

## Részvétel a Paksi Atomerőmű öregedéskézelési programjainak támogatásában

Participation in supporting the Paks Nuclear Power Plant's ageing management programmes

### Bevezetés

Az atomerőművek hosszú távú, biztonságos üzemelésének meghatározására szolgáló módszer alapját egy szisztematikus öregedéskézelési eljárás képezi. Ezen folyamat egyik alapvető része az atomerőműi rendszerlemek integritásának a bizonyítása. Ezért az üzemelési biztonság megítéléséhez, a várható élettartam értékeléséhez elengedhetetlen a berendezések szerkezeti anyagaiban a meghatározó károsodási folyamatok ismerete, pontos leírása és üzemelés közbeni monitorozása, értékelése.

Ezáltal kiemelt fontosságú az atomerőmű üzemeltetési biztonságának biztosítása és biztonságos üzemidejének támogatása, növelése. Az ehhez kapcsolódó K+F programok olyan tudományos és műszaki háttér megteremtését célozzák meg, melyek keretein belül ésszerű, hatékony együttműködéssel válnak segíthetővé a hazai és az európai nukleáris kutatásokkal foglalkozó közösségek, azok eredményeit felhasználó üzemeltetők a nukleáris villamosenergia termelés fenntartható fejlődése érdekében. Ezzel összhangban a Bay Zoltán Nonprofit Kft. Szerkezetintegritási és Gyártástechnológia Osztálya és Anyagvizsgáló Osztálya több tíz éves múltal visszatekintve vesz támogatja az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (Paksi Atomerőmű) Öregedéskézelési osztályának a munkáját, s épít kompetenciát, projektpartner különböző nemzetközi

kutatásokban az öregedéskézeléshez szorosan kapcsolódó problémakörök megvalósításának a tekintetében.

Az atomerőmű rendszerlemeinek integritás értékelése hagyományosan a törésmechanikai megközelítésen alapul, a meglévő szabályzatok és előírások szerint, amely magában foglalja az üzem közbeni ellenőrzéseket és a sugárzás okozta károsodás becslését vagy a reaktorban, a reaktormaghoz közeli kiválasztott helyeken besugárzott korlátozott megfigyelési minták vizsgálatát, amelyek előre jelzik a később várható degradációt. Ezekhez a tevékenységekhez korszerű numerikus és anyagvizsgáló módszereket alkalmazunk a több, mint 15 éve végzett kutatás-fejlesztési projektek megvalósításai során. A továbbiakban, a közös együttműködés részletekbe menő ismertetése céljából a napjainkban futó kutatási projektek rövid ismertetésére térnénk rá.

### Részvétel egyesült SNETP AISBL keretében az öregedéskézeléssel kapcsolatos kutatásokban

Az SNETP – Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, más néven Fenntartható Nukleáris Energia Platform célja a nukleáris energia szerepének erősítése a biztonságos, fenntartható, versenyképes és lényegében karbonmentes energiamix megteremtésében Európa számára. Az SNETP kiemeli a kutatás fontosságát a nukleáris



1. ábra: Az SNETP három fő szakmai pillére [1]

ágazatban, hogy a magas szintű biztonság fenntartható legyen, hogy a szektor megtartsa a szakértelmet és a know-how-t, ezzel egyre versenyképesebb legyen. Az SNETP ennek érdekében biztosítja a fokozott koordinációt a nemzeti programok között, egyúttal garantálva a leghatékonyabb felhasználását a programok finanszírozásának. Így alapvető célja a különböző országok résztvevőiből álló konzorciumok által végrehajtott olyan kutatási projektek támogatása, amelyek új tudás, új technológia, termékek vagy közös kutatási célú erőforrások létrehozására irányulnak. A kutatási programok finanszírozását az EURATOM és más kapcsolódó H2020-as programok biztosítják.

A szövetség kiindulási célja egy kutatás-fejlesztési és innovációs (K+F+I) hálózat/platform létrehozása volt, ezáltal az egyesület együttműködési projektek és nemzetközi együttműködés révén tudományos és technikai alapot biztosít a K+F+I stratégiák kidolgozásához, az innovatív és fenntartható megoldások megvalósításának és telepítésének támogatásához, beleértve az innovatív reaktor és az üzemanyagciklus koncepciókat is, emellett pedig a nukleáris energia villamosenergia termelésre történő felhasználását is. A szövetségnek mozgósítania kell az iparágakat, a tanulmányi- és kutatóközpontokat, a Technikai Támogató Szervezeteket (TSOs), a kis- és középvállalkozásokat (KKV-kat) és más érdekelt feleket (részvényeseket) az Európai Unióban (EU), hogy partnerségben működjenek, és hozzájáruljanak az innovációhoz és a tudomány jelenlegi (legkorszerűbb) állásának a követéséhez, fejlesztéséhez a K+F+I eredmények megvalósításának és terjesztésének használatával.

Az SNETP 2007-es alapítása óta a szervezet nagymértékben kiforrott. Robusztussága a három műszaki és tudományos pilléren alapul, melynek tematikus felépítése az 1. ábrán látható:

- NUGENIA (Nuclear Generation II&III Alliance): a nukleáris iparban a kutatás-fejlesztési és innovációs tevékenységért felelős.
- ESNII (European Sustainable Industrial Initiative): a IV. generációs nukleáris erőművek fejlesztésért felel.
- NC2I (Nuclear Cogeneration Industrial Initiative): célja az atomenergiában rejlő potenciál felszabadítása és felhasználása a villamos energián túlmenően.

A 2019-es években jelentős változás állt be a nukleáris energiatermeléssel kapcsolatos EU-n belüli kutatás-fejlesztési törekvések koordinálása területén. A NUGENIA nemzetközi szövetség megállapodott a Fenntartható Nukleáris Energia Technológiai Platformmal (SNETP), hogy egyetlen nemzetközi szövetséget hozzon létre. Az egyesülés által a SNETP és három szakmai pillér (NUGENIA, ESNII és NC2I) egyetlen jogi személy - belga jog szerinti nemzetközi nonprofit szervezet - működtetésére került sor. Együtt törekednek arra, hogy megerősítsék a nukleáris energiaipar pozícióját a mai és holnap európai energiamixben, és megszilárdítsák az európai kutatási, fejlesztési, demonstrációs és innovációs technológiákat (K+F+I). Ez az egyesülés fontos mérföldkő, amely kiemeli az európai tudományos közösség (kutatóközpontok,

biztonsági támogató szervezetek és egyetemek) és az ipar (közművek, technológiai szolgáltatók, gyártók...) részvételét a biztonságos, versenyképes, hatékony és innovatív nukleáris energia biztosítása érdekében, s mint alacsony széndioxid kibocsátású energiatermelés, hozzájárul az európai energiaellátás biztonságához és az éghajlatváltozás mérsékléséhez. Az Európai Bizottság Kutatási és Innovációs Főigazgatósága és a Foratom képviselői üdvözlötték a kezdeményezést, mely erősíti a nukleáris energiával kapcsolatos K+F+I-t képviselő széleskörű közösség helyzetét Európában és azon túl.

Az SNETP azon pillérét, mely a nukleáris iparban a jelenlegi technológiák biztonságos és versenyképes fenntartásáért felelős, a NUGENIA képviseli, melynek keretében a folyó K+F programoknál lehetőségünk van a paksi (VVER) specifikumok (anyagminőség, üzemeltetési adatok stb.) érvényesítésére a témák kidolgozásakor és a keletkező eredmények adaptációjára a Paksi Atomerőmű öregedéskezelése során. Így képviselni lehet a hazai érdeket az öregedéskezeléshez kapcsolódó nemzetközi benchmarking elemzésekben és best practice dokumentumokhoz VVER esettanulmányok készítésében, törekedni kell az eredmények Paksi Atomerőműre történő adaptálására.

A NUGENIA égisze alatt jelenleg is számos olyan projekt fut vagy projektjavaslat található, melyek a Paksi Atomerőmű öregedéskezelési programját érintheti, s melyek további hasznos információkat szolgáltatnak, és melyek a típus öregedéskezelési programok módosítása során felhasználhatók. A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. (BZN) Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztálya és Anyagvizsgálat Osztálya több jelenleg futó EURATOM nukleáris projektben is projektpartner, melyről jelen lapszamban bővebben is olvashat.

Ezáltal a Paksi Atomerőmű megbízta a BZN-t az öregedéskezeléshez kapcsolódó nemzetközi kutatási programok eredményeinek feldolgozására és a szükséges elemzésekkel, vizsgálatokkal kiegészített adaptálására a Paksi Atomerőmű részére. A nemzetközi tapasztalatok feldolgozása és adaptálása során az alábbi feladatok valósultak meg:

- bekapcsolódás a nemzetközi programokba, eredmények adaptálása,
- a NUGENIA keretében folyó munkák eredményeinek adaptálása,
- javaslatok kidolgozása az érintett Típus Öregedéskezelési Programok (TÖKP) módosítására.

Az előző évek tapasztalatai és a rendelkezésre álló adatok, információk alapján elmondható, hogy az SNETP, illetve annak egyik pillérét jelentő NUGENIA együttműködések keretében döntő mértékben a nyugati országok kutatás-fejlesztésére fókuszál. Mindezek ellenére pozitívként elmondható, hogy a 2022-es évet tekintve egyre több azon támogatást nyert projektjavaslatok száma, mely a VVER-ekre vonatkozó adoptálható eredmények outputjaként szolgálhatnak, ezek a STRUMAT-LTO, APAL, FRACTESUS, ENTENTE és DELISA-LTO projektek, melyben a BZN is érdekelt, mint projektpartner, így

a 2022-es évet tekintve öt olyan pályázat is fut, melyek a Paksi Atomerőmű szempontjából releváns tématerületet ölelnek fel, ezáltal javasolt azok nyomon követése a legújabb kutatási eredményekhez való hozzáférés, másrészt azoknak a VVER viszonyokra történő adaptálása érdekében.

### Tranziens varrat-vizsgálat fejlesztési lehetőségeinek kutatása

A hőtáadó csövek és a kollektor tranziens varrat kötése az a két pont, ami jelenleg öregedéskezelés szempontjából különös odafigyelést igényel. A jelenleg alkalmazott vizsgálati eljárások egyrészt időigényesek, másrészt a bennük rejlő bizonytalanság miatt nagy biztonsági tartalékot követelnek.

### Gőzfejlesztő alsó heterogén hegesztési varrat vizsgálata

A heterogén hegesztett kötések általában gyengén ötvözött, ferrites acélból és rozsdamentes, ausztenites acélból állnak, amik átmeneti rétegen (párnarétegen) keresztül kerülnek összehegesztésre. A repedések a csomk varratának belső felületéről indulnak. A repedéseket vélhetően feszültségkorróziós folyamatok okozzák, és jellemzően a kemény felületi oxidréteg felől vagy kristályközi korróziós területekről indul, és különösen veszélyes, mivel a kezdeti mikropredések gyors ütemben képesek növekedni. Ennek következtében, mivel a heterogén hegesztési varratok esetében feszültségkorróziós repedések előfordulhatnak, kisebb és nagyobb csővezetékeken, a repedések detektálása kiemelten fontos feladat.

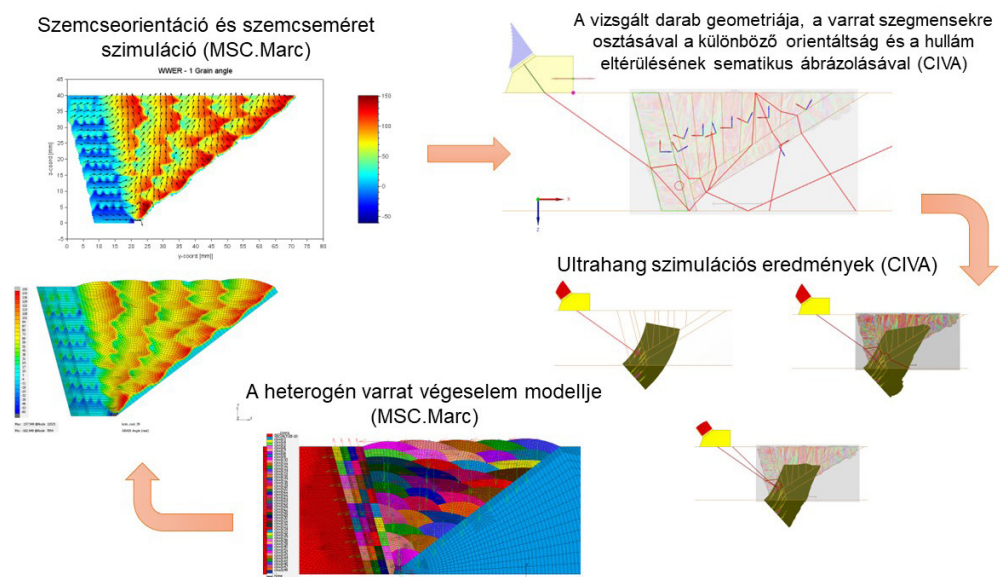
A hibák jelenlétének kimutatása kétféleképpen történhet: roncsolásos és roncsolásmentes módszerekkel. Mivel a roncsolásos módszerek a berendezések károsodásával járnak (anyagvesztés), ezért főként a roncsolásmentes vizsgálati módszereket alkalmazzák. A roncsolásmentes vizsgálati eljárások közül az ultrahangos vizsgálati technika szolgáltat leginkább információt a DMW-k vizsgálata esetében. Az ultrahangos hibakereső vizsgálatok során az anyagba nagy frekvenciájú hangnyaláb juttatunk, ami a hegesztési zónába is eljut, majd a visszaérkező ultrahangos válaszjelből lehet következtetni arra, hogy van-e hiba a hegesztési varratban. A kézi ultrahangos vizsgálatok esetében, amiket széles körben végeznek, a vizsgálatot végző személyek értékelik ki az ultrahangos válaszjeleket és következtetnek a hibák jelenlétére, típusára, elhelyezkedésére és méretére. Ennek következtében az értékelést végző szakemberek szubjektivitása befolyásolhatja az értékelést. Ezen felül a

heterogén hegesztési varrat anizotrópiája megnehezíti a hibák kimutatását, mivel a varrat szemcseszerkezete a hangnyaláb szóródását, eltérülését és a hangnyaláb energiájának csökkenését okozza.

Másfelől a heterogén hegesztési varratok vizsgálata fokozott figyelmet igényel a többi hegesztési varrathoz képest. A szemcseszerkezetük nem egységes, az ultrahangos hullámok sebessége változó a kristályszerkezet orientációjától függően, a hangnyaláb irányának a megváltozása és szóródása következik be, amikor az ultrahangos behatol a hegesztési zónába. Ezen felül a párnaréteg is okozhat hangtorzulásokat.

A tranziens varrat esetén az anyagi inhomogenitások és az orientált durva szemcseszerkezet jelent kihívást az amúgy is erős geometriai megkötésekkel elvégezhető vizsgálat számára, mely kihat a biztonsággal feltárható legkisebb anyagfolytonossági hiányok méreteire. A projekt egyik része a gőzfejlesztő alsó heterogén varratának ultrahangos vizsgálati szimulációval történő fejlesztésére vonatkozik. Így a projekt e tekintetben a következő feladatokat tartalmazza: Az alapanyagok és a varrat hanggyengítései megállapítása különböző frekvenciákon. Ezt követően különböző vizsgálófejek és beállítások mellett kiválasztásra kerülnek a feladat szempontjából ideális paraméterek, melyek értékelésére kimutathatósági valószínűség görbéket veszünk fel szimulációs módszerrel.

A projekt 2022. novemberében zárult, mely során a tranziens varratok (DMW-k) ultrahangos vizsgálati technikájának kivitelezési és értékelési eljárását segítettük elő modellezéssel. Kifejlesztettünk egy módszert a hanggyengítés megállapítására, valamint a kimutathatósági valószínűség értékelésére, amely lehetővé tette ezen adatok meghatározását rendkívül nagy adathalmazt létrehozva és feldolgozva a szimulációs környezetben [2]. Ezen módszerek alkalmazásával az ultrahangos anyagtulajdonosságok ismertté váltak és alkalmazhatók más esetekben, valamint a vizsgálati technika kiválasztását is elősegítette.



2. ábra: Tranziens varrat-vizsgálat elemzési metodika [2]

### Gőzfejlesztő hőcserélő csövek vizsgálata

A másik potenciális élettartam korlátot jelentő rész az erőmű élettartama során a hőcserélő csövek. A nukleáris iparban a primer és szekunder köri technológiai víz közötti hőcsere a gőzfejlesztőkben történik, ennek következtében a gőzfejlesztők is hőcserélőnek tekintendők. A hőtáradó felület maximalizálása és az optimális hőtáradási viszonyok elérése érdekében a hőcserélők jellemzően nagy számú, külön-külön kis átmérőjű és falvastagságú, nagy hosszúságú csövekből állnak. A hőtáradó felület 5536 db U-alakú vízszintesen elhelyezett, rozsdamentes csőből áll, a csövek a függőlegesen elhelyezett be- és kilépő kollektorokat kötik össze. A primerköri hőhordozó a hőtáradó csövek belsejében áramlik, ennek következtében a hőcserélő csövek külső és belső korróziós károsodásra egyaránt hajlamosak, integritásuk megőrzése kiemelt fontosságú.

A Paksi Atomerőműben a hőtáradó csövek integritása érdekében 10 évente megtörténik a gőzfejlesztők ellenőrzése, ami nyomáspróbából és a hőcserélő csövek örvényáramos vizsgálatából áll. Az örvényáramos vizsgálati eljárás azonban nagy szakértelmet igényel, valamint időigényes vizsgálat (vizsgálati ideje kb. 5 perc egy csövet tekintve), ennek következtében a hőcserélő csöveinek vizsgálati időtartama is jelentősen csökkenthető, amennyiben az örvényáramos vizsgálatok kiválthatóak más fajta roncsolásmentes vizsgálati eljárásokkal, amennyiben ezek a vizsgálati eljárások szintén képesek nagy biztonsággal, rövidebb vizsgálati idő mellett kimutatni a hőcserélő csövek esetleges anomáliáit. A feladat során olyan vizsgálati technika bevezetését elemezzük, mely során a megfelelő eredmény elérése mellett a vizsgálati idő csökkenthető, kiegészítve a jelenleg alkalmazott technikát vagy cserélve azt.

Az atomerőművek hőtáradó közegei jellemzően nagy tisztaságúak, így a hőcserélő csöveinek megfelelő tisztasága is garantálható. Az APR (Akusztikus emissziós vizsgálat - Acoustic Pulse Reflectometer) roncsolásmentes vizsgálati technika 6-50 mm-es belső átmérő esetében nem igényel a csőátmérőhöz szorosan illeszkedő alkatrészt, a nukleáris iparban alkalmazott hőcserélő csöveinek belső átmérője pedig jellemzően ebbe a tartományba esik. A vizsgálati módszer jól alkalmazható a csővezeték belső anomáliáinak detektálására és pontos helyének

megadására a csőhossz mentén. Az APR (Acoustic Pulse Reflectometer - Akusztikus emissziós vizsgálat) roncsolásmentes vizsgálati technikával csövenként kb. 20 másodpercre csökkenthető a vizsgálati idő, ami jelentősen redukálhatja a hőcserélő vizsgálatának időtartamát. Az akusztikus emissziós vizsgálat (APR) a 6-50 mm-es belső átmérő esetében nem igényel a csőátmérőhöz szorosan illeszkedő alkatrészt, a nukleáris iparban alkalmazott hőcserélő csöveinek belső átmérője pedig jellemzően ebbe a tartományba esik. A vizsgálati módszer jól alkalmazható a csővezeték belső anomáliáinak detektálására és pontos helyének megadására a csőhossz mentén.

A feladat végrehajtása során próbamérést hajtottunk végre a Paksi Atomerőmű Karbantartási Gyakorló Központjában lévő hőcserélőn a technika alkalmazhatósága (lásd 3. ábra), valamint a módszer értékelése és további, az üzem közbeni alkalmazhatóságra vonatkozó javaslatlattétel céljából. Összegzésként elmondható, hogy a csővezeték U-alakú geometriája nem zavarta a vizsgálatot, a csövek görbülete, valamint az alátámasztások nincsenek hatással a vizsgálati eredményekre. A lerakódások üzembiztosan detektálhatóak voltak, és pontos távolságuk is meghatározható volt a hőcserélő csövek kezdőpontjától mérve. A vizsgálati eredmények alapján az eszköz a már 5%-os keresztmetszet-csökkenéssel járó lerakódások detektálására is képes. Az erózió vagy pitting korróziós károsodás okozta helyi falvesztés vonatkozásában a 20%-os falvesztés meghaladó korróziós károsodásokat képes detektálni vizsgáló eszköz, míg teljes átlukadások is detektálhatóak voltak a vizsgált hőcserélő szegmenst illetően. Mivel a gőzfejlesztő a csővezetékének az esetében külső korrózióra is számítani lehet, az APR vizsgálatot örvényáramos vizsgálatl kombinálva javasolt alkalmazni.

### Használt Charpy próbatetek felhasználása komplex törésmechanikai jellemzők meghatározásához

A kis próbatestes vizsgálati módszerek használata ígéretes módja annak, hogy leküzdjük a reaktortartály (RPV) felügyeleti programok korlátozott anyagproblémáját. A kisméretű próbatetek használata lehetővé teszi a törési szívósság értékelését más használt próbatetek anyagán. Különösen a kisméretű, mini CT próbatestes (0,16 CT,



3. ábra: A primerköri gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek APR vizsgálata [2]

4 mm vastagság) törési szívósság meghatározás ígéretes, mivel azok a már tesztelt, normál méretű Charpy mintából állíthatók elő. A projekt átfogó célja az, hogy bemutassa a törésszilárdság vizsgálatának megvalósíthatóságát kisméretű próbatestek felhasználásával. Ebből a célból a Charpy próbatestekből kisméretű, mini CT mintákat veszünk ki. A kapott eredményeket összehasonlítjuk a már elérhető és a szakirodalomban közzétett normál CT vagy Charpy méretű próbatestek vizsgálati eredményeivel, melyből következtetések vonhatók le az eredmények használhatóságára és alkalmazhatóságára vonatkozóan.

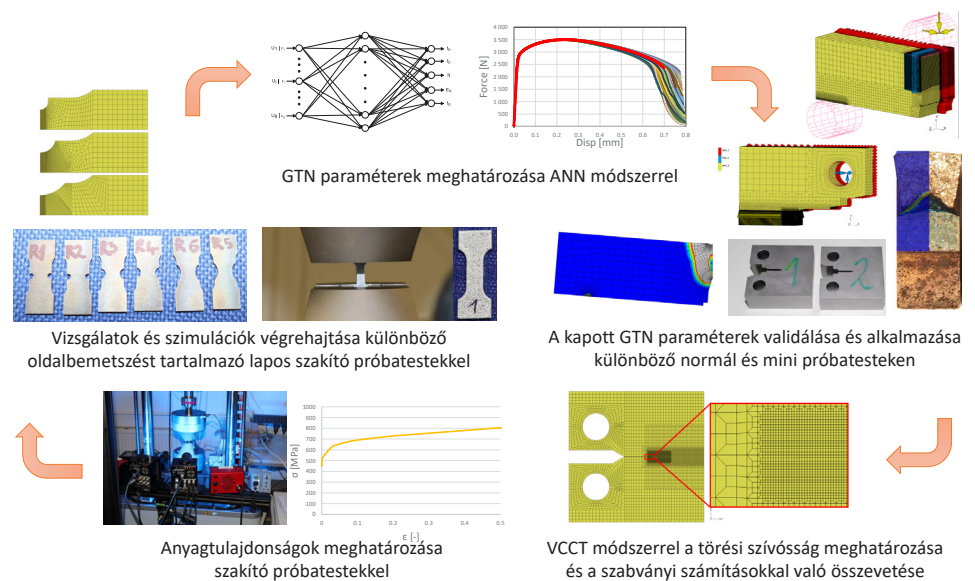
A mini CT próbatestek optimális kialakításának kiválasztása is feladat a projekt megvalósítása során (lyukméret és -helyzet, szikraforgácsolás vagy megmunkált rés, extenzométer-szerelés). A lyuknak elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy biztosítsa a csap erősségét, és a maradék keresztmetszetnek elég erősnek kell lennie ahhoz, hogy elkerülhető legyen a próbatest nemkívánatos részein a képlékeny deformáció. A kialakításnak figyelembe kell vennie az erősen besugárzott próbatestek megmunkálási lehetőségeit is. Fontos kérdés a geometria megengedett szórásának meghatározása is. A geometria hatásszóródása a minta méretének csökkenésével növekszik. Így a projekt megvalósítása során technológiát kell kidolgozni a próbatest előfárasztására és a kiinduló repedésméret meghatározására.

A kidolgozás során a mérési technikát is meg kell vizsgálni. A mérési és vezérlőrendszernek elég érzékenynek kell lennie ahhoz, hogy megfeleljen az ASTM 1921 követelményeinek. Az ARAMIS DIC (digitális image correlation) rendszer alkalmazása segít kisméretű próbatestek mérésében, továbbá abban, hogy kiegészítő információkat kapjunk a törés viselkedéséhez és a lokális modell paraméterek meghatározásához használható deformációról.

Azonban, ha csak 0,16CT vizsgálatunk van, akkor nem tudjuk vizsgálni a mérethatást, és ha csak CT geometriánk van, akkor csak egy gátolt alakváltozási állapota van, amely problémát jelenthet a geometria függetlenség igazolásában és a korszerű elemzésekhez szükséges lokális paraméterek meghatározásában. A lokális mikromechanikai modellezésen alapuló módszereket, mint például a Gurson porózus plaszticitási modelljét vagy a Beremin modellt használják a tudományos kutatás területén. A Local Approach és a kohéziós zóna modellezés kombinációja ígéretes módja lehet egy nemlineáris törésmechanikai elemzés eszközének a kialakítására az átmeneti hőmérsékleti tartományban. A modell megjósolhatja a mikrostruktúra és a kényszerek hatását a teljes Erő-COD görbére, a szívós nyírási ellenállásra és hasadásos törésre a szívós/

rideg átmeneti tartományban.

Ezért a javaslat, hogy legalább kétféle próbadarab kerüljön előállításra két különböző gátolt alakváltozású próbatesttel. A 0,16CT mellett mini SENB (vagy mini SENT) előállítása is szükséges, melyeket ki lehet vágni a használt Charpy mintákból is. Szintén szükség van miniszakító próbákra is. Az így elvégzett mérések elegendő információt szolgáltathatnak a lokális modellek paramétereinek meghatározásához. Ezenkívül átfogó módszert lehet javasolni a hagyományos értékek, mint a COD, LLD, vagy bármilyen más deformáció vagy nyúlás mérésére, amelyek kisméretű próbatesteken kihívást jelentenek, vagy lehetetlenek lennének a hagyományos érintkezésen alapuló eszközökkel való vizsgálatok meghatározása során. A mérések alapján feladatként be kell mutatni a törésmechanikai jellemzők meghatározását: A feszültség és feszültségmező kiszámítását a repedés elején; A J-integrál és a feszültségintenzitási tényező számítását; mikromechanikai károsodási modellek a használati lokális modellekkel; és végül a mérethatás értékelését; 2D és 3D repedésnövekedés szimulációk végzését. A kiértékelést az általánosan használt modellek (pl. Gurson modell), valamint az XFEM elemeken alapuló viszonylag új modellezési megközelítések vagy kohéziós elemek felhasználásával kell elvégezni, mint például a Frictional Cohesive Zone Model.



**4. ábra:** Szimulációs eljárás fejlesztése a szabvány által nem kezelt próbatestek törésmechanikai elemzésére [3]

A feladat 2022. novemberében zárult, mely eredményeként egy olyan vizsgálati - szimulációs eljárást dolgozott ki a BZN, mely során a használt, normál méretű próbatestekből kialakított kisméretű és miniatürizált próbatestekkel lehetséges a további törésmechanikai vizsgálatok elvégzése. E feladat során mind a vizsgálati technika fejlesztésre került, és a normál méretű próbatestek vizsgálatára kidolgozott szabványok értékelése is megtörtént, valamint egy olyan szimulációs eljárás lett bemutatva, amely segítségével a szabvány által nem kezelt, egyedi esetek is értékelhetők.

## Ellenőrző mikrokeménység mérések végrehajtása és kiértékelése

A VVER440 típusú atomerőművi blokkok üzemelése során a szerkezeti anyagokban olyan változások történhetnek, melyek hatással lehetnek a mechanikai tulajdonságokra és ezen keresztül a további üzemelésre, ezért az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. azt a célt tűzte ki, hogy folyamatosan ellenőrizze a főberendezések állapotát. Ennek egyik lehetséges módja a berendezések kitüntetett (jellemző) helyein végrehajtott műszerezett keménységmérési vizsgálat végzése, mely információt ad a berendezés adott időpontjában annak mechanikai tulajdonságairól.

A fentiekkel összhangban a Paksi Atomerőmű az 1., 2., 3. és 4. blokki primerköri főberendezések szerkezeti anyagai mechanikai tulajdonságainak folyamatos ismerete céljából 2011 óta műszerezett keménységmérést (Automated Ball Indentation Test, ABIT) és adott szempontok szerinti kiértékelést végeztet a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft-vel a kiválasztott főberendezések szilárdsági számítások keretében kijelölt helyein. A feladatokban a BZN Anyagvizsgálati Osztálya, valamint Szerkezetintegritási és Gyártástechnológia Osztálya vesz részt évről évre.

A mérési sorozat napjainkban is tart, általános célja a szilárdsági számításokban használt anyagtulajdonság (folyáshatár és szakítószilárdság) értékek ellenőrzése és az eredmények felhasználásával, illetve gépkönyvi és rendelkezésre álló irodalmi adatok, további korábbi már meglévő mérési adatok alapján az 50+10 éves üzemeltetési időszak végére várható anyagtulajdonság értékek becslése, továbbá, hogy bemutassa az adott anyagtulajdonság változás trendjét és összehasonlítsa az értékeket a PNAE G-7-002 szabvány [4] által megengedett értékekkel.

További cél a 2011-2019 között végzett helyszíni műszerezett keménységmérések eredményeinek ellenőrző visszazárása és a kapott eredmények elemzése a korábbi eredmények figyelembevételével. Az anyagtulajdonság változást jellemző trendek bemutatása közvetett mérésre alapuló eredményekkel.

Az első blokki mérések 2011 évében kezdődtek. Évente egy blokk mérésére volt lehetőség, blokkonként 6-10 berendezésnél, kvázi roncsolásmentesen. A viszonylag kevés számú mérési eredmény anyagspecifikus értékeléseket tett lehetővé, figyelembe véve a gyártóművi értékeket és a szakirodalomból vett eredményeket (az irodalomból vett adatok szintén anyagspecifikusak). A mérési pontok számának növekedésével 2020 évében lehetőség nyílt a meglévő becslések pontosítására és berendezés specifikus közelítésekre is. Ennek tükrében a közel 11 éves vizsgálatosorozat a 2011-2022 között elvégzett 1. – 4. blokki mérések eredményeinek összefoglalása, a levonható konzekvenciák tárgyalása, továbbá a felállított trend alapján az 50, ill. 60 évre vonatkozó szilárdsági tulajdonságok előrejelzése (becslése) berendezéscsoportokra került meghatározva a gőzfejlesztő, térfogatkiegénylítő tartály, melegági vezeték, melegági vezeték YP elágazás, melegági FET (főelzáró tolózár), hidegági FET, térfogatkompenzátor YP elágazás, reaktorfedél már kijelölt helyeit tekintve.

Az elemzések során a 2011 – 2022. évre végzett keménységmérési vizsgálatok eredményei, és a vonatkozó berendezések berendezéscsoportokra kigyűjtött gyártási műbizonylatokban szereplő szilárdsági jellemzői (folyáshatár és szakítószilárdság értékei) összegzésre kerültek az üzemidő függvényében, majd az 50, ill. 60 évre vonatkozó szilárdsági tulajdonságokra épülő extrapoláció alapját képezték. A szakirodalomban fellelhető adatok változása a gépkönyvi és a helyszíni keménységmérési eredményekre fektetett lineáris közelítésű trend változásának az ellenőrzésére és igazolására szolgált.

Az értékelés eredményeként a következő főbb megállapítások kerülhetnek levonásra:

- A bemutatott mért értékek a méréshez, illetve a mérési módszerhez tartozó hiba tartományába esnek. Ennek alapján azt lehet megállapítani, hogy az értékek esetleges trendje e tartományon belül marad, és arra enged következtetni, hogy a szilárdsági számítások során figyelembe vett anyagjellemző értékek érvényesek maradnak 50, illetve 60 évre.
- Az eddig meghatározott trendek alapján kijelenthető, hogy a szilárdsági számítások során figyelembe vett anyagjellemző értékek érvényesek maradnak 50 ill. 60 évre vonatkozóan.
- A helyszíni keménységmérések eredményei és a gyártóművi adatok alapján becsült szilárdsági tulajdonságok alapján megállapítható, hogy mindegyik berendezéscsoport esetén az 50 és 60 évre becsült értékek megfelelnek a PNAE által előírt minimum feltételeknek.
- A becslés megbízhatóságának értékelése mutatja, hogy az 50 és 60 évre történő becslés esetén a 95% konfidencia tartomány is az előbb említett PNAE minimum előírás fölött helyezkedik el.
- Az 50, ill. 60 évre számolt megengedett feszültségintenzitási tényezők a vizsgált berendezéscsoportok esetében a PNAE szabvány alapján számított megengedett tervezési feszültségintenzitási tényezőktől magasabb értékeket vesznek fel, így erős bizonyossággal kijelenthető, hogy a meghosszabbított üzemidőre is biztosított a vizsgálat alá bevont berendezéscsoportok integritása.

A becslés bizonytalansága a mérési pontok növelésével csökkenthető, ezért a pontosabb becslés érdekében a helyszíni vizsgálatok folytatása javasolt, melyek során nyert adatmennyiség a Paksi Atomerőmű blokkjai üzemidő hosszabbításának megalapozásaként szolgálhat a jövőre nézve.

## Jelentős mértékű szilárdsági növekedést mutató atomerőművi anyagok vizsgálatának fejlesztése fő berendezésekre

A helyszíni műszerezett keménységmérések során egyes csővezetési és rendszeremlékek esetében a 08H18N10T, 08H18N12T, 10H18N9TL anyagokra a helyileg kapott szilárdsági jellemzők némely esetben magasabbak, mint a gépkönyvi adatok. A növekedés mértéke egyes esetekben jelentős is lehet. Ilyenek például a melegági vezetékek,

YP elágazások és a hideg- és melegági FET-ek (főelzáró tolózárok). Ezeknél a szerkezeti elemeknél felvetődik a kérdés: a magasabb értékek az elem kialakításából, igénybevételéből, esetleges öregedési folyamatokból származó anyagszerkezet-változás következménye, vagy a vizsgált szerkezeti elem a leállítás ellenére valamilyen magasabb feszültségállapotban van a vizsgálat alatt és a magasabb mért érték annak következménye-e, hogy a műszerezett feszültség mérési technika érzékeny a vizsgált anyag feszültségállapotára.

Ezen kérdések megválaszolását célozza meg jelen kutatás-fejlesztési projekt, melyben részt vesz a BZN Anyagvizsgáló Osztálya, valamint Szerkezetintegritási és Gyártástechnológia Osztálya.

A projekt 2022. évben indult, s futása során a jelentős mértékű szilárdsági növekedést mutató 08H18N10T és 08H18N12T anyagú elemek további okfeltáró vizsgálatát végezzük el, különös tekintettel az esetlegesen élettartamot korlátozó körülményekre, kiegészítve mikroszerkezeti (mikroszkópi) vizsgálatokkal és ferrittartalom méréssel. A helyszíni vizsgálatok megkezdése előtt előkészítő méréseket

szükséges végezni a már üzemelt alapanyagokon (főke-ringtető szivattyú vezetőkerék) és a Karbantartási Gyakorló Központban levő főke-ringtető vezetéken és tolózáron.

**Szávai Szabolcs, Rózsahegyi Péter**

*Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.*

### Irodalomjegyzék

- [1] SNETP STRATEGIC RESEARCH AND INNOVATION AGENDA, SRIA, July 2021, SNETP Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
- [2] Tranziens varrat-vizsgálat fejlesztési lehetőségeinek vizsgálata, Kutatás-fejlesztési jelentés, SZR-0352/2022/D1, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., 2022.
- [3] Használt Charpy próbatetek felhasználása komplex törésmechanikai jellemzők meghatározásához, Kutatás-fejlesztési zárójelentés, ENG-SZR-0352/2022/D1, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., 2022.
- [4] PNAE G-7-002-86: Rules of strength calculation for equipment and pipelines of nuclear power plants, 1989.



## 2023. évi MAROVISZ Díj átadása

a XIII. RAKK keretében valósul meg

2023. március 21 - 23. között.



**A kitüntetésre érdemesnek tartott személyekre javaslatot tehetnek 2023. február 17-ig, melyet juttassanak el a MAROVISZ titkárságára ([marovisz@marovisz.hu](mailto:marovisz@marovisz.hu)) és egyidejűleg küldjék meg a Kuratórium elnökének ([gati@uni-obuda.hu](mailto:gati@uni-obuda.hu)).**

Részletek a [MAROVISZ](#) oldalán!