

Érzékenységi vizsgálat a reaktortartályban fellépő termikus sokk okozta feszültségekre végeelem analízis segítségével

Sensitivity analysis of stresses caused by pressurized thermal shock in a reactor pressure vessel using finite element analysis

KISS László¹, SPISÁK Bernadett²

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Mérnöki Divízió H-3519 Miskolc, Iglói út 2.

e-mail:

laszlo.kiss@bayzoltan.hu

bernadett.spisak@bayzoltan.hu

Abstract

The main objectives of the APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock (PTS) Analysis for Long-Term Operation (LTO)) project are to develop an advanced probabilistic assessment method for Pressurized Thermal Shock (PTS), to quantify the safety margins required to improve Long-Term Operation (LTO) and to develop best practice guidance. The first key step in a PTS analysis is a thermohydraulic (TH) assessment to determine the time-varying temperature and pressure distributions inside the reactor vessel. In this paper, the implementation of the TH data thus determined in a finite element simulation is presented, whereby the influence of different settings on the stress distribution in the structure is investigated. This includes the investigation of the effect of the data distribution, the thickness of the cladding layer on the device and the time step on the structure.

Keywords: LTO, reactor pressure vessel, PTS, finite element modelling

Kivonat

Az APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock (PTS) Analysis for Long-Term Operation (LTO)) projekt fő célkitűzése a nyomás alatti termikus sokk (PTS - Pressurized Thermal Shock) fejlett valószínűségi értékelési módszerének kifejlesztése, a hosszú távú üzemeltetés (LTO) javításához szükséges biztonsági tartalékok számszerűsítése és a legjobb gyakorlatra vonatkozó útmutatás kidolgozása. Egy PTS elemzés első fő lépése a termohidraulikai (TH) értékelés, amely során meghatározható a reaktortartály belsejében létrejött időben változó hőmérséklet és nyomás eloszlások. A cikkben az így meghatározott TH adatok végeelem szimulációba történő implementálása kerül bemutatásra, amely során megvizsgáltuk, hogy a különböző beállítások hogyan befolyásolják a szerkezetben keletkező feszültségeloszlást. Ez magában foglalja annak vizsgálatát, hogy az adatok eloszlása, a berendezésen elhelyezett plattírréteg vastagsága, illetve az időlépés milyen hatással van a szerkezetre.

Kulcsszavak: LTO, reaktortartály, PTS, végeelemes modellezés

1. BEVEZETÉS

Az atomerőművek megbízható kibocsátásmentes energiaellátást jelentenek, azonban a világszerte üzemelő megközelítőleg 440 reaktor többsége már az eredetileg tervezett élettartamának a második felében jár [1]. A kijelölt klímacélok betartásának érdekében, elengedhetetlen fontosságú a nukleáris létesítmények üzemidő-hosszabbítását lehetővé tevő fejlett vizsgálati módszerek kidolgozása.

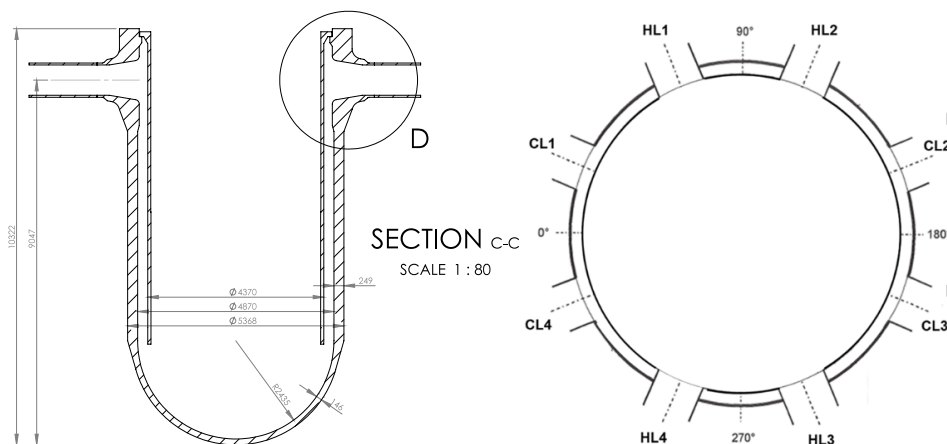
Az öregedéskezeléssel kapcsolatban kijelenthető, hogy a reaktortartály (RPV) szerkezeti integritása az atomerőművek élettartam gazdálkodásának kulcskérdése több okból is. A gyakorlatban ez egy nem cserélhető berendezés, így az üzemideje egybe esik a létesítmény üzemidejével is [2]. Az RPV az elsődleges védelmi gát a radioaktív anyagok környezetbe kerülésével szemben. Az üzemelés során fellépő sugárterhelés következtében az anyag szívósság romlása következik be.

Az APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock (PTS) Analysis for Long-Term Operation (LTO)) projekt fő célkitűzése a nyomás alatti termikus sokk (PTS - Pressurized Thermal Shock) fejlett valószínűségi értékelési módszerének kifejlesztése, a hosszú távú üzemeltetés (LTO) javításához szükséges biztonsági tartalékok számszerűsítése és a legjobb gyakorlatra vonatkozó útmutatás kidolgozása [1]. A PTS olyan esemény, amely során az alapvetően magas nyomáson és hőmérsékleten üzemelő RPV-be hirtelen nagy mennyiségű hideg víz kerül. A vastag falú tartályban ez nagy tranziens hőfeszültségeket eredményez. Új reaktor esetén az anyag törési szívóssága még magas, azonban a neutron besugárzás hatására elrögzedés lép fel, amely súlyos balesetekhez vezethet.

Egy PTS elemzés első fő lépése a termohidraulikai (TH) értékelés, amely során meghatározható a reaktortartály belsejében létrejött időben változó hőmérséklet és nyomás eloszlások. Jelen cikkben a meghatározott TH adatok végeelem szimulációba történő implementálása kerül bemutatásra, amely során megvizsgáltuk, hogy a különböző beállítások hogyan befolyásolják a szerkezetben keletkező feszültségeloszlást. A projektet az Európai Unió Horizont 2020 EURATOM program támogatja.

2. A MODELL BEMUTATÁSA

A vizsgált nyomottvízes reaktor a Siemens/KWU által épített négyhurkú, 1300 MW teljesítményű kialakítás. Az RPV belső átmérője 4870 mm, a falvastagság 249 mm. A szimulációk MSC Marc végeelem szoftver felhasználásával készültek. Az RPV geometriáját és a csatlakozó csonkok elhelyezkedését az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. Az RPV geometriája és a csatlakozó csonkok elhelyezkedése

2.1. Anyagtulajdonságok

A teherviselő rész ferrites szerkezetű 22NiMoCr37 acél, amelyen egy 6 mm vastag korrózióálló ausztenites szerkezetű 1.4551 plattír réteg található. A szimulációk során rugalmas anyagmodell került alkalmazásra. A felhasznált anyagok releváns hőmérsékletfüggő tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.

A hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságok

1. táblázat

	22NiMoCr37 ferrites acél					1.4551 ausztenites plattír réteg				
T [°C]	20	100	200	300	350	20	100	200	300	350
Rugalmassági modulus [GPa]	206	199	190	181	172	200	194	186	179	172
Poisson tényező	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Hővezetőképesség [W/(m·K)]	44,4	44,4	43,2	41,8	39,4	16	16	17	17	17
Fajhő [J/(g·K)]	0,45	0,49	0,52	0,56	0,61	0,5	0,5	0,54	0,54	0,59
Hőtágulási tényező [10 ⁻⁶ /K]	12,78	13,51	14,22	15,01	16,53	18,73	19,90	22,31	24,30	26,29

A táblázatban található hőtágulási tényező értékek a plattírozás feszültségmentes állapotára vonatkozó referencia hőmérsékleten vannak megadva, amely 291,042 °C.

2.2. A peremfeltételek

A szimulációkban alkalmazott TH adatok a projekt egy korábbi fázisában kerültek meghatározásra RELAP5 kód alkalmazásával, amelyből a belső nyomás, a hőmérséklet és a hőátadási tényező időfüggő értékeit használtuk fel a szimulációkban. A program vízhűtéses atomerőművekben és a kapcsolódó rendszerekben bekövetkező tranziensek és balesetek vizsgálatára, valamint a korszerű reaktortervek elemzésére használható[3].

A kapott adatok nem voltak közvetlenül felhasználhatók a tengelyszimmetrikus modellben, ezért egyszerűsítések kerültek bevezetésre. A RELAP5 az 1. ábrán szemléltetett kialakítást magasság irányban 11 szekcióra osztja fel. A kerület mentén 8 részre van osztva középpontban a csonkokkal. Ezt követően a program minden egyes cellára időfüggő TH adatokat generál. Az egyszerűsítések során 0V/1V/2V TH adatok készültek. A 0V esetben a TH adatok a teljes geometriában átlagoltak. Az 1V eset adott magasságnál történő kerület menti átlagolást jelöl. A 2V eset az adatok egzakt pontokból való kinyerését jelöli. A tartály leggyengébb pontjai a két körvarrat környezetében találhatóak (magvarrat (CW), karima varrat (FL)). Az FL a csonkok középvonalától mérve 1350 mm-re van, a CW pedig 2638 mm-re. Ebben a cikkben a CW jelölésű körvarratra készített szimulációk eredményeit mutatjuk be. Jelen publikációban vizsgált 4 szimulációs esetet a 2. táblázat részletezi.

Vizsgált terhelési esetek

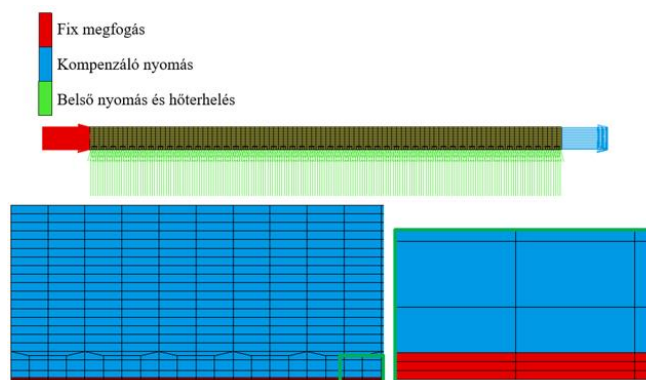
2. táblázat

Elnevezések	Kinyert adat helye	
	Magasság	Kerületi szög
0V	átlag	átlag
1V	2638 mm	átlag
2V-CL3	2638 mm	202,5°
2V-CL4	2638 mm	337,5°

Az összes esetről elmondható, hogy a reaktortartály külső oldala adiabatikusnak tekinthető, ahol a külső túlnyomás 0 MPa. A modell tengelyszimmetrikus. Az egyszerűsített geometria érdekében az edényfenék hatását kompenzáló nyomás segítségével vettük figyelembe, amely a belső nyomás alapján az alábbi módon határozható meg:

$$P_{\text{kompenzáló}} = \frac{1}{\left(\frac{d_{\text{külső}}^2}{d_{\text{belső}}^2} - 1\right)} P_{\text{belső}} \quad (1)$$

A végesselemes háló 3 elemet tartalmaz a plattírozás vastagsága mentén és 20 elemet az alapfém vastagsága mentén. A modell összesen 9748 csomópontból és 3000 kvadratikus elemből áll. Az időlépés értéke a projekt egyik korábbi munkacsoportjában lett meghatározva. A szimulációk 10 000 s időtartamúak. Az alkalmazott peremfeltételeket és a végesselemes hálót a 2. ábra mutatja be (90 fokkal elforgatva).

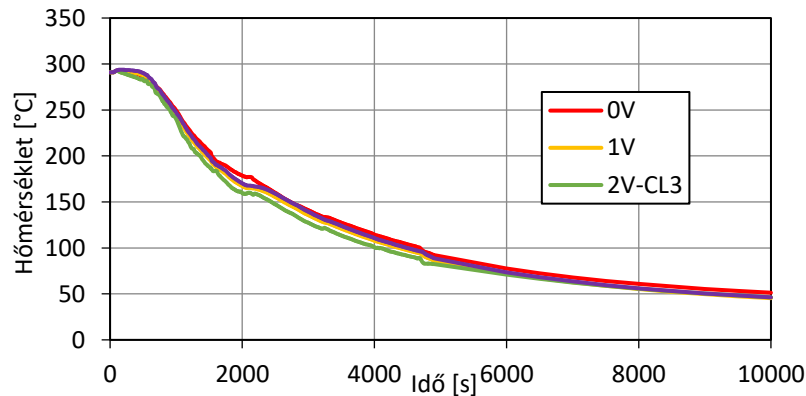


2.ábra. Az alkalmazott peremfeltételek és a végesselemes háló

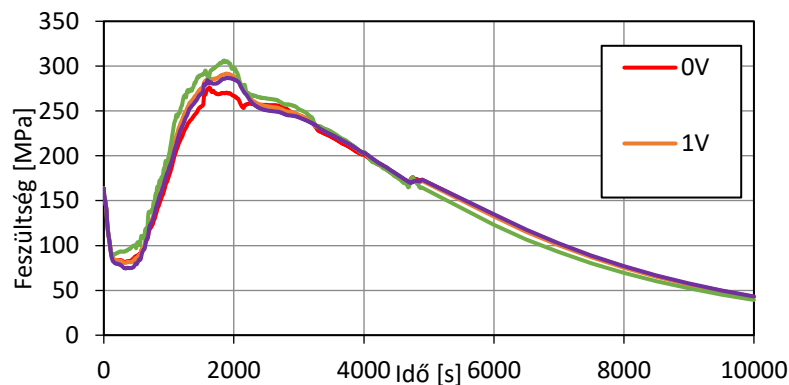
3. A SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE

3.1. Eredmények a vizsgált 0V/1V/2V-CL3/2V-CL4 esetekben

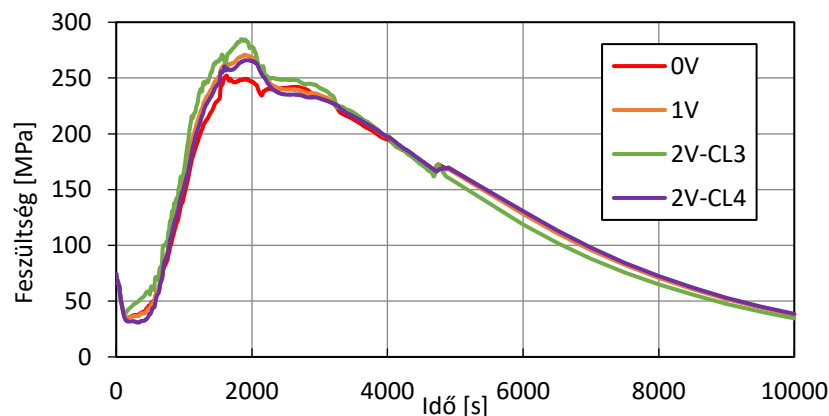
A szimulációs eredmények során az első cél az átlagolás hatásának a vizsgálata és a megfelelő TH-adatok kiválasztása az RPV leggyengébb pontjaihoz. Ebből kifolyólag a korábban már ismertett 4 esetet hasonlítottuk össze. A munkacsomag későbbi szakaszában egy feltételezett repedés terjedését vizsgáltuk, amelynek repedés csúcsa 16 mm mélyen van a CW magasságában. Ebben a pontban mutatja a hőmérséklet eloszlását a 3.ábra. A 4. ábra és 5. ábra pedig a vizsgált pontban mutatja a feszültség profilokat.



3.ábra. A hőmérséklet eloszlása a feltételezett repedés csúcsban



4.ábra. A kerületi irányú feszültség a feltételezett repedés csúcsban

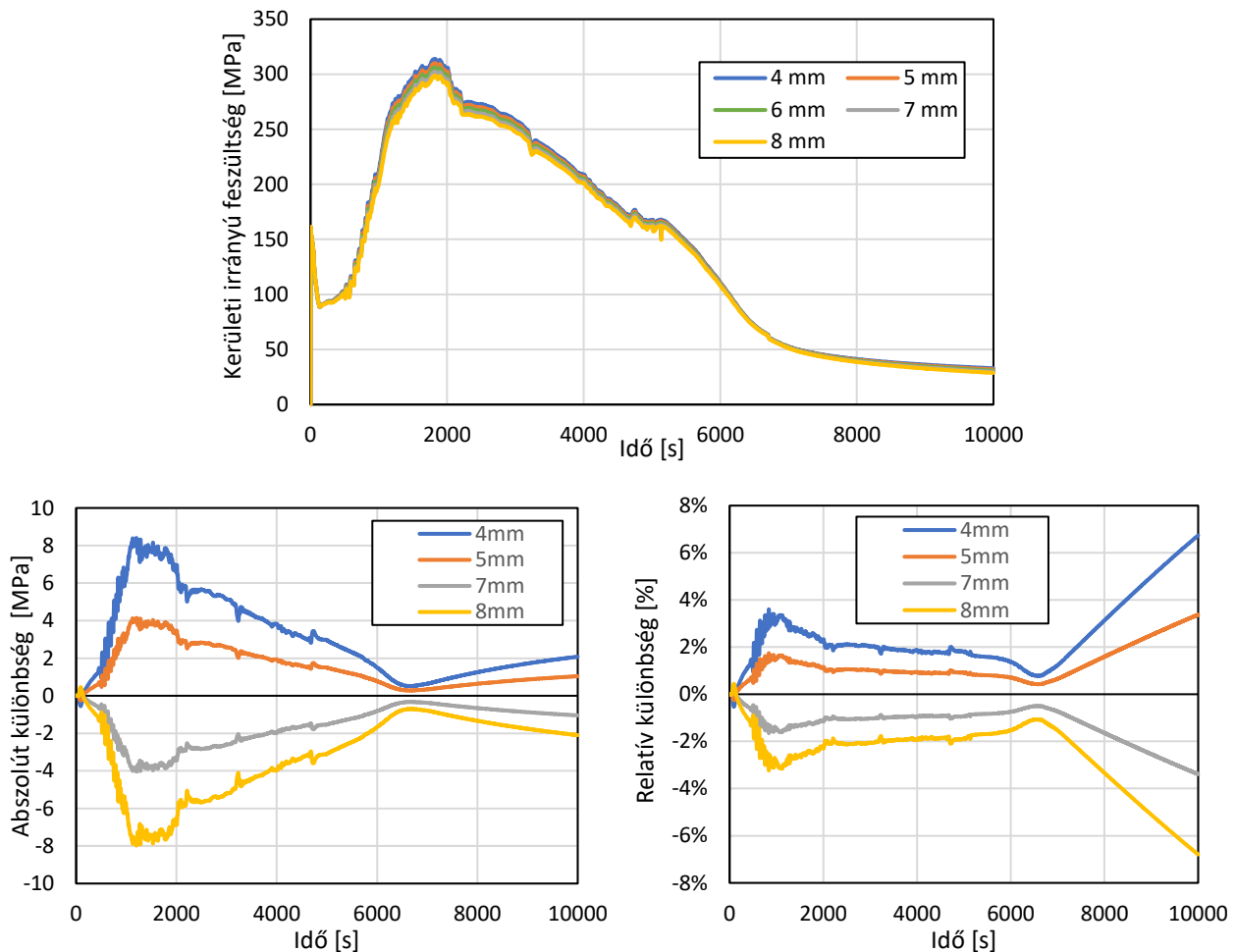


5.ábra. Az axiális feszültség a feltételezett repedés csúcsban

A kiértékelés szempontjából a legveszélyesebb időtartomány az, ahol a feszültség profil a legmagasabb értéket éri el. A diagramokból jól látható, hogy a 2V-CL3 eset adja a legkonzervatívabb eredményt, ezáltal a későbbiekben a szimulációk alapját ezen verzió adta.

3.2. Eredmények változó plattír réteg vastagság esetén

A korábban ismertetett szimulációk során a belső plattír réteg vastagsága egységesen 6 mm. Azonban a gyártástechnológiából adódóan a vastagsága kis mértékben eltérhet. Ennek a hatásnak a vizsgálatára a 2V-CL3 szimulációban a plattír réteg vastagságát 4 és 8 mm között változtattuk meg. Az elért eredményeket a 6. ábra mutatja, amely a kerületi irányú feszültség változását szemlélteti az idő függvényében a repedés csúcánál.

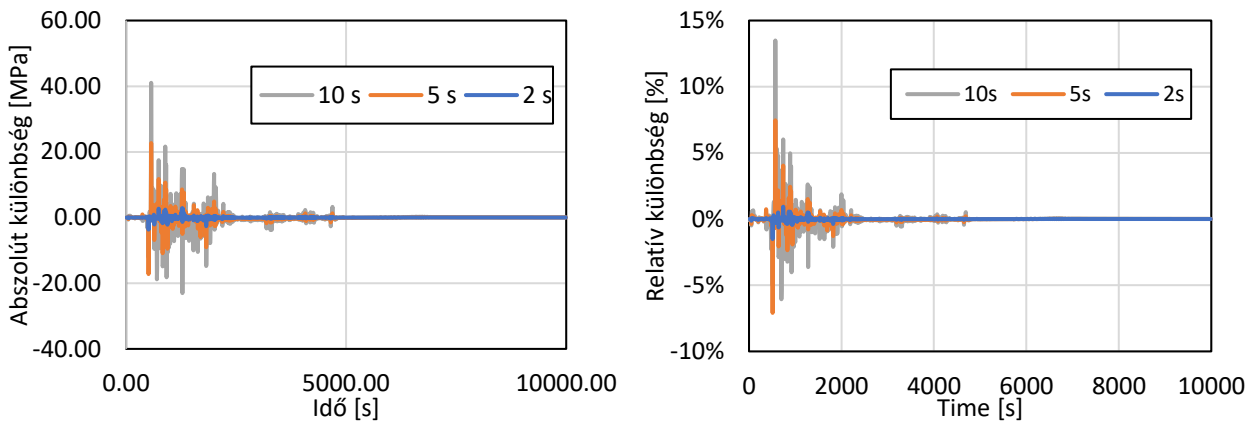


6.ábra. A plattír réteg vastagságának hatása a kerületi irányú feszültségre

Az eredményeket az alapesettel összehasonlítva látható, hogy a plattír réteg vastagsága nincs nagy hatással a feszültség eredményekre. A legnagyobb eltérés is mindössze ± 10 MPa alatt van. Fontos megjegyezni, hogy a plattír réteg alatti repedés terjedés vizsgálatánál már lényegesen jelentősebb hatása van a plattír réteg vastagságának.

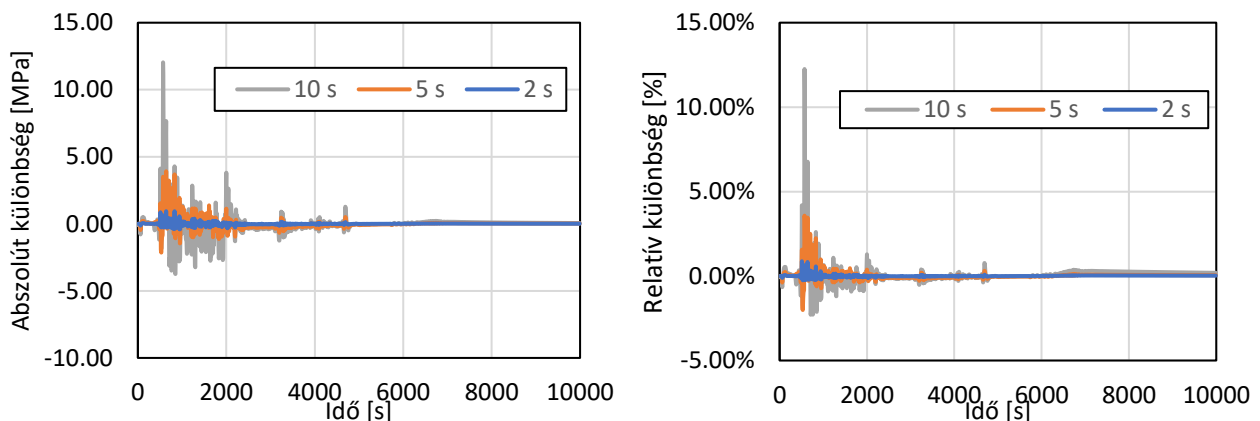
3.3. Az időlépés hatásának vizsgálata

A további szimulációk elvégzéséhez szükséges az alkalmazható időlépés nagyságát is vizsgálni. Az eredetileg kapott bemeneti adatok a TH számítások eredményei, amelyek 10 000 s időtartamúak és az időlépés nagysága 1 s. Ez az egyszerűsített tengelyszimmetrikus szimulációk esetén nem jelent nagy problémát, azonban egy 3D szimuláció futási ideje túl hosszú lenne már, ezért érdemes fontolóra venni az adatok egyszerűsítését. Az időlépés hatását a 2V-CL3 esetre vonatkozóan vizsgáltuk, ahol további 3 különböző értéket vettünk fel. Ezekkel az értékekkel a lépések száma 10 000-ról 5 000-re, 2 000-re és 1 000-re csökkenthető. Alapestként az 1 s-os időléptéssel kapott eredményeket vettük, és a kapott eredményeket összehasonlítottuk a szimulációból kapott értékekkel. A 7. ábra mutatja a kerület irányú feszültség különbségét az RPV belső felületén az alapesetthez képest. Ez azt mutatja, hogy a 10 s időléptéssel lefuttatott szimuláció akár több mint 40 MPa értékkel magasabb/alacsonyabb értéket eredményezhet, mint az 1 s időléptéssel kapott eredmény. Ez körülbelül 15%-os relatív különbséget eredményez. A 2 s-os időléptéssel kapott eredmények meglehetősen jó egyezést mutatnak az alapesettel, de az időlépések száma még ebben az esetben is túl magas 3D-s szimuláció elkészítéséhez.



7.ábra. A kerület irányú feszültség abszolút és relatív különbsége az időlépés függvényében az RPV belső felületén

A repedés csúcs helyének esetében hasonló eredményeket kapunk, ahogyan az a 8. ábrán látható, azonban ebben az esetben a legnagyobb feszültségérték-különbség 12 MPa körül van.



8.ábra. A kerületi irányú feszültség abszolút és relatív különbsége az időlépés függvényében a repedés csúcsánál

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen publikáció az APAL projekt harmadik munkacsomagjában végzett munkának egy vékony szeletét mutatja be. Az elvégzett munka során meghatározásra került, hogy a termohidraulikai adatok milyen módon implementálhatók az egyszerűsített tengelyszimmetrikus szimulációkba és ezalatt vizsgáltuk a különböző esetekben fellépő hőmérsékletek eloszlását, valamint a feszültségek eloszlását. Vizsgálatra került a tartály belsejét borító plattír réteg vastagságának az eredményekre vonatkozó hatása. Valamint ellenőriztük a választott fix időlépés nagyságának a hatását. Az elért eredmények megfelelő tovább lépési lehetőséget jelentenek a munkacsomagon belüli további feladatok elvégzésére.

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.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] <https://www.apal-project.eu/>
(Utoljára ellenőrizve: 2024.02.01)
- [2] Trampus P.: *A reaktortartály szerkezeti integritása – különös tekintettel az üzemidő hosszabbításra*, Petten (NL) – Bicske, 2004
- [3] <https://relap53d.inl.gov/SitePages/Home.aspx>
(Utoljára ellenőrizve: 2024.02.01.)