

# REAKTORTARTÁLY TERMIKUS SOKKBÓL SZÁRMAZÓ FESZÜLTSEGEINEK VÉGESELEM MÓDSZERREL TÖRTÉNŐ ELEMZÉSE

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF PRESSURIZED THERMAL SHOCK INDUCED STRESSES IN A REACTOR PRESSURE VESSEL

Spisák Bernadett\*, Szávai Szabolcs\*\*

### ABSTRACT

The APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock (PTS) Analysis for Long-Term Operation (LTO)) project was launched in October 2020 for four years with funding from the European Union's HORIZON 2020 program. This project contains 7 work packages (WP), the article introduces some of the results from WP3 where structural calculations for the determination of strain, stress and temperature in the RPV wall were carried out for a selected reference case.

### 1. BEVEZETÉS

Az APAL projekt fő célkitűzései egy korszerű valószínűségi számítási módszer kifejlesztése a nyomás alatt lévő termikus sokk értékelésére, a hosszú távú üzemeltetés javítására szolgáló biztonsági tartalékok számszerűsítése és a legjobb gyakorlatra vonatkozó útmutatás kidolgozása. A projekt a reaktortartályok (RPV) biztonsági értékelésével kapcsolatos multidiszciplináris és multifizikai kihívásokkal foglalkozik a termikus sokk (PTS) enyhítése tekintetében. Az e célok elérése érdekében öt technikai munkacsoport (WP) került kialakításra:

- WP1: kiterjedt szakirodalmi áttekintés és tapasztalatgyűjtés, célja az LTO-fejlesztések (hardver és szoftver) jelenlegi állásának azonosítása, amelyek kedvező vagy kedvezőtlen hatással lehetnek a PTS-elemzés eredményeire.
- WP2: termohidraulikai (TH) értékelés. Az LTO-fejlesztések és az emberi tényező TH vizsgálatra gyakorolt hatásának számszerűsítése, majd a későbbi szerkezeti és törésmechanikai benchmarkok (WP3 és WP4) segítségével értékelése.
- WP3: determinisztikus szerkezeti és törésmechanikai elemzések, célja az LTO-fejlesztésekhez kapcsolódó biztonsági tartalékok és a TH-elemzés bizonytalanságainak számszerűsítése.

- WP4: valószínűségi törésmechanikai elemzésen alapuló valószínűségi határértékelés. Ez lehetővé teszi a biztonsági tartalékok számszerűsítését a meghibásodás kockázatának szempontjából.
- WP5: az elvégzett munkából származó ajánlások és következtetések összegyűjtése a legjobb hosszútávú üzemeltetés korszerű PTS-elemzési módszereinek meghatározásához.

Jelen cikk a hármas munkacsoportban végzett feladatok és eredmények egy kis részét foglalja magába. A termohidraulikai vizsgálatok elvégzését követően a következő lépés a numerikus (pl. végeselemes) számítások voltak, amelyek segítségével a feszültség és a hőmérséklet eloszlások meghatározhatók a reaktortartály falában, és felhasználhatók a törésmechanikai értékeléshez. Azonban ennek eléréséhez szükséges a TH adatok megfelelő átvihetőségének a meghatározása, mivel a determinisztikus vizsgálatok nagy része 1D vagy tengelyszimmetrikus modell segítségével kerülnek megvalósításra. A következőkben a WP2-ben meghatározott TH terhelések végeselem modellre történő implementálása kerül bemutatásra.

### 2. A MODELL FELÉPÍTÉSE

A számításokat egy 4870 mm belső átmérőjű és 249 mm falvastagságú reaktortartályon végeztük el. A nyomástartó edény falán egy 6 mm vastag bevonat helyezkedik el. A szimulációk MSC.Marc Mentat végeselem szoftverben kerültek megoldásra.

#### 2.1. Anyagtulajdonságok

Az alapanyag 22NiMoCr37 ferrites acélból, míg a bevonat 1.4551 ausztenites korrózióálló acélból készült. Ezek releváns hőmérsékletfüggő tulajdonságait az 1. és 2. táblázat mutatja be. A szimulációk során lineárisan rugalmas anyagmodell lett alkalmazva.

\* tanársegéd, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, tudományos munkatárs, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

\*\* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet, osztályvezető, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

1. táblázat Az alapfém (22NiMoCr37) anyagi jellemzői [1]

T [°C]	20	100	200	300	350
Rugalmassági modulus [GPa]	206	199	190	181	172
Poisson tényező	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Hővezetőképesség [W/(m·K)]	44,4	44,4	43,2	41,8	39,4
Fajhő [J/(g·K)]	0,45	0,49	0,52	0,56	0,61
Hőtágulási tényező [10 <sup>-6</sup> /K]	10,3	11,1	12,1	12,9	13,5

2. táblázat Az ausztenites bevonat (1.4551) anyagi jellemzői [1]

T [°C]	20	100	200	300	400
Rugalmassági modulus [GPa]	200	194	186	179	172
Poisson tényező	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Hővezetőképesség [W/(m·K)]	16	16	17	17	17
Fajhő [J/(g·K)]	0,5	0,5	0,54	0,54	0,59
Hőtágulási tényező [10 <sup>-6</sup> /K]	15	16	17	19	21

## 2.2. Terhelések

A reaktortartályra gyakorolt termikus terhelések a RELAP5 kódban [1] végzett szimulációkból származnak, amely a vízhűtéses atomerőművekben és a kapcsolódó rendszerekben bekövetkező transziensek és balesetek elemzésére, valamint a korszerű reaktortervek elemzésére használható. Azonban annak érdekében, hogy ezek alkalmazhatók legyenek egy tengelyszimmetrikus modellben, egyszerűsítések kerültek bevezetésre. Ezáltal úgynevezett 0D/1D/2D TH adatokat generáltunk, amelyeket a 3. táblázat részletez. A 0D a TH adatok magasság és kerület menti átlagolását, az 1D az adott magasságnál a kerület menti átlagolását, míg a 2D az adatok egzakt pontból való kinyerését jelölik. A számítások során a reaktortartályon található két körvarratnál ébredő feszültségek meghatározása volt a cél, mivel ezek képezik a tartály leggyengébb pontjait. Ezáltal a hét verzióból három a magvarratra (CW) három pedig a peremnél található varratra (FW) vonatkozik.

A generált TH bemenetek és a magasságok eloszlásának jobb megértése érdekében a 4. táblázat és 2. ábra felső része a be- és kimeneti csomók elhelyezkedését mutatja be. A 2. ábra alsó fele a reaktor csomóponti elrendezését, az 5. táblázat pedig a létrehozott térfogatok magasságát szemlélteti. A

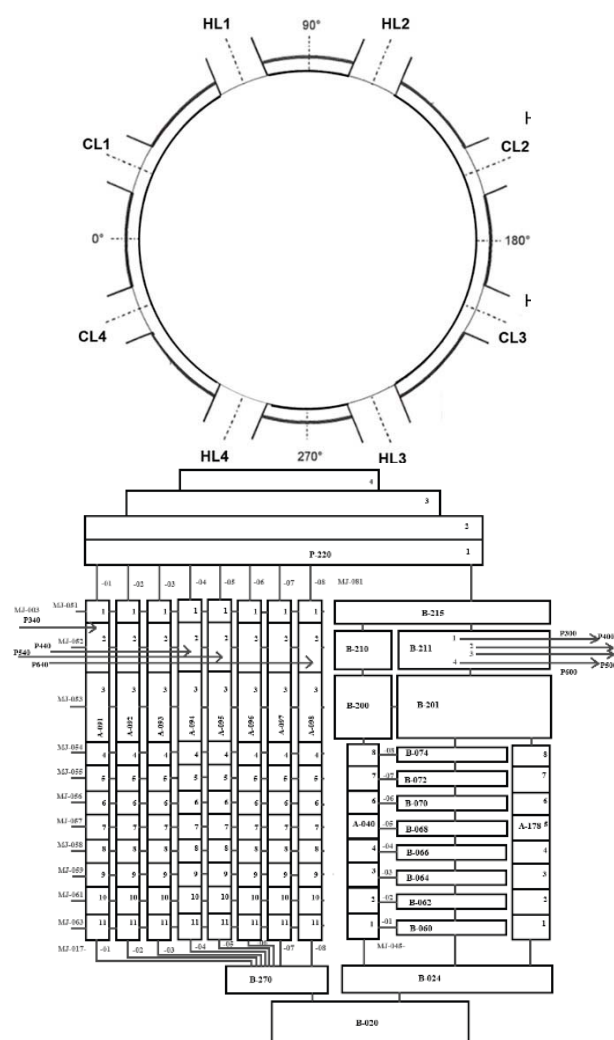
kiválasztott ágakat és térfogatokat szürke színnel jelöltük a táblázatokban.

Ezeket az átlagolásokat mind a folyadék hőmérsékletére, mind a hőátadási tényezőkre elkészítettük, amelyeket később a szimulációkba implementáltunk.

3. táblázat RELAP5 adat variációk [1]

Elnevezések	RELAP5 adat helye	
	Magasság	Kerületi szög
0D – átlag	átlag	átlag
1D – CW	2638 mm (V05)	átlag
2D – CW/CL	2638 mm (V05)	202,5° (CL3)
2D – CW/ambient	2638 mm (V05)	337,5° (CL4)
1D – FW	1130 mm (V03)	átlag
2D – FW/CL	1130 mm (V03)	202,5° (CL3)
2D – FW/ambient	1130 mm (V03)	337,5° (CL4)

\*CW: magvarrat, CL: hidegág FW: peremvarrat



2. ábra A reaktor nodalizálása [1]

4. táblázat Be- és kimenő ágak orientációja

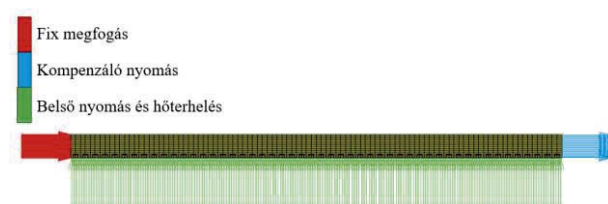
Csonk	CL1	HL1	HL2	CL2	CL3	HL4	HL4	CL4
Kerületi szög	22,5°	67,5°	112,5°	157,5°	202,5°	247,5°	292,5°	337,5°

5. táblázat DC térfogatok magassága

Térfogat	V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07	V08	V09	V10	V11
Magasság	+0,5725	0,0	-1,13	-2,083	-2,638	-3,3215	-3,9745	-4,6275	-5,2809	-5,9335	-6,5155

A reaktortartály külső oldalát adiabatikusnak feltételeztük, itt a külső nyomást 0 MPa-nak vettük fel. Továbbá a belső oldalon egy időben változó nyomást helyeztünk el, amelyet hasonlóan a termikus adatokhoz a RELAP5 kód biztosított. Végezetül a fal végén jelen lévő, tengelyirányú feszültség figyelembevételéhez az egyik végére felkerült a belső nyomásból származó kompenzáló nyomás, a másikra pedig egy megfogás (3. ábra).

A számítások során a bevonatban jelen lévő maradót feszültségeket a kezdeti tranziens hőmérséklet megadásával lehet figyelembe venni, amely 291,042°C. Az 1. és 2. táblázatban szereplő adatok referencia hőmérséklete 20°C, ezáltal ennek az átváltása szükséges volt.



3. ábra Terhelések

Annak érdekében, hogy a két varratnál a feszültség profilok ellenőrizhetőek legyenek 3D-s szimulációkat is készítettünk, melynek során a belső falon az egyes esetekben származó adatok kerültek elhelyezésre, így vizsgálhatóak voltak a geometria hatások. A 3D modellt a 4. ábra szemlélteti.

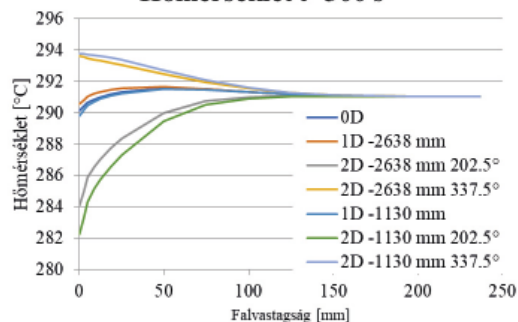


4. ábra 3D modell

### 3. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

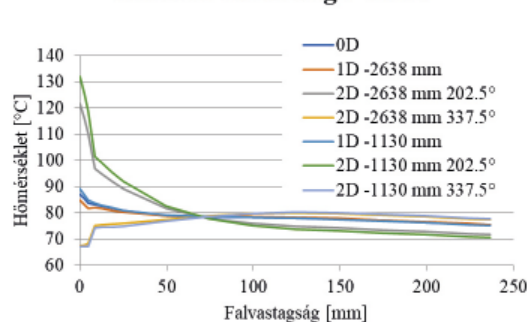
A munkacsomagban az első lépés a 3. táblázatban bemutatott esetek közül a legrosszabb, vagyis a legnagyobb feszültségekkel járó egyszerűsítés kiválasztása volt. Az 5. és 6. ábra a hét verzió esetén kapott hőmérséklet, illetve kerületi feszültség eloszlást szemlélteti 300 s-nél. Az eredményekből megállapítható, hogy a teljes átlagolás (0D eset) és az adott magasságnál a kerületi irányú átlagolás (1D TH adatok) során a hőmérséklet és a feszültségprofilok jelentősen eltérnek az adott pontban jelen lévő terhelésekből származóktól. Továbbá látható, hogy a legnagyobb feszültségekkel a 202,5°-os kerületi szögnél kivett adatok rendelkeznek mind a CW mind a FW esetében.

Hőmérséklet t=300 s



5. ábra A hét vizsgált eset fal menti hőmérséklet eloszlása 300 másodpercnél

Kerületi feszültség t=300 s

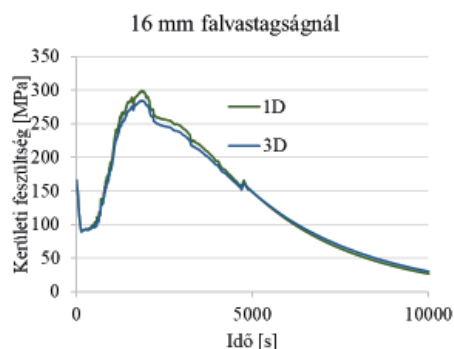


6. ábra A hét vizsgált eset fal menti kerületi feszültség eloszlása 300 másodpercnél

A következő lépés a geometriai hatások vizsgálata volt, amelynek során a tengelyszimmetrikus és a 3D modellekből származó eredmények kerültek

összehasonlításra. A CW-re vonatkozó, időben változó feszültségeloszlásokat a 7. ábra, míg a FW-re vonatkozókat a 8. ábra szemlélteti a reaktortartály belső sugarától 16 mm-re. Ez a távolság a későbbiekben vizsgált repedések repedéscsúcsát jelöli.

A 7. ábrából jól látható, hogy a két szimuláció között csak egy kis mértékű eltérés tapasztalható, továbbá az egyszerűsített modell a biztonság irányába téved, így kijelenthető, hogy a tengelyszimmetrikus kialakítás a feszültségek meghatározásához jól alkalmazható.



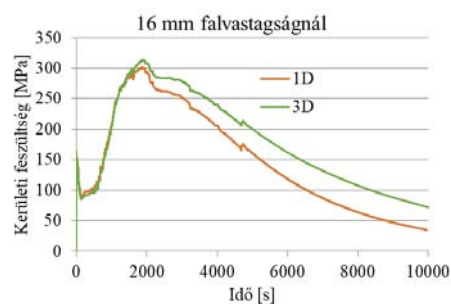
7. ábra Geometriai hatás vizsgálata a CW esetében

Ezzel ellentétben a peremnél lévő varratnál jelentős mértékben eltér a tengelyszimmetrikus és a 3D-s szimulációból származó eredmény. A szimuláció első 2000 másodpercében még együtt halad a két görbe, azonban a maximum elérését követően a kettő közötti különbség egyre nagyobb. Mivel a kettő között csak és kizárólag a geometria eltérő, ezáltal az egyszerűsítés ilyen formában nem alkalmazható, mivel a keletkező feszültségeket alul becsüli. Ehhez hasonlóan a 9. ábra a 10 000 másodpercnél lévő feszültségeloszlás jól szemlélteti a geometriai kialakításból származó eltéréseket.

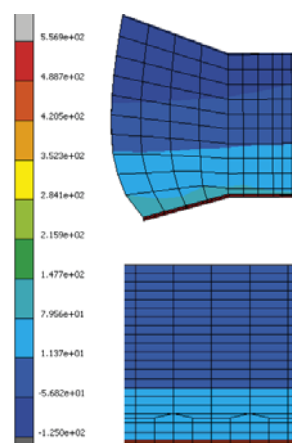
#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk az APAL projekt hármaskörében végzett feladatok egy töredékét részletezi, amelynek során meghatározásra került, hogy a termohidraulikai adatok milyen módon vehetők figyelembe tengelyszimmetrikus szimuláció során. Továbbá a reaktortartályon található két körvarrat esetében a 3D-s szimulációk bebizonyították, hogy a CW-nél a geometria egyszerűsítések nem befolyásolják nagy mértékben az eredményeket, azonban a FW-nél a geometria hatása számszerűsíthetően érvényesül, így ennek a tengelyszimmetrikus modellezéssel történő egyszerűsítése további vizsgálatokat igényel.

A projekt következő szakaszában az előzőekben bemutatott módszer segítségével meghatározott feszültség és hőmérséklet eloszlások kerülnek felhasználásra adott kialakítású repedéseknél keletkező feszültségintenzitási tényezők meghatározásához.



8. ábra Feszültségmező összehasonlítása



9. ábra Geometriai hatás vizsgálata a FW esetében

#### 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott munka a NUGENIA által jóváhagyott APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock Analysis for Long-Term Operation) projekt részeként készült. Az APAL az Euratom 2019-2020-as kutatási és képzési programjából kapott támogatást a 945253 számú támogatási megállapodás keretében.

#### 6. ACKNOWLEDGMENTS



The presented work has been performed as a part of APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock Analysis for Long-Term Operation) project which was approved by NUGENIA. APAL has received funding from the Euratom research and training programme 2019 - 2020 under grant agreement No 945253.

#### 7. IRODALOM

- [1] <https://relap53d.inl.gov/SitePages/Home.aspx> (Letöltés ideje: 2022.10.10.)
- [2] APAL. Deliverable No. 3.2 "Benchmark definition" (restricted)