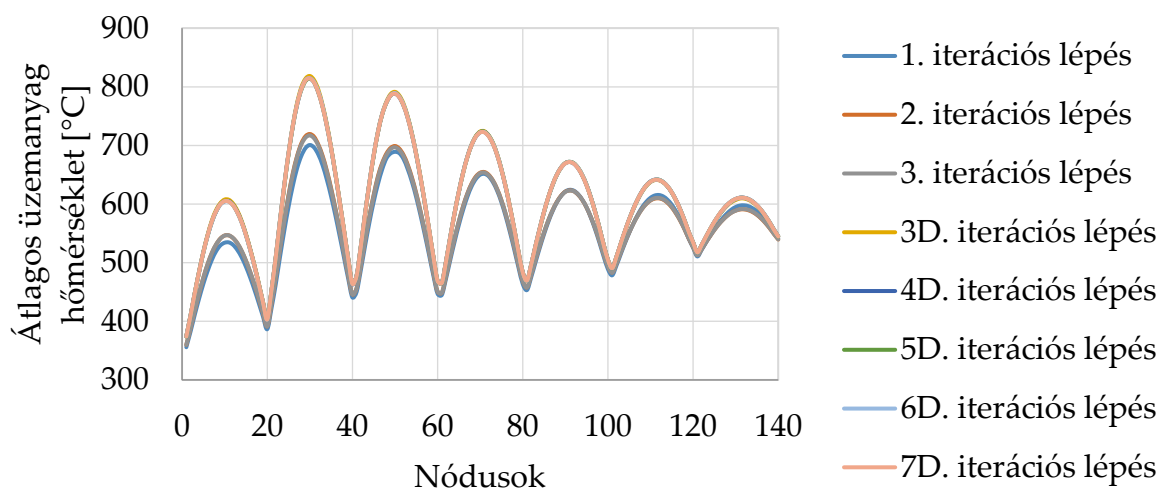
10. diagram: Moderator sűrűségének változása az átlagos kazettákban

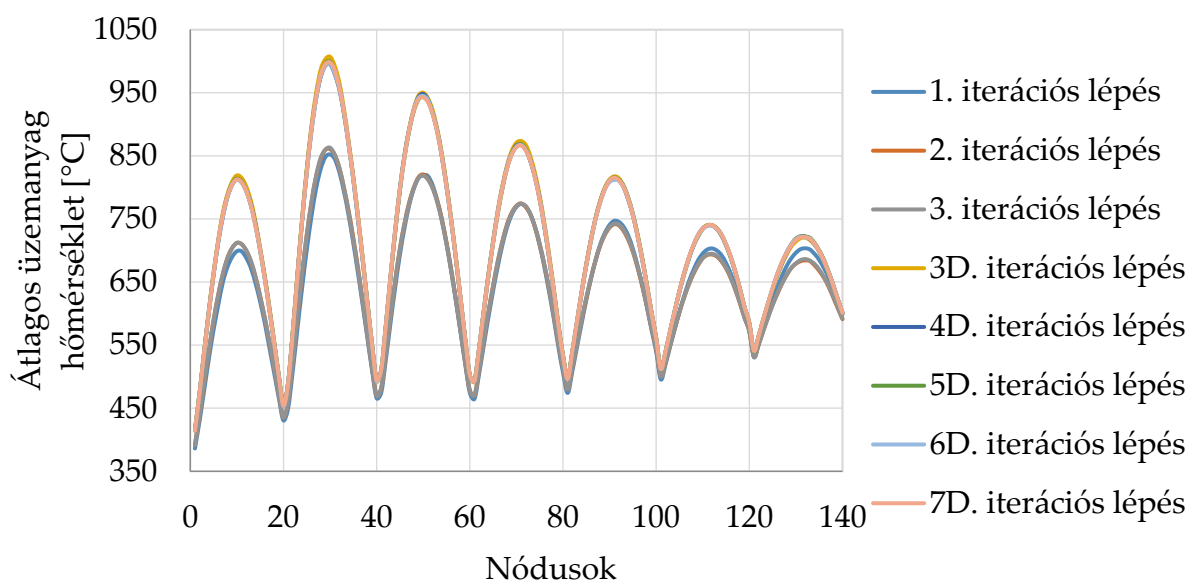


11. diagram: Moderator hőmérsékletének változása a forró kazettákban

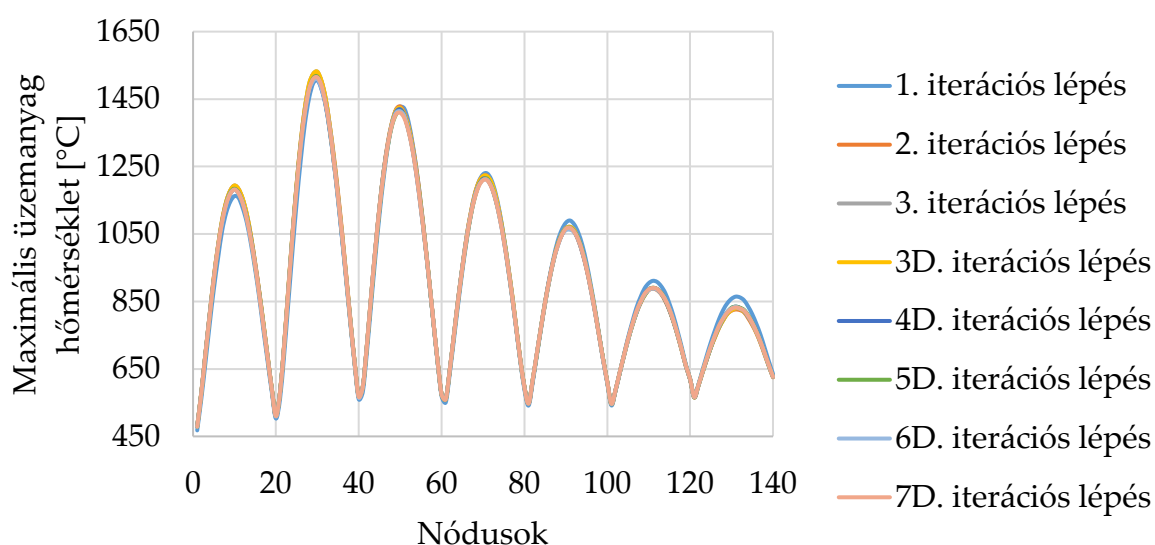


Az 5-8. diagramokon a hűtőközeg hőmérsékletének és nyomásának változását ábrázoltam az átlagos, illetve a forró kazettákra. A 9-12. diagramokon pedig ugyanezeket, csak a moderátorra vonatkozóan. Látható, hogy minden esetben nagyon gyorsan konvergált az eredmény, szinte csak az első iterációs lépésben különbözött az eredmény a többitől. A víz 280°C hőmérsékleten lép be a tartályba, ami a kazetták közötti áthaladás során közel 290°C-ra melegszik fel. A moderátorcsatornán való áthaladás során erről a hőmérsékletről közelítőleg 310°C-ot ér el. Ezt követően hűtőközegként halad tovább, és a hét felmelegedési szint alatt 520°C-550°C-ra melegszik fel attól függően, hogy átlagos vagy forró kazettáról beszélünk. A közeg felmelegedése nem monoton növekvő, hanem a szintek között mindig lecsökken. Ennek a szintek közötti keverés az oka, ami elősegíti a zónán belüli alacsonyabb hőmérsékletek elérését. A sűrűségek hasonló tendenciát mutatnak, mint a hőmérséklet, csak értelemszerűen csökken az értékük. A belépéskor tapasztalható közelítőleg 765 kg/m³ sűrűség a kilépésre egészen 100 kg/m³ alá csökken.





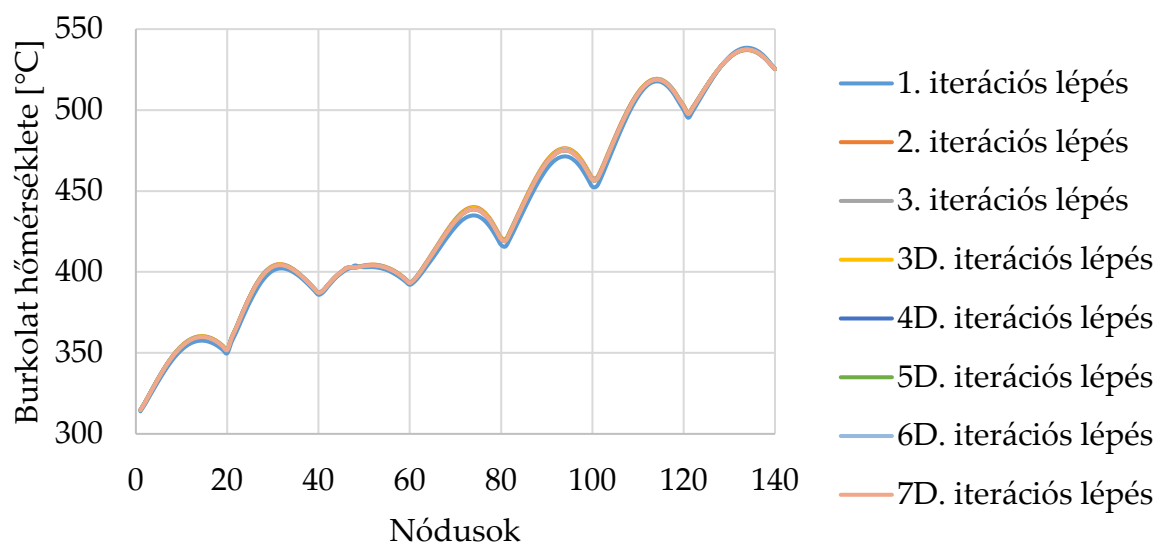
14. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása a forró kazettákban



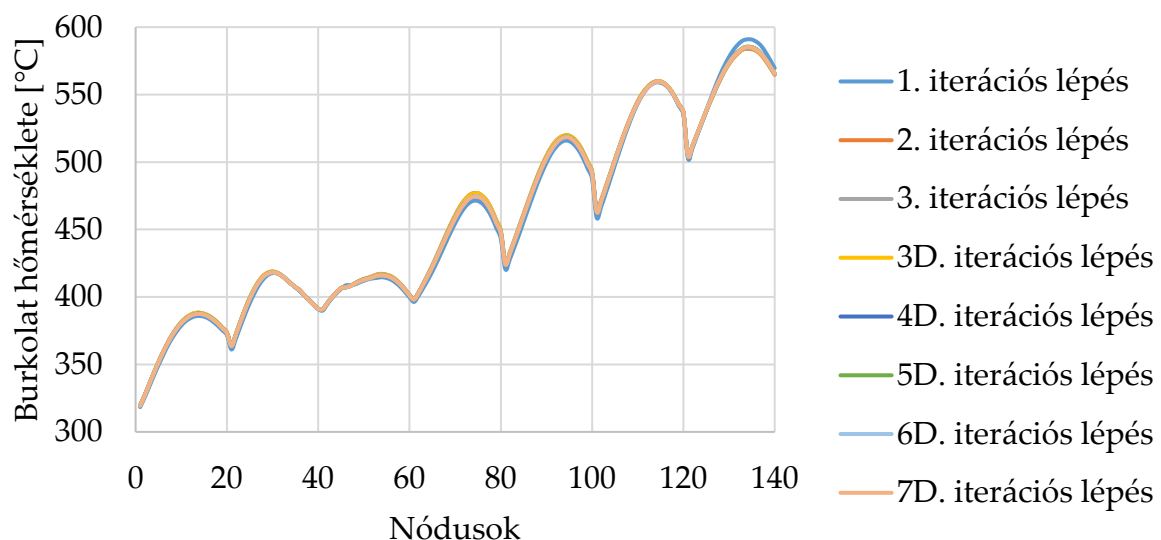
15. diagram: Üzemanyag maximális hőmérsékletének változása

A 13. diagramon az átlagos kazettákban, míg a 14. diagramon a forró kazettákban fellépő átlagos üzemanyag hőmérsékletet ábrázoltam. A 15. diagramon a maximális üzemanyag hőmérséklet látható. Néhány korábbi eredményhez hasonlóan az átlagos üzemanyag hőmérsékletek értékében is megfigyelhető egy jelentősnek mondható ugrás a 3. és 3D iterációs lépések között. Ez azzal magyarázható, hogy a RELAP5 eredményeinek kiértékelésében ezen két iterációs lépés között történt egy módosítás. Az első három lépés során az üzemanyag átlagos hőmérsékletébe a gázrés és a pálcaburkolat hőmérséklete beszámításra került, a 3D iterációs lépéstől azonban már nem. Ez azt eredményezte, hogy a Serpent 2 számításokban figyelembe vett üzemanyag hőmérséklet jelentős mértékben megnőtt, az emiatti visszacsatolások következtében pedig az effektív sokszorozási tényező kismértékben (körülbelül 75 pcm-mel) lecsökkent. A maximális üzemanyag hőmérsékletben

nem figyelhető meg ez az ugrás, hiszen a burkolat- és gázrés-hőmérséklet sosem került beszámításra. Ennek ellenére látható egy kisebb változás az értékekben az első és a második lépések között. Erre viszont a magyarázat az, hogy az első számítás során felhasznált adatok lényegében becsléssel kerültek meghatározásra, ennek következtében meglehetősen pontatlanok voltak. A maximális üzemanyaghőmérséklet a teljes zónára vonatkozóan közelítőleg 1500°C-ra tehető. Ez bőven az urán-dioxid olvadáspontja alatt van, és semmilyen korlátot sem sért. Az üzemelő reaktorokban gyakran ennél magasabb (akár 1600-1700°C) hőmérséklet tapasztalható a pasztillák közepén. [26]



16. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban



17. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása a forró kazettákban

A 16. diagramon ábrázoltam az átlagos, míg a 17. diagramon a forró kazettákra vonatkozó burkolathőmérsékleteket. Ennek az értéke minden esetben 600°C alatti. Ez egy rendkívül jó

hír, hiszen ez a reaktorkoncepció egyik legkritikusabb pontja. A HPLWR reaktorban a fejlesztők előzetesen 630°C-os maximális burkolathőmérsékletet vártak, azonban a számítások során egy ezt jelentősen meghaladó értéket kaptak. Ez a magas hőmérséklet volt az egyik oka az SCW-SMR reaktorkoncepció megszületésének. Ezzel a számítássorozattal sikerült igazolni, hogy a koncepció megfelel az egyik legfontosabb kitűzött célnek, hogy a burkolathőmérséklet lecsökkenjen, és ne haladja meg az eredeti célként kitűzött 614°C értéket. [16]

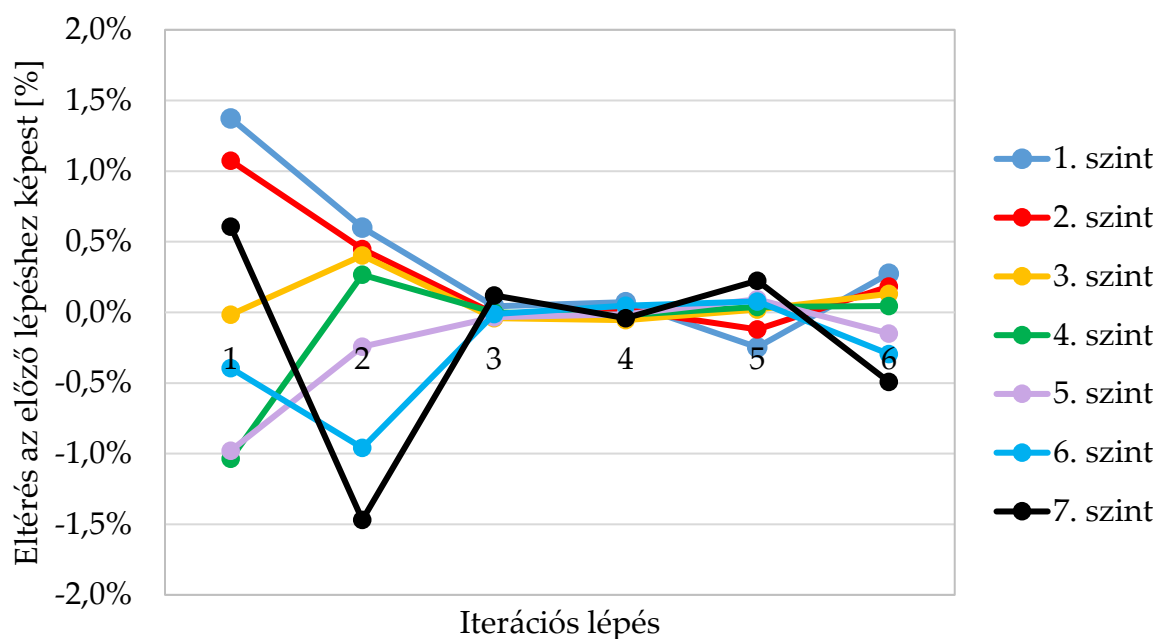
A RELAP5 – Serpent 2 csatolt számítássorozat konklúziójaként annyit emelnék ki, hogy majdnem minden esetben nagyon gyorsan konvergált a számítás. A moderátor-, hűtőközeg- és burkolat hőmérséklet- és sűrűségértékek, a forró és átlagos kazettákra egyaránt, két iterációs lépés után már csak minimálisan változtak. A pontos maximum- és minimumértékek az 1. mellékletben megtekinthetők. Az üzemanyag-hőmérsékletben, effektív sokszorozási tényezőben, illetve teljesítményeloszlásban azonban voltak eltérések a lépések között. Ezen értékek közötti eltérések az első három lépés alatt majdnem nullára csökkentek, azonban a 3. és a 3D iterációs lépések között tapasztalható egy ugrás bennük. Ez a RELAP5 oldali módosításnak köszönhető. A kezdeti lépésekben tapasztalt eltérések pedig a kezdeti pontatlan, becsült adatoknak köszönhetőek.

6.2. *Serpent 2 – Apros csatolt számítások eredményei*

A gyengén csatolt számítássorozat során a Serpent 2 számításokat én végeztem el, míg az Apros számításokat Varju Tamás. A programok közötti kommunikáció ugyanúgy történt, mint a RELAP5-tel történő iteráció során. Az Apros outputadatai hőmérséklet- és sűrűségeloszlások voltak a moderátorra, a hűtőközegre és a fűtőelemre vonatkozóan az átlagos, hideg és forró csatornákra. Ezekből az értékekből meghatároztam a többi, ismeretlen hőmérsékletű szerkezeti elem (moderátorcsatorna fal, kazettafal stb.) hőmérsékletét is, mégpedig úgy, hogy átlagoltam az elemeket körülvevő ismert hőmérsékletű anyagok (moderátor, hűtőközeg, üzemanyag, burkolat) hőmérsékletét. Ezt követően az átlagos, a forró és a hideg kazettákra vonatkozó értékek másodfokú polinomillesztéssel interpolálásra kerültek minden kazettára az előző lépésbeli teljesítményeloszlás alapján. A Serpent 2 inputban a moderátorra, hűtőközegre és a fűtőelemre vonatkozó hőmérséklet- és sűrűségértékeket minden kazettára külön-külön figyelembe vettem. Ezzel szemben a többi anyagra meghatároztam egy átlagos értéket a teljes reaktorra vonatkozóan, és azt implementáltam a Serpent modellbe. Erre a memóriagazdálkodás miatt volt szükség. Próbaszámítások segítségével sikerült igazolni, hogy ez az egyszerűsítés a korábbi egyszerűsítésekkel összhangban ugyancsak nem okoz a Serpent egy szigma számítási bizonytalanságát meghaladó eltérést a számítási eredményekben. A végeredmény pedig a zóna teljesítményeloszlása volt felmelegedési szintenként az átlagos, hideg és forró kazettákra, 20 axiális nódusban. A számítássorozat eredményeit a 6-8. táblázatokban és a 18-36. diagramokon ábrázoltam, illetve az iterációs lépések közötti eltérések szélsőértékeit az 2. mellékletben lehet megtekinteni.

6. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások

Iterációs lépés	Szintenkénti teljesítmény (MW)						
	1. szint	2. szint	3. szint	4. szint	5. szint	6. szint	7. szint
0.	34,61	49,88	48,20	56,84	41,66	36,18	22,63
1.	35,09	50,42	48,19	56,25	41,25	36,03	22,77
2.	35,30	50,64	48,38	56,40	41,15	35,69	22,43
3.	35,32	50,64	48,36	56,40	41,13	35,68	22,46
4.	35,34	50,65	48,34	56,39	41,13	35,70	22,45
5.	35,25	50,59	48,35	56,41	41,17	35,73	22,50
6.	35,35	50,68	48,41	56,44	41,11	35,62	22,39



18. diagram: A teljesítményeloszlás változása

7. táblázat: A kapott szintenkénti teljesítményeloszlások és bizonytalanságuk

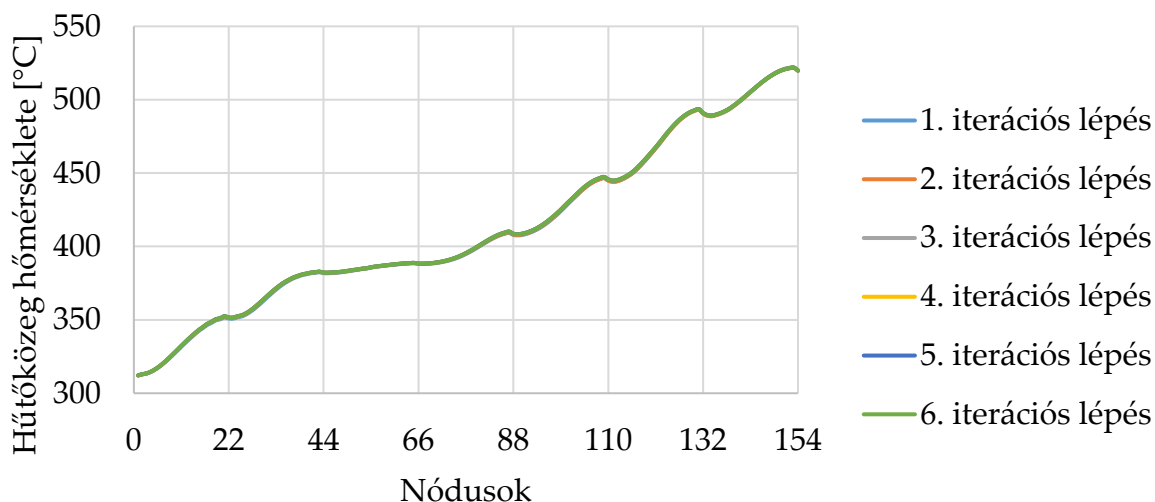
iterációs lépés	Szintenkénti teljesítmény eltérése az előzőhöz képest (%)						
	1. szint	2. szint	3. szint	4. szint	5. szint	6. szint	7. szint
0-1.	1,37%	1,07%	-0,02%	-1,04%	-0,98%	-0,40%	0,61%
1-2.	0,60%	0,45%	0,40%	0,27%	-0,24%	-0,96%	-1,47%
2-3.	0,04%	-0,01%	-0,04%	0,00%	-0,03%	-0,01%	0,12%
3-4.	0,07%	0,02%	-0,06%	-0,02%	-0,01%	0,05%	-0,04%
4-5.	-0,25%	-0,12%	0,02%	0,04%	0,09%	0,08%	0,23%
5-6.	0,27%	0,18%	0,13%	0,04%	-0,15%	-0,29%	-0,49%
	Szintenkénti teljesítmény bizonytalansága (%)						
összes	0,32%	0,27%	0,26%	0,29%	0,34%	0,41%	0,54%

A 6. táblázatban a szintenkénti teljesítményeloszlásokat ábrázoltam, míg a 7. táblázatban ezek változását, illetve a hozzájuk tartozó számítási bizonytalanságot. A 18. diagramon a 7. táblázat adatai kerültek szemléltetésre. A RELAP5-tel történő iterációhoz hasonlóan itt is csak egy számítási bizonytalanságot adtam meg, mivel az minden lépésben körülbelül ugyanannyi volt. A gyors konvergencia ebben az esetben is megtörtént, a harmadik iterációs lépéstől kezdve az eltérések minden esetben egy szigma számítási bizonytalanságnál alacsonyabbak voltak.

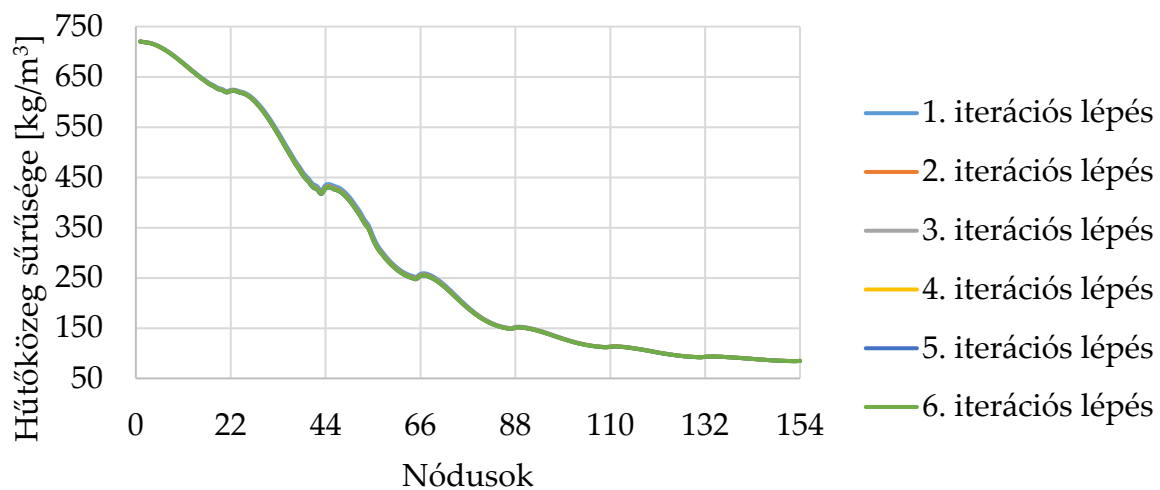
8. táblázat: Az effektív sokszorozási tényező értékei, változása és bizonytalansága

Iterációs lépés	k_{eff} [-]	Δk_{eff} [pcm]	1σ [pcm]
0	1,22842		5
1	1,23101	211	5
2	1,23222	98	5
3	1,23217	-4	5
4	1,23209	-6	5
5	1,23226	14	5
6	1,23234	6	5

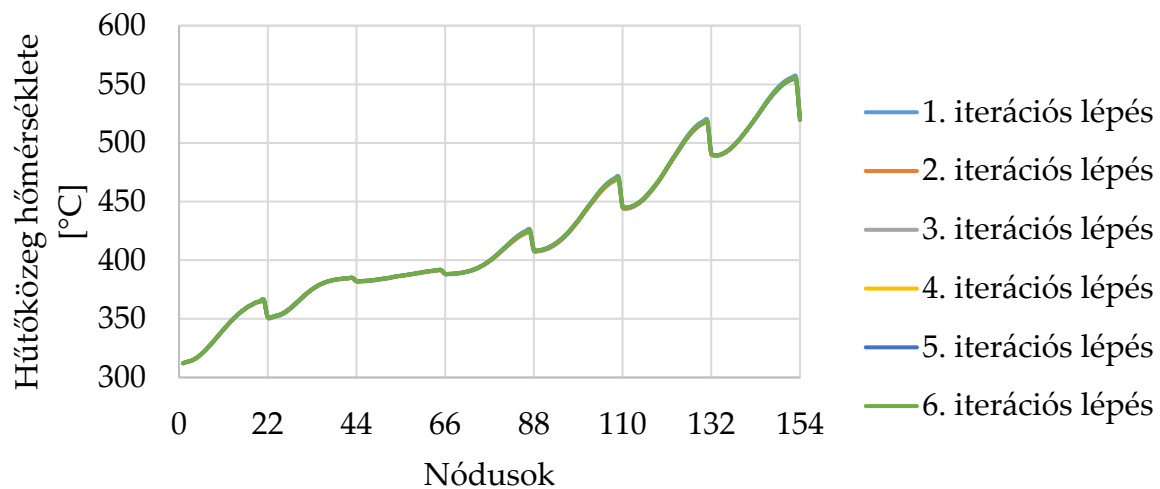
A 8. táblázatban az effektív sokszorozási tényező értékeit, annak változását, valamint a Serpent hozzájuk tartozó számítási bizonytalanságát tüntettem fel. A kapott értékek itt is gyors konvergenciát mutatnak, azonban néhány, a lépések között tapasztalható eltérés meghaladja az egy szigma számítási bizonytalanságot. Viszont csak kevéssel, úgyhogy a számítás ebben az esetben is konvergensenek tekinthető. A végeredményként kapott effektív sokszorozási tényező értéke 1,23234 a kampány elején. Ez is igen jelentős reaktivitástartalékot jelent, azonban kb. 100 pcm-mel alacsonyabb ez az érték, mint a RELAP5-ös számítások során kapott. Ez az eltérés az Apros-szal számolt kicsivel magasabb hőmérsékletek következtében kialakuló jelentősebb negatív visszacsatolásoknak köszönhető.



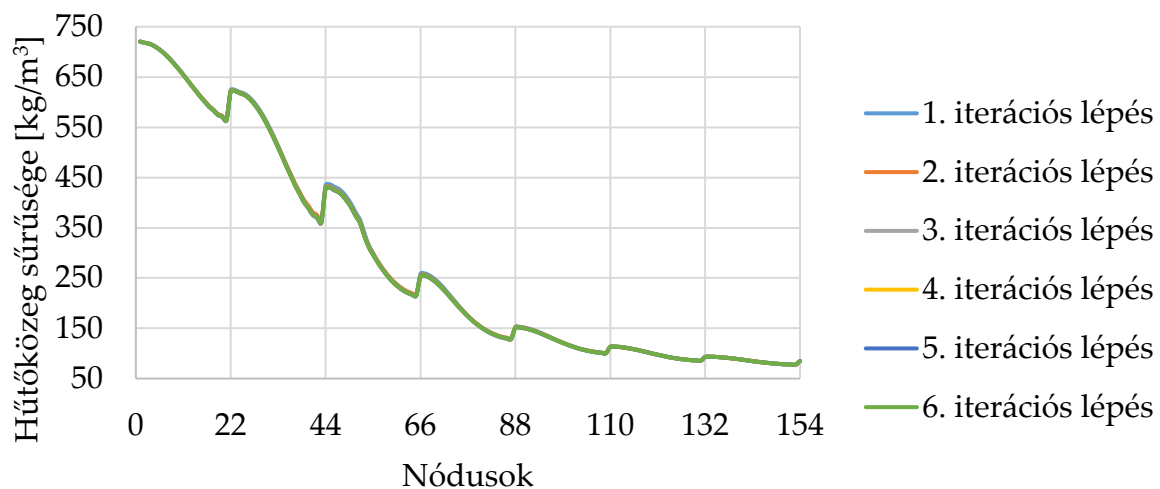
19. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban



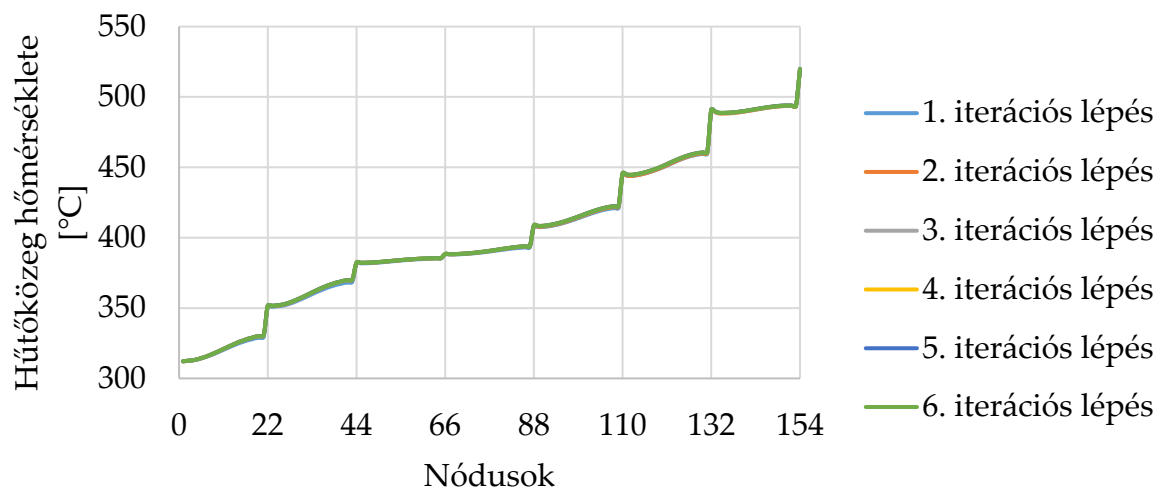
20. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása az átlagos kazettákban



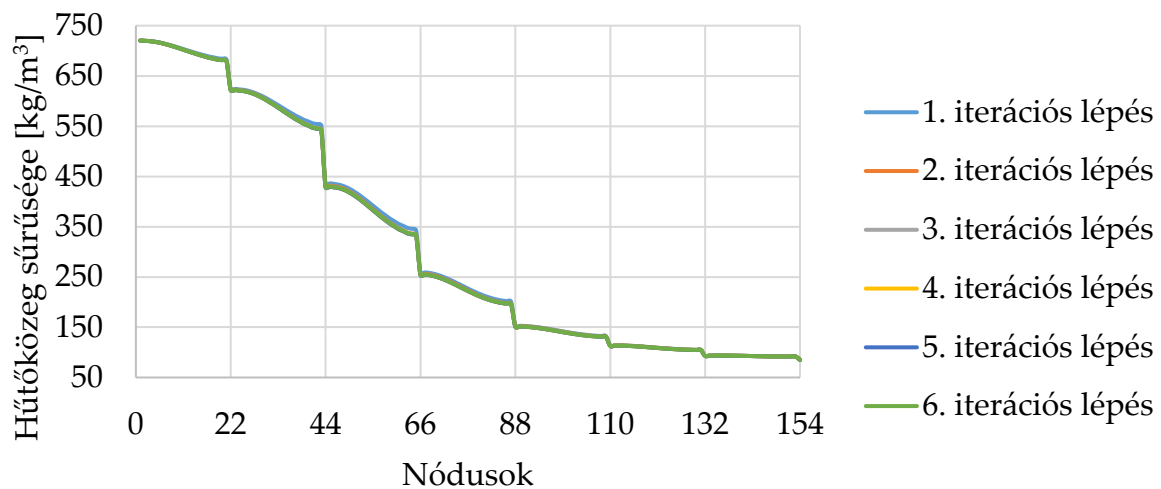
21. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása a forró kazettákban



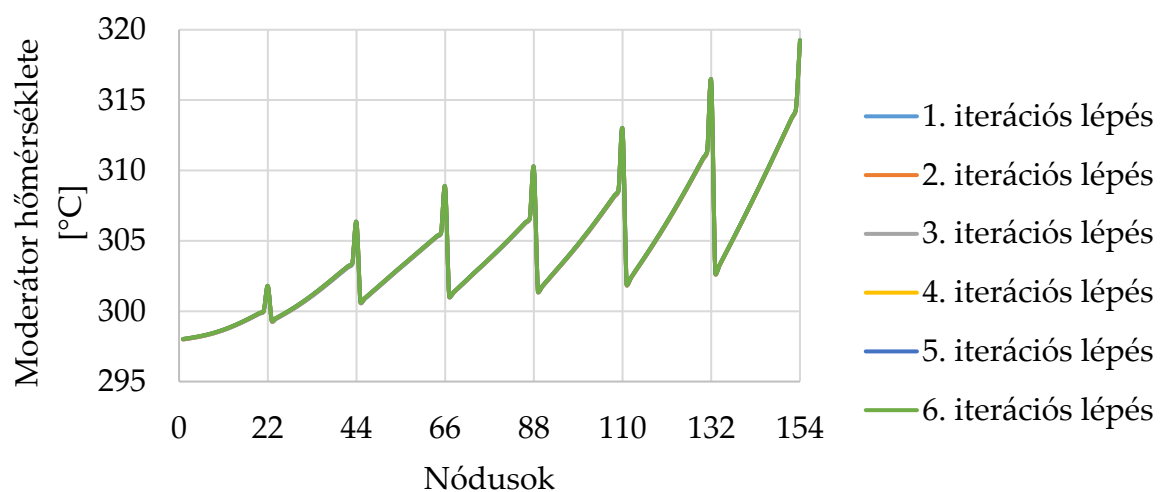
22. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása a forró kazettákban



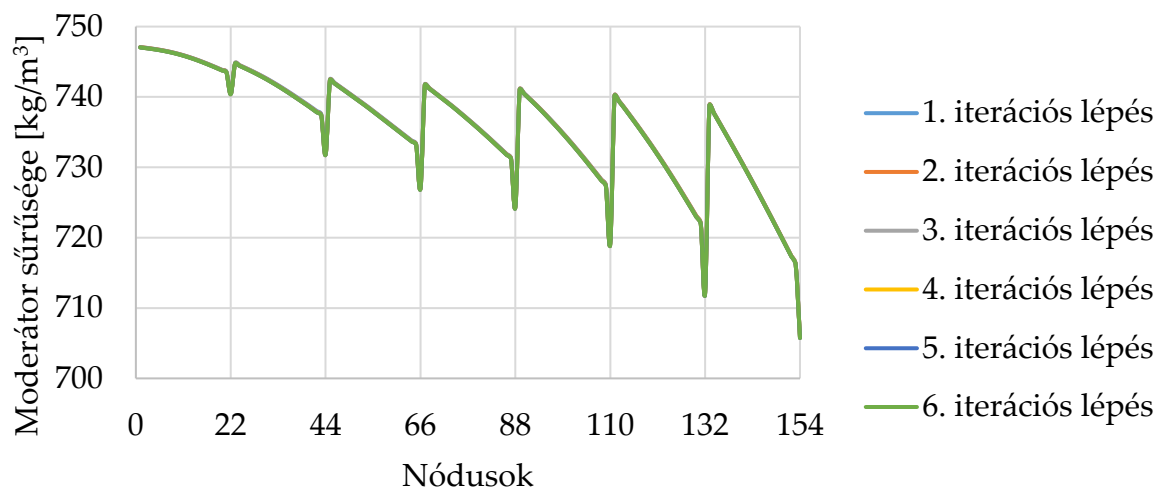
23. diagram: Hűtőközeg hőmérsékletének változása a hideg kazettákban



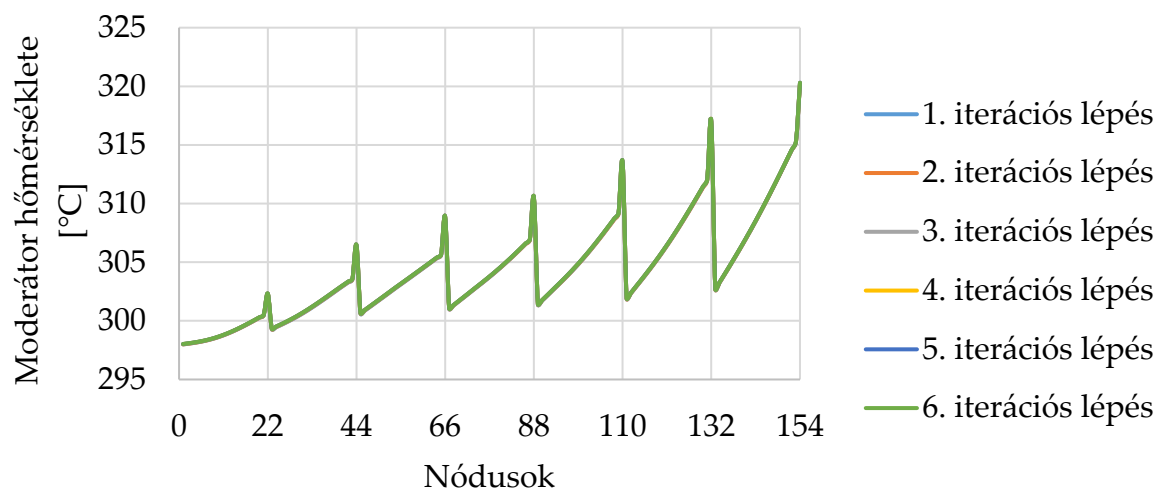
24. diagram: Hűtőközeg sűrűségének változása a hideg kazettákban



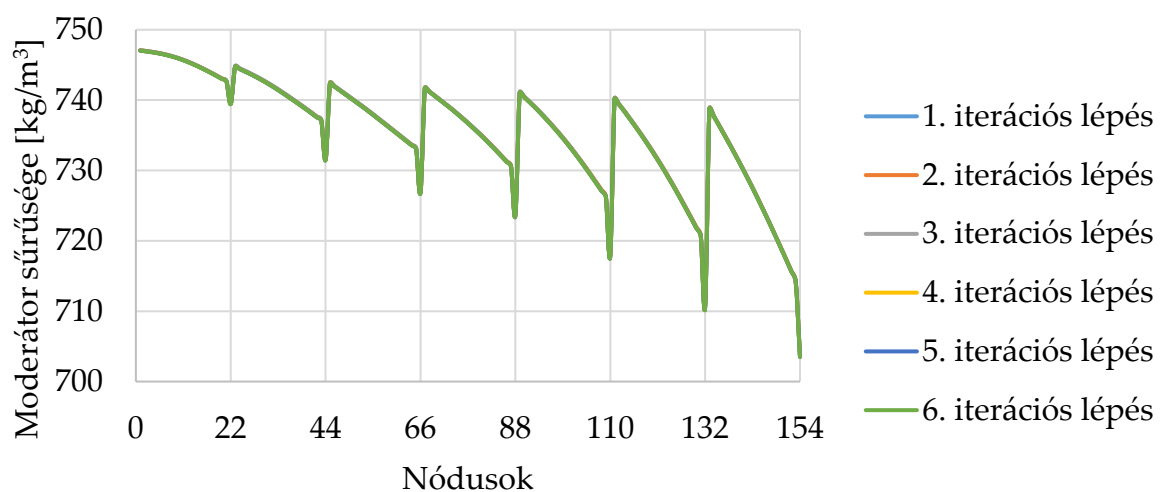
25. diagram: Moderátor hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban



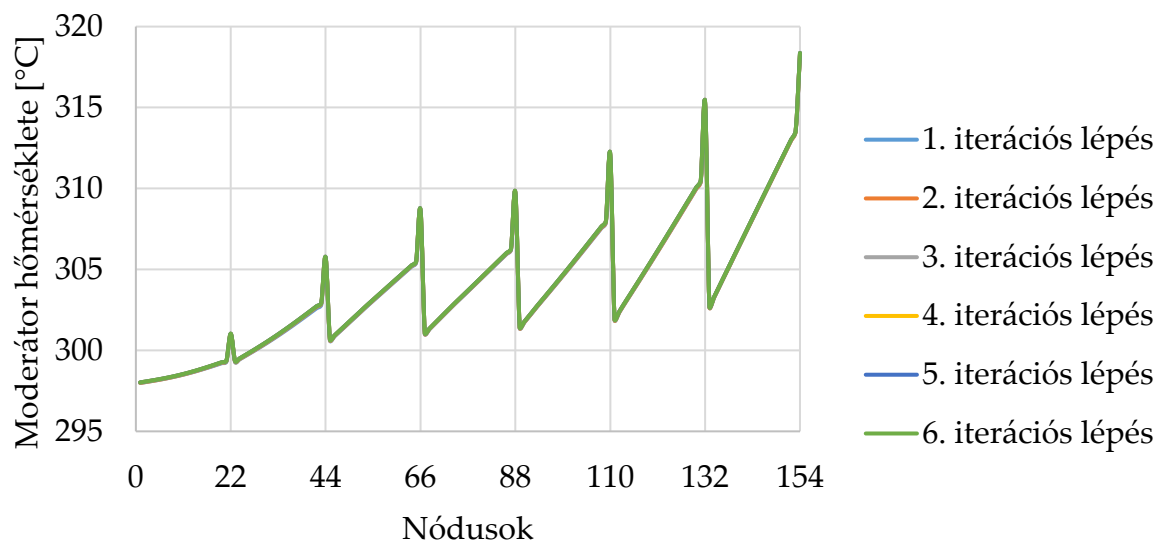
26. diagram: Moderátor sűrűségének változása az átlagos kazettákban



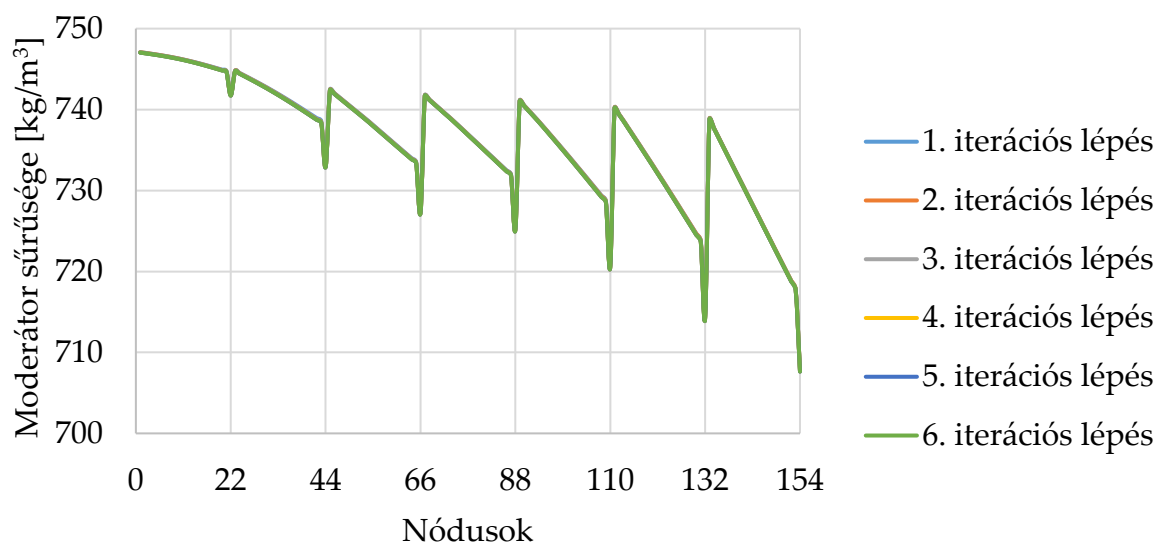
27. diagram: Moderátor hőmérsékletének változása a forró kazettákban



28. diagram: Moderátor sűrűségének változása a forró kazettákban

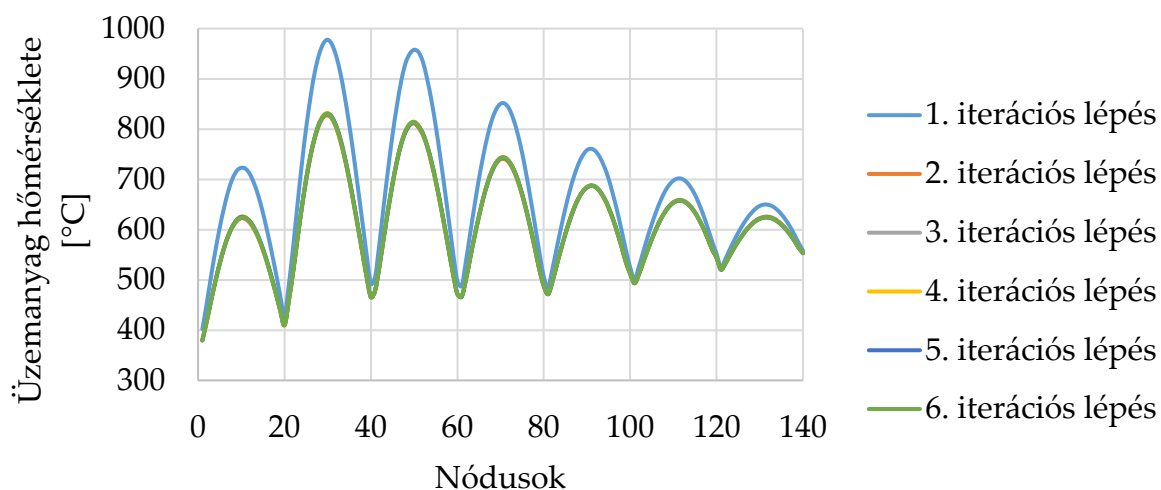


29. diagram: Moderator hőmérsékletének változása a hideg kazettákban

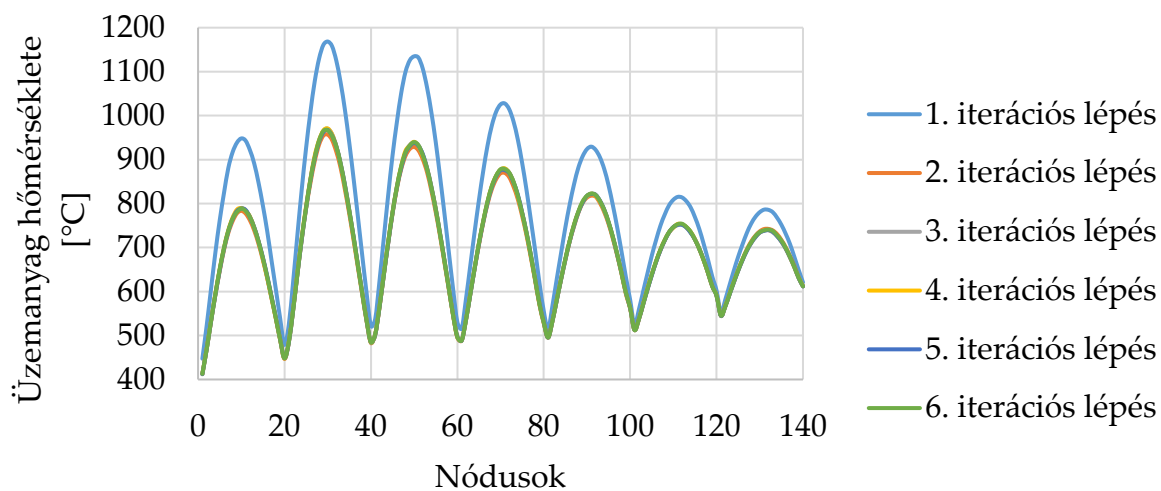


30. diagram: Moderator sűrűségének változása a hideg kazettákban

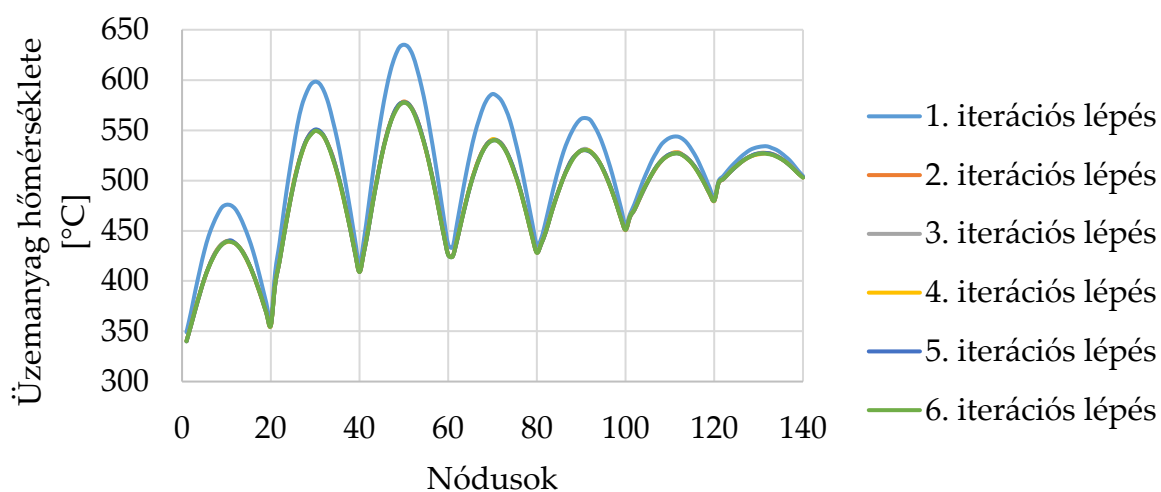
Az 19-24. diagramokon a hűtőközeg hőmérsékletének és nyomásának változását ábrázoltam az átlagos, a forró, illetve a hideg kazettákra. A 25-30. diagramokon pedig ugyanezeket, csak a moderátorra vonatkozóan. Látható, hogy minden esetben nagyon gyorsan konvergált az eredmény, szinte csak az első iterációs lépésben különbözött az eredmény a többitől. A víz felmelegedése tekintetében pontosan ugyanaz mondható el, mint a RELAP5-tel történő csatolás esetében. A sűrűség és a hőmérséklet ugyanazon határok között változik. A hűtőközeg hőmérsékletének változásában megfigyelhető egy anomália a harmadik szinten, ugyanis akkor csak nagyon csekély mértékben nő a hőmérséklete. Ez annak tudható be, hogy a fázisátalakulás ezen a szinten következik be, úgyhogy a felvett energia nem a közeg melegítésére, hanem a fázisátalakulás energiaszükségletének fedezésére fordítódik.



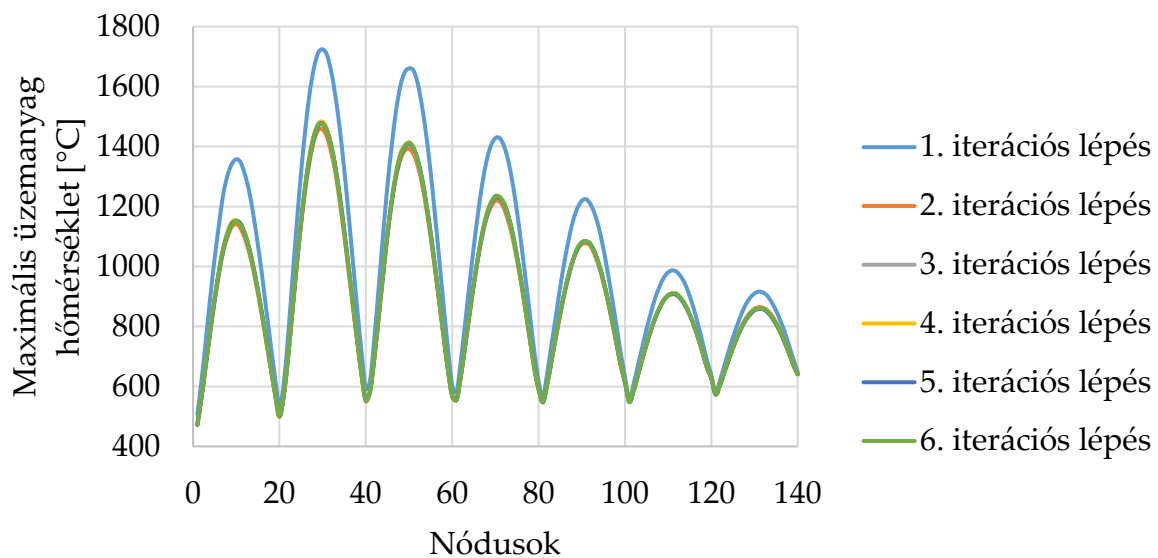
31. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban



32. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása a forró kazettákban

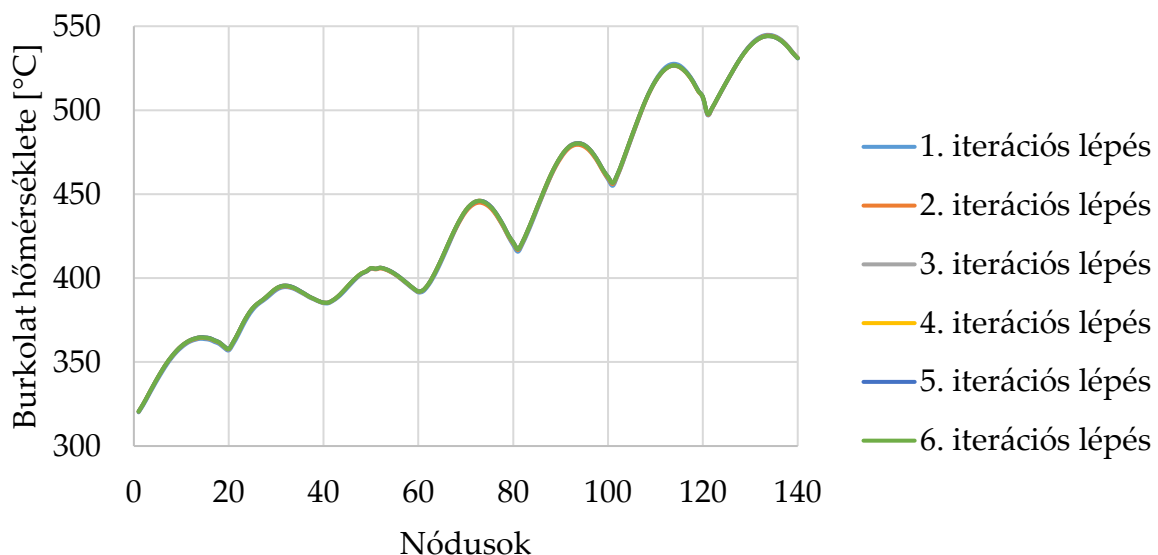


33. diagram: Üzemanyag átlagos hőmérsékletének változása a hideg kazettákban

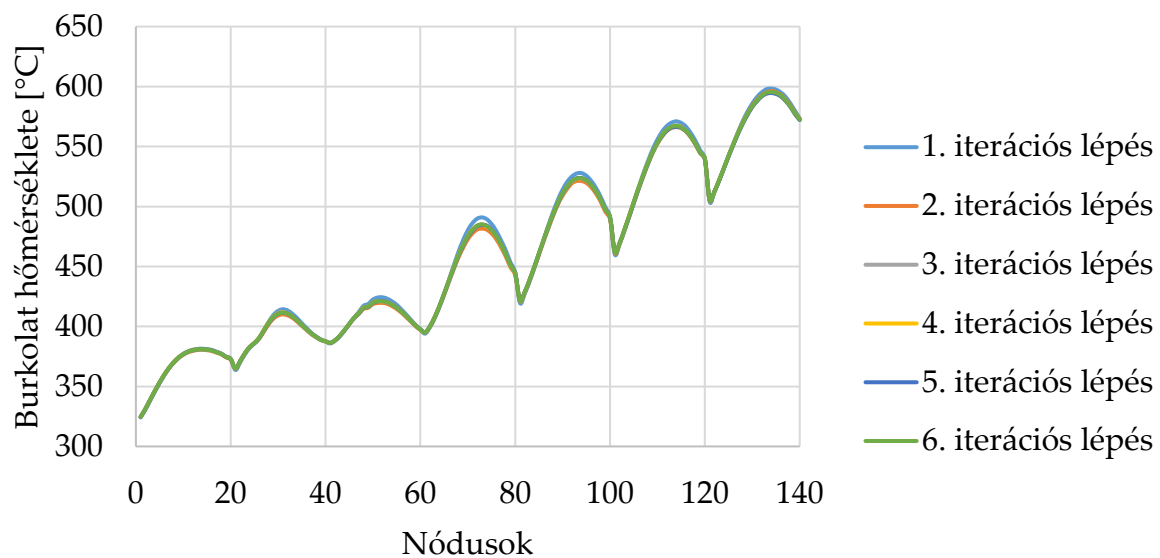


34. diagram: Üzemanyag maximális hőmérsékletének változása

A 31-33. diagramokon az átlagos, a forró, valamint a hideg kazettákra vonatkozó átlagos üzemanyag-hőmérséklet eloszlásokat ábrázoltam. A 34. diagramon a maximális üzemanyag-hőmérséklet látható. Mind a négy esetben azt tapasztaltam, hogy az első lépésben nagyon magas hőmérsékletek adódtak, utána a második lépéstől nagyon gyorsan konvergált a számítás egy sokkal alacsonyabb értékhez. Ezt a nagy eltérés a korábbiakhoz hasonlóan most is a kezdeti, nem kielégítően pontos adatok okozták. Az itt kapott maximális hőmérséklet alacsonyabb, mint a RELAP5 által számolt, tehát korlátsértéstől még annál is távolabb vagyunk.



35. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása az átlagos kazettákban



36. diagram: Burkolat hőmérsékletének változása a forró kazettákban

A 35. diagramon ábrázoltam a burkolathőmérsékletet az átlagos, míg a 36. diagramon a forró kazettában. A gyors konvergencia itt is megtörtént, azonban a maximális érték magasabb, mint a RELAP5 által meghatározott. Ez azonban nem jelent problémát, hiszen ebben az esetben sem haladja meg az elérni kívánt célt.

Az eredmények megtekintéséből látszik, hogy az iteráció ebben az esetben is a harmadik lépésre konvergált, onnantól kezdve már csak nagyon kismértékben változnak az eredmények. A pontos értékek minimumát és maximumát a 2. mellékletben lehet megtekinteni. A nulladik és az első iterációs lépések között az üzemanyag-hőmérsékletekben van egy ugrás, de az betudható annak, hogy a nulladik lépésben nem lehetett tudni a kialakuló teljesítményeloszlást, így a RELAP5-tel történő iteráció kezdeti értékeiről indult a számítás. A harmadik lépést követően két egymást követő iterációs lépés között mérhető különbség a Serpent 2 egy szigma számítási bizonytalanságán belül van. Ezzel a számításorozattal is sikerült elérnünk a konvergenciát.

6.3. A két számításorozat összehasonlítása

Kijelenthető, hogy mind a két számításorozat során sikerült elérni a konvergenciát, azonban nem pontosan ugyanahhoz az értékhez konvergáltak a számítások. Mivel a RELAP5 modell kétcsatornás, az Apros modell meg három, ezért az Apros átlagos hőmérsékletű kazettáiba nem kerül bele az öt leghidegebb kazetta hőmérséklete, ezért az Apros-szal történő iteráció során kapott átlagos hőmérsékletek valamivel magasabbak. A hűtőközeg- és moderátor-hőmérsékletek valamivel magasabbnak adódtak a forró kazettákon kívül is az Apros számítás esetében. Ez erősebb negatív reaktivitás visszacsatolást eredményez, aminek következtében az Apros-szal történő csatolás során kapott effektív sokszorozási tényező értéke a RELAP5-tel való csatolás során kapottakhoz képest megközelítőleg 100 pcm-mel kisebb.

Ezt az eltérést a kódok és modellek közötti eltérések együttesen okozzák. A reaktorkonceptió szempontjából a legfontosabb a számítások során meghatározott paraméterek a szintenkénti maximális üzemanyag hőmérsékletek, valamint burkolat- és hűtőközeg hőmérsékletek a forró kazettákban, illetve az effektív sokszorozási tényező. A két számítássorozat során kapott értékek összehasonlítását a 9. táblázat tartalmazza.

9. táblázat: A két számítássorozat fontosabb eredményeinek összehasonlítása

		1. szint	2. szint	3. szint	4. szint	5. szint	6. szint	7. szint
RELAP5 - Serpent 2	$T_{üa,max}$ [°C]	1182	1514	1410	1209	1069	890	832
	$T_{b,max}$ [°C]	387	418	416	474	518	559	585
	$T_{h,max}$ [°C]	349	382	389	409	446	490	518
	k_{eff} [-]	1,23329						
Apros - Serpent 2	$T_{üa,max}$ [°C]	1152	1475	1413	1235	1085	911	859
	$T_{b,max}$ [°C]	381	411	421	485	524	567	595
	$T_{h,max}$ [°C]	352	382	388	409	446	491	520
	k_{eff} [-]	1,23234						

A 9. táblázatban látható, hogy az első két felmelegedési szinten a burkolatra és az üzemanyagra a RELAP5 számolt magasabb hőmérsékleteket, míg a felső öt szinten az Apros. Emiatt kijelenthető, hogy az eddigiekkel összhangban az Apros számol általában magasabb hőmérsékletértékeket. Ez negatív visszacsatolásokat okoz az üzemanyagban, ami a moderátorra és hűtőközegre vonatkozó reaktivitás visszacsatolásokkal összhangban magyarázza a valamivel kisebb effektív sokszorozási tényező értéket. Összességében azonban elmondható, hogy ugyan nem egyeznek meg tökéletesen az eredmények, de az eltérés messze nem olyan jelentős, hogy ne legyen betudható a modellek és programok közötti különbségeknek.

7. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS

Dolgozatom célja a Serpent 2, a RELAP5 és az Apros programok felhasználásával csatolt számítások futtatása volt az SCW-SMR reaktorkonceptióra, hogy a reaktorban kialakuló hőmérséklet-, sűrűség- és teljesítményeloszlásokról pontosabb képet kapjak. Ehhez először ismertettem a felhasznált kódok felépítését, felhasználásuk előnyeit és korlátait. Ezt követően részletesen bemutatam a modellezni kívánt reaktorkonceptió felépítését. A kezdeti tervekben szereplő paraméterek azonban nem voltak alkalmasak a célokban meghatározott reaktivitástartálék, illetve teljesítményeloszlás elérésére, így egy zónaoptimalizáció elvégzése elengedhetetlen volt. Miután bemutatam ezen számítások eredményeit és az ezek következtében a konceptió kialakításán eszközölt változtatásokat, már semmi akadálya nem volt a számítássorozathoz használt modellek ismertetésének.

Dolgozatomban részletesen bemutatam a két rendszerkódban (Apros és RELAP5) készült modelleket, valamint a hozzájuk fejlesztett két Serpent 2 modellt is. Ezután következett a számítássorozatok elvégzése, az eredmények összegyűjtése és kiértékelése. Elmondható, hogy mind a két számítássorozat során viszonylag hamar, megközelítőleg három iterációs lépés után sikerült elérni, hogy az eredmények már csak elenyésző mértékben változnak. Minden esetben a két iterációs lépés közötti eltérés (természetesen a harmadik lépést követően) kisebb volt, mint a Serpent 2 egy szigma számítási bizonytalansága. A két számítássorozat eredményei között tapasztalható némi eltérés. Azonban tekintettel a zónában fel lépő szuperkritikus állapotra, a két rendszerkód különböző felépítésére, és a modellezett SCW-SMR reaktorkonceptió bonyolultságára az egyezés így nagyon jónak mondható. A jó egyezés annak köszönhető, hogy a rendszerkódokkal készült modellek fejlesztői a modellezés során törekedtek a hasonló mélységű modellezésre és nodalizációra. Mindezek mellett fontos megjegyezni azt is, hogy a Serpent 2 inputjaként megadott hőmérsékletértékek a RELAP5-tel történő csatolás során csak az átlagos, illetve a forró kazettákra kerültek meghatározásra, míg az Apros-szal történő csatolás esetén minden kazettára külön-külön egy interpoláció segítségével. Ez szintén okozhat eltérést az eredményekben.

A számítássorozatok folytatására, illetve újak elvégzésére még számos lehetőség van. Egyrészt jelenleg is folyik a Pisai Egyetemen a RELAP5 modell fejlesztése, amelynek fő célja a tartályon belüli hőterjedési folyamatok pontosabb és teljeskörű figyelembevétele. Emellett az Apros modell is fejlesztés, pontosítás, átalakítás alatt áll. A Serpent 2 modell csak a reaktorkosáron belüli részt modellezi, logikus lépés ezt kiegészíteni az azon kívüli részekkel, hogy pontosabban figyelembe tudjuk venni a reaktor szerkezeti elemeit reaktorfizikai szempontból is. A Serpent 2 modellem alkalmassá tehető pálcaszintű teljesítményeloszlások meghatározására is. Ezzel a módosítással lehetőségünk nyílna a pálcák közötti teljesítmény-egyenlőségekre következtetni, az egyenlőtlenségi tényezőket meghatározni. Amennyiben ezek a fejlesztések sikeresen megvalósulnak, lehetőség nyílik további, még pontosabb számítások elvégzésére, melyek segítségével még precízebb képet kaphatunk az SCW-SMR reaktorban tapasztalható eloszlásokról.

Terveim között szerepel ennek a dolgozatnak a kiegészítése egy diplomamunkává. Ennek keretein belül szeretném, ha a pontosított és kiegészített RELAP5, Apros és Serpent 2 modellekkel tudnék újabb, precízebb számításokat elvégezni, illetőleg szervesen bekapcsolódni a termohidraulikai munkacsoport tevékenységeibe, és modelleket építeni a rendszerkódok (elsősorban Apros) felhasználásával, amikkel aztán lehetőségem nyílna további csatolt számítások elvégzésére.

8. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] David Henry Doyle: A Short Guide to the EU's Taxonomy Regulation, S&P Global, 2021.05.12., [Link](#), (2022.10.30.)
- [2] Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union: EU taxonomy: Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonisation, European Commission, 2022.06.11., [Link](#), (2022.10.30.)
- [3] Serpent: Serpent, a Continuous-energy Monte Carlo neutron and photon transport code, Serpent weboldal, [Link](#), (2022.10.30.)
- [4] IBM Cloud Education: Monte Carlo Simulation, IBM, 2020.08.24., [Link](#), (2022.10.30.)
- [5] Idaho National Laboratory: About RELAP5-3D, [Link](#), (2022.10.30.)
- [6] C. D. Fletcher, R. R. Schultz: RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG/CR-5535 INEL-95/0174 Vol. 5, Rev. 1, 1995.08., [Link](#), (2022.10.30.)
- [7] Apros: Welcome to Apros, Apros weboldal, [Link](#), (2022.10.30.)
- [8] BME NTI: APROS6 laboratóriumi gyakorlatok 1. Ismerkedés az APROS programmal, Mérési útmutató, 2017.08.08.
- [9] LibreTexts Chemistry: Phase Diagrams, LibreTexts Chemistry weboldal, 2019.06.05., [Link](#), (2022.10.30.)
- [10] T. Schulenberg et. al.: Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR) Development through GIF Collaboration, IAEA-CN-164-5S06, [Link](#), (2022.10.30.)
- [11] Arthur T. Motta: Zirconium alloys for supercritical water reactor applications: Challenges and possibilities, Journal of Nuclear Materials, Volume 371, Issues 1-3, 2007.05.22, 61-75 oldalak, [Link](#), (2022.10.30.)
- [12] Nuclear Power: Pseudocritical line – Pseudocritical points, Nuclear Power weboldal, [Link](#), (2022.10.30.)
- [13] Gen IV International Forum: Welcome to Generation IV International Forum, gen-4 weboldal, [Link](#), (2022.10.30.)
- [14] Energy Education: Supercritical water cooled reactor, Energy education weboldal, [Link](#), (2022.10.30.)
- [15] Thomas Schulenberg, Jörg Starfinger: High performance light water reactor, design and analyses, KIT Scientific Publishing, 2012, [Link](#), (2022.10.30.)
- [16] T. Schulenberg and I. Otic: Suggestion for Design of a Small Modular SCWR. Proceedings of the 10th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors (ISSCWR10), Prague, Czech Republic, Mar. 15-19, 2021, Paper No. ISSCWR10-019.
- [17] Prof. Dr. Aszódi Attila, Boros Ildikó: Atomerőművek felépítése, tervezése 2. rész, BME NTI, 2020.02.20.
- [18] Y. I. Chang et. al.: Small modular fast reactor design description, ANL, CEA, JNC, 2005.07.01., [Link](#), (2022.10.30.)

- [19] Joanne Liou: What are Small Modular Reactors (SMRs)?, IAEA Office of Public Information and Communication, 2021.11.04., [Link](#), (2022.10.30.)
- [20] WP4 Representatives: ECC SMART WP4 Reactor Physics calculations, Summary of 1st year, 2021.09.20.
- [21] T. Schulenberg and I. Otic: Conceptual design of structures around the reactor core, KIT 2021.11.03
- [22] Antók Csenge et. al.: Core design of the SCW-SMR with Monte Carlo based neutronic calculations, Abstract, előkészületben lévő folyóiratcikk, (2022. szeptemberi állapot)
- [23] Varju Tamás, Dr. Kiss Attila: Az SCW-SMR zónakoncepció Apros és CFD modellezése, MNT Szimpózium, Budapest, 2022.09.30.
- [24] Varju Tamás e-mailen keresztül történő adatátadása, 2022.10.26.
- [25] Prof. Walter Ambrosini e-mailen keresztül történő adatátadása, 2022.08.18.
- [26] VGF & HKL szaklap: A paksi atomerőmű I., vgf&hkl weboldal, 2001, [Link](#), (2022.10.30.)

9. FÜGGELÉK

1. melléklet: A RELAP5-Serpent 2 számítások iterációs lépései között tapasztalt hőmérséklet- és sűrűségérték-különbségek szélsőértékei

Régió		Iterációs lépések közötti hőmérsékletbeli eltérések szélsőértékei [%]						
		1-2.	2-3.	3-3D	3D-4Dk	4Dk-5Dk	5Dk-6D	6D-7D
Átlagos hűtőközeg	max	1,231%	0,000%	0,000%	0,000%	0,008%	0,023%	0,016%
	min	0,000%	-0,117%	0,000%	-0,188%	-0,010%	-0,014%	-0,030%
Forró hűtőközeg	max	1,246%	0,045%	0,000%	0,054%	0,048%	0,036%	0,038%
	min	-0,660%	-0,107%	0,000%	-0,318%	-0,025%	-0,050%	-0,035%
Átlagos moderátor	max	0,181%	-0,004%	0,000%	-0,008%	0,000%	0,003%	0,000%
	min	0,045%	-0,016%	0,000%	-0,027%	0,000%	0,001%	-0,002%
Forró moderátor	max	0,184%	-0,004%	0,000%	-0,008%	0,002%	0,003%	0,001%
	min	0,052%	-0,014%	0,000%	-0,032%	-0,001%	-0,001%	-0,002%
Átlagos üzemanyag	max	3,413%	0,141%	14,117%	0,275%	0,174%	0,309%	0,198%
	min	-1,171%	-0,418%	0,864%	-0,593%	-0,204%	-0,196%	-0,254%
Forró üzemanyag	max	3,346%	0,395%	16,696%	0,518%	0,492%	0,492%	0,557%
	min	-2,723%	-0,460%	1,464%	-1,277%	-0,420%	-0,487%	-0,380%
Maximum üzemanyag	max	4,922%	0,722%	0,000%	0,743%	0,631%	0,665%	0,714%
	min	-4,414%	-0,736%	0,000%	-1,632%	-0,547%	-0,658%	-0,496%
Átlagos burkolat	max	1,230%	0,038%	0,000%	0,072%	0,030%	0,042%	0,034%
	min	-0,266%	-0,138%	0,000%	-0,190%	-0,030%	-0,031%	-0,060%
Forró burkolat	max	1,342%	0,136%	0,000%	0,157%	0,136%	0,107%	0,123%
	min	-1,215%	-0,151%	0,000%	-0,519%	-0,102%	-0,141%	-0,102%
Régió		Iterációs lépések közötti sűrűségbeli eltérések szélsőértékei [%]						
		1-2.	2-3.	3-3D	3D-4Dk	4Dk-5Dk	5Dk-6D	6D-7D
Átlagos hűtőközeg	max	0,000%	0,590%	0,000%	0,829%	0,036%	0,024%	0,086%
	min	-6,238%	0,000%	0,000%	0,000%	-0,055%	-0,120%	-0,039%
Forró hűtőközeg	max	0,844%	0,576%	0,000%	1,366%	0,198%	0,412%	0,131%
	min	-6,042%	-0,100%	0,000%	-0,069%	-0,364%	-0,208%	-0,436%
Átlagos moderátor	max	-0,031%	0,013%	0,000%	0,021%	0,000%	0,000%	0,002%
	min	-0,266%	0,003%	0,000%	0,005%	0,000%	-0,002%	0,000%
Forró moderátor	max	-0,031%	0,011%	0,000%	0,025%	0,001%	0,001%	0,002%
	min	-0,141%	0,003%	0,000%	0,005%	-0,001%	-0,002%	-0,001%

2. melléklet: Az Apros-Serpent 2 számítások iterációs lépései között tapasztalt hőmérséklet- és sűrűségérték-különbségek szélsőértékei

Régió		Iterációs lépések közötti hőmérsékletbeli eltérések szélsőértékei [%]				
		1-2.	2-3.	3-4.	4-5.	5-6.
Átlagos hűtőközeg	max	0,213%	0,193%	0,024%	0,009%	0,004%
	min	-0,090%	-0,017%	-0,005%	-0,019%	-0,028%

Forró hűtő- közeg	max	0,155%	0,316%	0,048%	0,015%	0,075%
	min	-0,525%	-0,112%	-0,011%	-0,067%	-0,025%
Hideg hű- tőközeg	max	0,436%	0,191%	0,012%	0,020%	0,004%
	min	-0,083%	-0,017%	-0,015%	-0,009%	-0,036%
Átlagos moderátor	max	0,020%	0,027%	0,005%	0,001%	0,000%
	min	-0,010%	0,007%	0,003%	0,000%	-0,002%
Forró mo- derátor	max	0,011%	0,031%	0,006%	0,001%	0,004%
	min	-0,022%	0,007%	0,003%	-0,003%	-0,002%
Hideg mo- derátor	max	0,032%	0,026%	0,004%	0,002%	0,000%
	min	-0,008%	0,007%	0,002%	0,000%	-0,003%
Átlagos üzemanyag	max	-0,743%	0,652%	0,240%	0,380%	0,295%
	min	-15,781%	-0,330%	-0,241%	-0,321%	-0,356%
Forró üzemanyag	max	-1,214%	1,451%	0,497%	0,625%	0,442%
	min	-18,633%	-0,595%	-0,395%	-0,667%	-0,469%
Hideg üzemanyag	max	-0,286%	0,189%	0,230%	0,421%	0,185%
	min	-9,033%	-0,463%	-0,210%	-0,268%	-0,355%
Maximum üzemanyag	max	-0,874%	1,776%	0,700%	0,906%	0,614%
	min	-17,081%	-0,825%	-0,550%	-0,835%	-0,683%
Átlagos burkolat	max	0,316%	0,260%	0,064%	0,048%	0,035%
	min	-0,270%	-0,091%	-0,049%	-0,057%	-0,077%
Forró bur- kolat	max	0,317%	0,725%	0,174%	0,129%	0,167%
	min	-1,896%	-0,258%	-0,117%	-0,188%	-0,093%
Régió		Iterációs lépések közötti sűrűségbeli eltérések szélsőértékei [%]				
		1-2.	2-3.	3-4.	4-5.	5-6.
Átlagos hű- tőközeg	max	0,166%	0,026%	0,008%	0,079%	0,168%
	min	-1,759%	-0,700%	-0,063%	-0,059%	-0,005%
Forró hűtő- közeg	max	1,867%	0,159%	0,042%	0,233%	0,155%
	min	-1,191%	-1,318%	-0,176%	-0,039%	-0,103%
Hideg hű- tőközeg	max	0,151%	0,026%	0,019%	0,059%	0,290%
	min	-2,805%	-0,700%	-0,056%	-0,073%	-0,005%
Átlagos moderátor	max	0,010%	-0,005%	-0,002%	0,000%	0,002%
	min	-0,016%	-0,023%	-0,004%	-0,001%	0,000%
Forró mo- derátor	max	0,022%	-0,005%	-0,002%	0,003%	0,001%
	min	-0,009%	-0,026%	-0,005%	-0,001%	-0,004%
Hideg mo- derátor	max	0,008%	-0,004%	-0,002%	0,000%	0,003%
	min	-0,026%	-0,024%	-0,003%	-0,002%	0,000%