

# APAL projekt: Advanced PTS Analysis for LTO

## Fejlett probablisztikus PTS értékelési módszer kidolgozása hosszú távú üzemelésre vonatkozóan

Az APAL projekt az EURATOM 2019-2020 keretprogram NFRP-02 Safety assessments for Long Term Operation (LTO) upgrades of Generation II and III reactors felhívásában nyert támogatást a 2020 évben. A munka fő célkitűzései a nyomás alatti hősokek (PTS) fejlett valószínűségi értékelési módszerének kifejlesztése, a hosszú távú üzemelés (LTO) javításához szükséges biztonsági tartalékok számszerűsítése és a legjobb gyakorlatra vonatkozó útmutatás kidolgozása.

### 1. A jelenlegi európai gyakorlat

Az atomerőművek (NPP) megbízható, kibocsátásmentes energiaforrást jelentenek, és így fontos szerepet játszanak az Európai Unióban 2030-ig az 1990-es szinthez képest legalább 40%-kal történő kibocsátás-csökkentésre vonatkozó kötelező célkitűzés elérésében. Jelenleg az európai hálózatokba villamos energiát tápláló mintegy 180 atomerőmű többsége azonban élettartamának második felében jár, és meg kell felelnie a nukleáris biztonságról szóló irányelvben meghatározott szigorúbb biztonsági előírásoknak. A következő évtizedek szükséges villamosenergia-ellátásának biztosítása érdekében az Európai Unió a meglévő erőművek élettartamának meghosszabbítását tűzte ki célul, ami szükségessé teszi a biztonságos működésük ellenőrzésére szolgáló fejlett módszerek alkalmazását.

A hosszú távú üzemeltetés (LTO) egyik legkorlátozóbb biztonsági értékelése a reaktortartály (RPV) integritásának értékelése a nyomás alatti hősokek (PTS) figyelembevételével. A nyomás alatti hősokek (PTS) olyan esemény, amely során az RPV-t egyidejűleg magas nyomás és a vészhelyzeti maghűtés (ECC) befecskendezése miatti hősokek (súlyos gyors túlhűtés) terheli. Egy új reaktortartály anyagának törési szívóssága magas, ezáltal a PTS nem veszélyezteti integritását. Azonban az üzemelés során az anyagok törési szívóssága csökken, mivel gyors neutron sugárzásnak vannak kitéve (anyag elridegedése). Ezáltal a súlyos PTS események okozhatják a reaktortartály belső felületének közelében meglévő kis hibák terjedését. A feltételezett kezdeti hiba a tartály falán keresztül olyan mértékben terjedhet repedéssé, hogy az veszélyezteti a tartály épségét és ezáltal a mag hűtési képességét. A PTS előfordulhat a reaktortartályban, de hasonló jelenség előfordulhat az atomerőművek kevésbé kritikus alkatrészeinél is, mint például a csövek, csövek, hőcserélők stb. esetében. A cél a hirtelen bekövetkező törés kezdetének vagy a reaktor meghibásodás biztonsági határának meghatározása. A meglévő atomerőművek LTO elemzése utáni biztonságos működés igazolására továbbfejlesztett módszerekre van szükség.

Az Európai Unióban jelenleg alkalmazott PTS elemzések

determinisztikus értékeléseken és konzervatív peremfeltételeken alapulnak. Az ilyen típusú PTS elemzések korlátozottak az LTO-ra váró atomerőművek biztonságának igazolásához, ezáltal további fejlesztésük javasolt. Ugyanakkor több LTO elemzés is azt célozza meg, hogy növelje a PTS vizsgálatok biztonsági határait. Ezenkívül fontosabbá válik a biztonsági határok számszerűsítése a reaktor-meghibásodás probablisztikus értékelésének szempontjából [1].

### 2. A projekt célja

Az APAL projekt célja az atomerőművek biztonsági értékelési módszereinek fejlesztése azzal a célkitűzéssel, hogy Európa-szerte javuljon a biztonságuk. Ezt szem előtt tartva az APAL egy fejlett valószínűségi és determinisztikus PTS értékelési módszert dolgoz ki, mely során számszerűsíti a hosszú távú üzemeltetés javításához szükséges biztonsági tartalékokat, és iránymutatást fog kidolgozni a legjobb gyakorlatra vonatkozóan.

A projekt 2020. októberében indult és 2024 szeptemberében zár. A projektben 14 európai intézet-labor mellett (1. ábra) részt vesz a Japán Atomenergia Ügynökség (JAEA) és az Oakridge Consulting International (OCI), a projekt koordinátora az ÚJV Řež.



1. ábra: APAL projektpartnerek [1]

A konzorcium az RPV biztonsági értékelésével és a PTS enyhítésével kapcsolatos multidiszciplináris és multifizikai kihívásokkal foglalkozik. A projekt során összegyűjtött valamennyi ajánlást és következtetést felhasználja az LTO fejlett PTS-elemzéseinek valamennyi szempontját lefedő legjobb gyakorlatok meghatározására. Az APAL-ban alkalmazandó valószínűségi megközelítés lehetőséget nyújt a bizonytalanságok kezelésére anélkül, hogy túlzottan konzervatívan járna el, valamint képes kvantitatív adatokat szolgáltatni a kockázatalapú élettartam-menedzsment

megközelítésekhez, amelyeket számos más ipari területen is alkalmaznak.

Az APAL-ban a PTS-elemzés magában foglalja a termohidraulikai, szerkezeti és törésmechanikai értékeléseket. A PTS-elemzés szempontjából releváns LTO-fejlesztések azonosításához kiterjedt szakirodalmi áttekintésre van szükség a fejlett módszerek validálásához felhasználható tapasztalati eredmények összegyűjtésével együtt. Az APAL a szakirodalom áttekintésével és a partnerek tapasztalatainak összegyűjtésével kezdi a PTS-elemzés szempontjából releváns LTO-fejlesztések (hardver és szoftver) jelenlegi állásának meghatározását. Ez magában foglalja a PTS mérséklésére szánt LTO-fejlesztéseket is. A legmodernebb technológia meghatározása tartalmazza a meglévő megoldások, megközelítések és értékelések összegyűjtését az LTO-fejlesztésekhez, valamint a technológiai hiányosságok és a lehetséges megoldások azonosítását. Az LTO-fejlesztések hatással lehetnek a termohidraulikai (TH) elemzésre (pl. fűtött vészhelyzeti hűtővíz) vagy a szerkezeti és törésmechanikai értékeléshez használt módszerekre és megoldásokra (pl. hegesztési maradó feszültségek). A leginkább befolyásoló vagy releváns LTO-fejlesztések további értékelésére referenciaesetként kerül sor. Ezenkívül az APAL az üzemeltetési eljárások alapján azonosítja az emberi beavatkozást a PTS esemény során, majd a TH-elemzés határfeltételeire vonatkozó emberi tényező számszerűsítése következik. A számítógépes kódmodellekhez, a kezdeti peremfeltételekhez és az atomerőmű-rendszerek paramétereikhez kapcsolódó bizonytalanságok mellett a munka az emberi tényezőhöz kapcsolódó bizonytalanságokra is összpontosít – ez egy olyan terület, amelyet a PTS-elemzésben eddig nem nagyon dolgoztak ki és értékeltek. Ez a következőkre terjed ki:

- A számítógépes kódmodellek bizonytalanságai a számítási eredményeknek a rendelkezésre álló kísérleti adatokkal való összehasonlításával kerül meghatározásra.
- Az üzemi adatok bizonytalanságait szakértői megítélés vagy üzemeltetési tapasztalat alapján határozzák meg.
- Az emberi tényezővel kapcsolatos bizonytalanságok a korszerűség azonosításának előfeltételeiből származó meghatározásokon alapulnak.

A projekt során elvégzett valamennyi munka ajánlásai és következtetései összegyűjtésre kerülnek, hogy kidolgozzák a fejlett PTS-elemzésének legjobb gyakorlatát az LTO-ra vonatkozóan.

### 3. A projekt módszertana

A célok elérésére a tervezett munka öt szakmai részre osztható fel, amelyet a 2. ábra szemléltet.

Kiterjedt szakirodalmi áttekintés és

tapasztalatgyűjtés: Az APAL célja, hogy meghatározza az LTO-fejlesztések (NPP hardver és szoftver) jelenlegi állását, amelyek kedvező vagy kedvezőtlen hatást gyakorolhatnak a PTS-elemzés eredményeire. Ez magában foglalja a technológiai hiányosságok azonosítását és a lehetséges fejlesztések meghatározását. Ezen túlmenően a rendelkezésre álló üzemeltetési tapasztalatok és szakértői megítélések alapján azonosítják (és számszerűsítik) a PTS-esemény során releváns emberi tényezőket. Továbbá a PTS-értékelés kiválasztott részeiről, például a maradó feszültségek kezeléséről, a meleg előfeszítéses megközelítés alkalmazásáról, a termohidraulikai elemzésekről és a valószínűségi PTS-értékelésről korszerű jelentések készülnek.

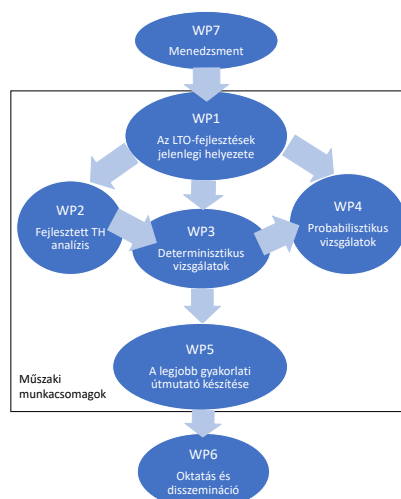
Széleskörű termohidraulikai (TH) értékelés: A teljes PTS-elemzés egyik legfontosabb lépéseként az APAL célja, hogy számszerűsítse az LTO-fejlesztések és az emberi tényező hatását a TH-elemzés eredményeire. Ezen túlmenően ezt a hatást a későbbi szerkezeti és törésmechanikai referenciaértékek segítségével értékelik, miközben figyelembe veszik a TH-elemzés bizonytalanságait (az üzemi adatok, az alkalmazott számítógépes kódok és az emberi tényező miatt), és foglalkoznak a teljes PTS-elemzésre gyakorolt hatásukkal.

Determinisztikus szerkezeti és törésmechanikai elemzések: Az APAL célja az LTO-fejlesztésekkel és a TH-elemzés bizonytalanságával kapcsolatos biztonsági tartalékok számszerűsítése olyan értékelések révén, amelyeket egy közös determinisztikus referenciaérték alapján végeznek el. Ezt a közös referenciaértéket a NUGENIA+DEFI-PROSAFE projekt [6] által biztosított átfogó referenciaérték alapján határozzák meg, amelyhez szilárd validálási és ellenőrzési alap áll rendelkezésre.

Valószínűségi törésmechanikai elemzésen alapuló valószínűségi becslés: Mivel a biztonsági tartalékok számszerűsítése egyre fontosabbá válik, és a determinisztikus értékelések elérik korlátjaikat, az APAL célja, hogy megfelelő viszonyítási alapot hozzon létre a valószínűségi törésmechanikai elemzéshez. Ezt a determinisztikus biztonsági tartalékok értékelésére elvégzett referenciaértékkel összehangban határozzák meg.

Egy fejlett valószínűségi PTS-értékelésre kerül sor a TH bizonytalanságok figyelembevételével a későbbi szerkezetmechanikai és valószínűségi törésmechanikai elemzésekben. Ezen túlmenően kapcsolatot kell teremteni a determinisztikus és a valószínűségi tartalékértékelés között.

Ajánlások és a legjobb gyakorlatok meghatározása: Az APAL elemezni fogja az elvégzett munkát, hogy a tanácsadó testülettel, a szabályozó testülettel és a végfelhasználókkal szoros együttműködésben meghatározza az LTO fejlett PTS-elemzésére vonatkozó legjobb gyakorlatokat, és ezeket az eredményeket célzott munkaértekezleteken, képzési rendezvényeken és a tudományos



2. ábra: Az APAL projekt felépítése [1]

közösséget célzó további kommunikációs csatornákon keresztül terjeszti.

#### 4. A BZN szerepvállalása a projektben

A BZN Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztálya (SZI) is részt vesz a projektben. A WP2 munkacsomag kivételével az összes többi szakmai munkacsomagban vállal feladatot, amelyek közül a WP5 vezető szerepét tölti be.

- WP1–T1.1 State-of-the-art készítése hegesztések maradófeszültségei elemzésére vonatkozóan: A BZN az alfeladat vezetője, amelynek célja annak meghatározása, hogy a szakirodalom alapján a maradó feszültségek figyelembevétele a PTS analízis esetén hogyan vehető figyelembe.
- WP1–T1.2: A meleg előfeszítés (WPS) hatásának bevonása az RPV-k értékelésébe.
- WP3–T3.1 Szerkezeti elemzés, értékelés: A BZN ezen alfeladat vezetője.
- WP3–T3.2 A törésmechanikai referenciaérték meghatározása.
- WP3–T3.3 Első törésmechanikai benchmark feladat elvégzése.
- WP3–T3.4 Az LTO-fejlesztésekhez kapcsolódó számítások értékelése.
- WP3–T3.5 TH bizonytalanságokhoz kapcsolódó különbségértékelése.
- WP5: A BZN a munkacsomag vezetője, amelyben az elvégzett munkából származó javaslatok és következtetések összegyűjtése a feladat a kifejlesztett LTO és PTS elemzésekhez szükséges legjobb gyakorlat felhívása céljából.

A WP4 probabilisztikus elemzés felépítése megegyezik a WP3 esetén felsorolt lépésekkel, amelyekben a BZN résztvevőként szerepel [2-5].

#### 5. A projekt jelenlegi állása, eredményei

A projekt jelenleg a futamideje felénél tart. Ennek során lezárulásra került a WP1 és a WP2 munkacsomag. A T2.1. feladatban (Az LTO-fejlesztések és az emberi tényező TH-elemzési peremfeltételekre gyakorolt hatásának számszerűsítése) a kiválasztott LTO-fejlesztések TH-elemzését végezték el. A T2.1. feladat azonosította a PTS-eseményekben a legnagyobb befolyással bíró emberi tevékenységeket, valamint a PTS-esemény során a szabványos üzemeltetési eljárástól eltérő, kiválasztott emberi interakciók hatásait is. E feladat eredményei a TH-adatok különböző csoportjai lettek, amelyek a kiválasztott LTO-fejlesztéseket vagy az emberi tényezőt képviselik. A T2.2. feladatban (A TH-elemzések bizonytalanságainak meghatározása a számítógépes kódmodellekkel, az üzemi paraméterekkel és az emberi tényezővel kapcsolatban) a termohidraulikai elemzések bizonytalanságait határozták meg a PTS értékelésére vonatkozóan. A T2.3 alfeladatban pedig a végleges megközelítés kiválasztására és alkalmazására került sor [4].

A WP3 és a WP4 munkacsomagok jelenleg futó munkacsomagok. Ezek közül a T3.1 alfeladatban meghatározásra

kerültek a feszültségmezők és a hőmérséklet eloszlások, amelyek a WP2-ből származó TH adatokat használta fel. Emellett további érzékenységvizsgálatok lettek elvégezve, mint például a geometria, a bevonat vastagságának, a hálósűrűségnek a hatása. A T3.2 részfeladatban definiálásra került a vizsgálandó repedés alakja, mérete és elhelyezkedése, továbbá az ehhez alkalmazandó számítási módszerek meghatározása. A T3.3 feladat főbb részei már befejeződtek, ennek során az első törésmechanikai benchmark feladat elvégzésére került sor, amely segítségével a partnerek eredményei jól összevethetőek voltak, ezáltal meghatározásra került az egyes partnerek megoldásai közötti eltéréseiből származó divergenciák okai [5].

A WP4 munkacsomag az első fázisában tart, ezáltal jelenleg a T4.2 alfeladat készült el ez ideig, amelynek során a probabilisztikus törésmechanikai feladatok és számítási módok részletes ismertetésére került sor.

További információk a honlapon:

<https://www.apal-project.eu/>

**Spisák Bernadett, Szávai Szabolcs**

*Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.*

#### 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.

#### 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 N° 945253.

#### Irodalomjegyzék

- [1] Az APAL projekt honlapja: <https://www.apal-project.eu/> (Letöltés ideje: 2022.12.20)
- [2] Zarazovskii, M és társai: State-of-the-art of WPS in RPV PTS analysis, Proceedings of the ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Division Conference, 2022
- [3] Pištora, V, Cueto-Felgueroso, C, Král, P, Tiete, R, Dillstrom, P, Szávai, Sz, Mora, D: Development of advanced method for evaluation of pressurized thermal shock to support long-term operation of VVER, The 8th International Conference VVER 2022, ÚJV Řež Conference Centre, Czech Republic, 2022, 10. 10-12,
- [4] Kral, P és társai: Comparison of System TH Codes Calculations of SBLOCA Base Case in the APAL Project, Spring CAMP Meeting, 2022, online
- [5] Spisák B, Szávai Sz: Reaktortartály termikus sokkból származó feszültségeinek végeelem módszerrel történő elemzése, GÉP 2022/5. pp. 76-79. ISSN 0016-8572
- [6] DEFI-PROSAFE: DEFINition of reference case studies for harmonized PRObabilistic evaluation of SAFEty margins in integrity assessment for long-term operation of reactor pressure vessel