

GŐZFEJLESZTŐ HŐÁTADÓ CSÖVEK SZERKEZETINTEGRITÁSI ÉRTÉKELÉSÉNEK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE A NYOMOTTVIZES ATOMERŐMŰVEKBEN

EVOLUTION OF STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF STEAM GENERATOR HEAT TRANSFER TUBES IN PRESSURIZED WATER REACTORS

Kasó Ferenc Áron*, Dr. Zwierczyk Péter Tamás**

ABSTRACT

The evaluation of degradation mechanisms in steam generator heat transfer tubes, the identification of failure modes, and the associated assessment methodologies have undergone significant developments compared to those applied in early pressurized water reactors. The objective of this study is to summarize the methodological approaches and found in the literature and present them in a structured format that is comprehensible even to non-expert readers. In addition to reviewing the evolution of assessment techniques, the study also highlights opportunities for further methodological development to improve early detection and monitoring of degradation processes.

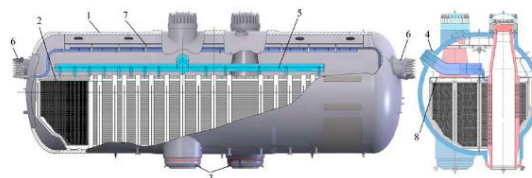
1. BEVEZETÉS

Az első kereskedelmi célú atomerőmű üzembe helyezése óta eltelt több mint hetven év során a reaktorok generációs fejlődéseken mentek keresztül. A kezdeti villamos- és hőenergiatermelő képesség többszörösére nőtt, a legnagyobb villamos teljesítményű reaktorok ma már meghaladják az 1600 MW-ot. [1]

A nyomottvizes reaktorok (pressurized water reactor - PWR) – amelyek vízűtésű és vízmoderálású rendszerek – az 1970-es évektől kezdődően váltak dominánssá a kereskedelmi célú villamosenergia-termelésben. Jelenleg az üzemelő reaktorok mintegy 73%-a [2] ezen technológia alapján működik.

Nyomottvizes reaktorok kétkörös felépítésűek, a reaktorból elszállított hőt a hűtőközeg a gőzfejlesztő hőátadó csövein keresztül adja át a primer körtől hermetikusan elválasztott szekunder körnek. A gőzfejlesztők kulcsszerepet töltenek be a hőátadásban, a radioaktív anyagok primer körön belüli tartásában, valamint a remanens hő elvonásában. A különböző tervezési filozófiák ellenére – például az orosz WWER (water - water energetic reactor, de általánosan elfogadott a VVER megnevezés is) típusú blokkok és az amerikai

eredetű PWR rendszerek között – a gőzfejlesztők alapvető funkciói azonosak [3].



1 - tartály, 2 - hőátadó csövek, 3 - hideg- és melegági kollektor, 4 - tápvíz csomópont, 5 - tápvíz elosztató kollektor, 6 - szerelőnyílás, 7 - cseppelválasztó

1. ábra. WWER 1000 gőzfejlesztő PGV-1000MKP [4]

Az 1. ábra az előbbi csoportba tartozó WWER-1000 típusoknál alkalmazott gőzfejlesztőt és annak részeit mutatja be.

A gőzfejlesztők belsejében található több ezer hőátadó csövek leggyakrabban U alakban [4] kerülnek beépítésre. Ezeket úgy tervezték, hogy elegendő hőátadó felület tartalékkal rendelkezzenek az erőmű tervezett élettartamára. [5] Amennyiben a hőátadó csöveket érő különféle degradációs mechanizmusok szivárgást idéznek elő, a sérült elemeket ki kell zárni a rendszerből a primer kör hermetikusságának fenntartása érdekében. A leghatékonyabb gyakorlat szerint az érintett csöveket mechanikusan lezárják, dugózzák, ezáltal megakadályozva a radioaktív közeg átszivárgását a szekunder körbe. Ugyanakkor a csőkizárások közvetlen hatással vannak az erőmű gazdasági és energetikai teljesítményére, mivel a rendelkezésre álló hőátadó felület csökkenése a blokk hatásfokának romlását és rosszabb esetben funkcióinak elvesztését eredményezheti. Ennek megfelelően a hőátadó csöveket érő hatások pontos ismerete, a tönkremeneteli mechanizmusok mélyreható megértése, valamint a csőkizárások számának minimalizálása kiemelt jelentőséggel bír a nyomottvizes reaktorok tervezése, üzemeltetése és üzemidő-hosszabbítása szempontjából. [6]

* óraadó, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék, kaso.ferenc@gt3.bme.hu

** egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék, z.peter@gt3.bme.hu

2. A HŐÁTADÓ CSÖVEK INTEGRITÁSVIZSGÁLATÁNAK FEJLŐDÉSE ÉS JÖVŐBELI IRÁNYAI

2.1. A hőátadó csövek meghibásodásának diagnosztikai és kezdeti értékelési módszerei

A gőzfejlesztők hőátadó csöveinek integritására vonatkozó előírások és követelmények már a nyomottvízes erőművek üzemeltetésének korai szakaszában megjelentek. E szabályozások elsődleges célja a csőtörések bekövetkezésének valószínűségének minimalizálása, valamint a csőtörés esetén a primer körből a szekunder körbe történő hűtőközeg-átáramlás mértékének csökkentése volt.

A hőátadó csöveket érő domináns mechanikai terhelést a primer és szekunder kör közötti nyomáskülönbségből adódó belső nyomás jelenti. A csövek gőzfejlesztőkhöz történő rögzítése – mechanikus feleremezés, hidraulikus tágitás vagy robbantásos hegesztés révén – további maradó feszültségeket eredményez, amelyek szintén hozzájárulhatnak a csövek tönkremeneteléhez. Emellett a normál üzemi körülmények között fennálló hőmérsékleti viszonyok, valamint az üzemi események során fellépő nyomás- és hőmérsékletingadozások is gyorsítják a degradációs folyamatokat. A csövek károsodásában jelentős szerepet játszanak továbbá a primer és szekunder oldali közegek kémiai összetétele és korrozív tulajdonságai.

A hőátadó csövek integritásának vizsgálatára a kezdeti időszakban különböző nem destruktív módszereket alkalmaztak. A WWER típusú blokkok esetében például levegővel, héliummal vagy fluoreszkáló nyomjelző anyaggal végzett buborékpróbák, valamint magas nyomású hidrosztatikus nyomáspróbák szolgálták a csőhibák detektálására. A hibásnak minősített csöveket ezt követően mechanikusan lezárták a kollektor oldaláról, ezzel biztosítva a primer kör hermetikusságát. [4], [7]

Mind a PWR, mind a WWER típusok esetében léteznek olyan korszerű, roncsolásmentes vizsgálati módszerek, amelyek nagy megbízhatósággal képesek detektálni nemcsak az átrepedt, hanem a szerkezeti hibával terhelt, de még nem szivárgó hőátadó csöveket is. A legszélesebb körben alkalmazott technika az örvényáramos vizsgálat, amelyet kiegészíthetnek ultrahangos, elektromágneses és különböző vizuális elveken alapuló ellenőrzési eljárásokkal. [4]

A roncsolásmentes vizsgálatok eredményeinek kiértékelése alapján szükséges a hőátadó csövek károsodott szakaszainak azonosítása, és indokolt esetben azok kizárása a primer körből a hermetikus zártág fenntartása érdekében. A szerkezetintegritási értékelések korai szakaszában jellemzően konzervatív szemléletet alkalmaztak, amely a biztonság elsődlegességét helyezte előtérbe. Ennek egyik példája a 40%-os kritérium, amely szerint a cső külső átmérőjének csökkenése nem haladhatja meg a 40%-ot; e határérték túllépése esetén a cső kizárásra került a rendszerből. [8]

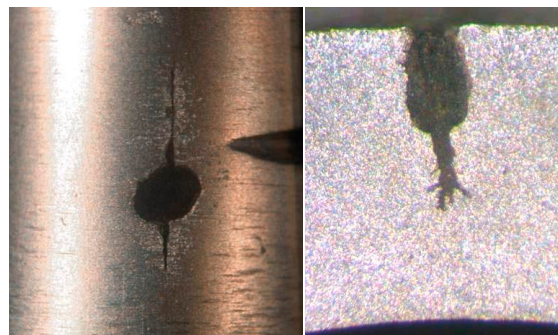
A meghibásodó hőátadó csövek nagy száma miatt, az Electric Power Research Institute (EPRI) összesítése szerint az Egyesült Államokban a 130 üzemelő PWR blokkból 78-ban [4] kellett gőzfejlesztőt cserélni. Az Oroszországban üzemelő WWER-440 blokkokban a hőátadó csövek 1,8 százalékát kellett ledugózni, míg a WWER-1000 esetében a csövek 0,7 százalékát 2005-ig bezárólag [4]. A paksi WWER-440 blokkok hasonló arányban rendelkeznek ledugózott hőátadó csövekkel a 2023-as adatok szerint [5].

2.2. Hőátadó csövek károsodási mechanizmusainak értékelése

Egy nyomottvízes blokkban 2-6 gőzfejlesztő helyezkedik el. Az EPRI által kiadott útmutató [8] szerint két típusra bontható a gőzfejlesztő hőátadó csövek vizsgálata. Minden elemet szükséges üzembe helyezés előtt átvizsgálni, illetve az első üzem közbeni vizsgálat során is a teljes terjedelmet szükséges ellenőrizni. További vizsgálatokra csak kampányok közötti időszakokban van lehetőség. Általánosan kijelenthető, ha nincs üzem során detektált szivárgás, akkor a csövek csak egy kisebb részét vizsgálják át előre meghatározott ütemterv szerint. Oroszországban a WWER reaktorokat a tervező intézet ajánlása szerint, amennyiben nincs korábban detektált degradációs állapotokban változás, akkor minden gőzfejlesztőt négyévente kell ellenőrizni annak érdekében, hogy 12 év alatt 100%-os lefedettséget [4] érjenek el. Az ellenőrzés terjedelmét és gyakoriságát növelni kell, ha a mintavételes vizsgálatok során degradációt észlelnek.

Az eltelt évtizedek alatt különböző degradációs mechanizmusokat azonosítottak, amelyek a hőátadó csövek tönkremeneteléhez vezetnek. WWER blokkok esetén a meghibásodások a következő okokra lettek visszavezetve [7]:

- gyártási folyamatból eredő károsodások,
- általános korrózió,
- pitting,
- feszültségkorróziós repedés,
- pitting és feszültségkorróziós repedés kombinációja (2. ábra).

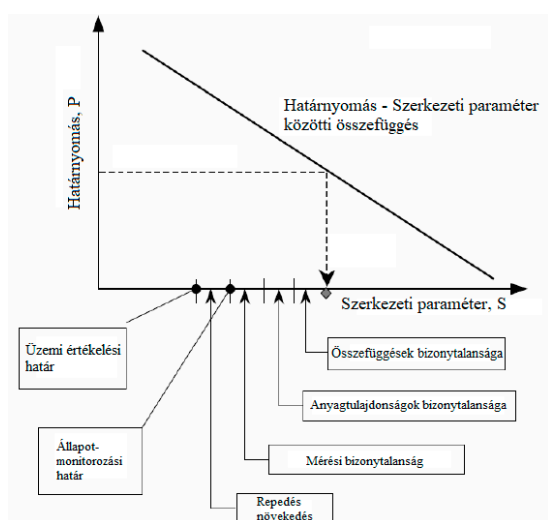


2. ábra. Feszültségkorróziós repedés és pitting kombinációja (Dél-ukrajnai atomerőmű) [7]

Ezen degradációs mechanizmusok részletes ismerete elengedhetetlen a tönkremeneteli folyamat időbeli azonosításához, valamint a csövek aktuális szerkezeti állapotának megbízható értékeléséhez. A károsodások értékelése során úgynevezett teljesítménykritériumok alkalmazása szükséges, amelyek meghatározzák, hogy a vizsgált cső megfelel-e a biztonságos üzemeltetéshez szükséges feltételeknek. [4], [7], [9]:

- szerkezetintegritási kritérium;
- üzem közbeni szivárgási kritérium;
- baleset indukált szivárgási kritérium.

A szerkezeti integritási kritérium teljesítése determinisztikus és valószínűségi megközelítés alapján egyaránt szükséges. A módszertan lényege, hogy a cső „burst pressure” (határnyomás, cső felhasadásához tartozó nyomás) értéke megfeleltethető legyen egy mérhető szerkezeti paraméternek, például a repedésméretnek vagy a falvastagságnak. Ez lehetővé teszi annak igazolását, hogy a cső a várható üzemi terhelések mellett biztonságosan tovább üzemeltethető. A kritérium alkalmazása során figyelembe kell venni a repedésterjedés előrejelzett alakulását, valamint a mérési eljárások és anyagjellemzők bizonytalanságait (3. ábra).



3. ábra. Határnyomás és a mérhető szerkezeti paraméter közötti összefüggés [7]

Az üzem közbeni szivárgási teljesítménykritérium előírja, hogy a primerköri közeg szivárgása normál üzemi körülmények között ne haladja meg a szabályozási előírásokban rögzített értékeket. A megfelelőség igazolása folyamatos monitoring és mért adatok alapján történik.

A baleseti szivárgási teljesítménykritérium célja, hogy korlátozza a primer-köri közeg szekunder körbe történő szivárgását olyan tervezési alaphelyzetek során, amelyek nem járnak csőtöréssel. A megfelelőség igazolása számításokon alapul, amelyek előre jelzik a különböző baleseti forgatókönyvek során várható szivárgás mértékét. [9]

WWER gőzfejlesztők esetén a csövek degradációjának előzetes értékelése a leállás előtt

történik, célja a meglévő hibák és új degradációs mechanizmusok azonosítása. Ez alapján határozzák meg a vizsgálati módszereket és mintavételi stratégiát. Az integritásértékelés minden leálláskor kötelező, és biztosítja, hogy a teljesítménykritériumok teljesüljenek. Két fő eleme az állapotmonitorozás és az üzemi értékelés. Az állapotmonitorozás a csövek aktuális állapotát vizsgálja az előző ciklusra vonatkozóan, míg az üzemi értékelés a következő időszakra prognosztizálja az integritás fenntarthatóságát. Nem megfelelő eredmények esetén okfeltárás és korrekció szükséges, melyek visszacsatolásként szolgálnak a jövőbeli vizsgálati tervekhez. [7]

Ha az üzemi értékelés során a teljesítménykritériumok sérülnek akkor az adott cső javítását vagy kizárását kell elvégezni. PWR blokkok esetén alkalmazásra kerülhetnek még különböző megelőző technikák, amik a csövek degradációját hivatottak lassítani, például az U alakú csövek lokális feszültségmentesítése vagy a melegégi hőmérséklet mérséklése, ezáltal a korrozív folyamatok lassítása. [4]

2.3. Új módszerek a hőátadó csövek szerkezetintegritási értékelésében és az alkalmazásukhoz szükséges feltételek

A második generációs nyomottvízes blokkok eredetileg tervezett élettartama 30-40 év volt. Az üzemidő-hosszabbítási programok révén azonban számos, az 1970-es és 1980-as években épült blokk további 20 évig is biztonságosan üzemeltethetővé vált. Az elkövetkező évtizedben esedékes újabb üzemidő-hosszabbítási ciklusok, valamint a hosszú távú üzemeltetés lehetőségét teremtene a hőátadó csövek degradációs mechanizmusainak értékelésére szolgáló módszerek továbbfejlesztésére. Az új műszaki eredmények, például a korszerű anyagvizsgálati technikák, numerikus modellezési eszközök és megbízhatóság-alapú értékelési eljárások integrálása révén lehetőség nyílik a szerkezetintegritási vizsgálatok pontosságának növelésére, valamint a csőkizárások számának optimalizálására.

BERGANT és szerzőtársai [10] tanulmányukban a gőzfejlesztő hőátadó csövek szerkezeti integritásának értékelésére koncentráltak, különös tekintettel a repedésekkel terhelt csövek meghibásodási mechanizmusaira. A hagyományos, bizonyos esetekben túlzottan konzervatív teljesítménykritériumok – mint például az ASME által előírt „40%-os falvastagság” szabály, illetve a képlékeny határterhelésen (plastic load limit) alapuló repedési nyomásértékekhez rendelt 3, illetve 1,4 biztonsági tényezők [9] – gyakran a szükségesnél több cső kizárását eredményezik, ami gazdasági és üzemeltetési szempontból is kedvezőtlen. A szerzők egy modernebb, realiztikusabb megközelítést javasolnak a „Failure Assessment Diagram” (FAD) alkalmazásával. A FAD módszer újdonsága abban rejlik, hogy integráltan kezeli a repedés által okozott törés és a túlzott képlékeny deformáció miatti tönkremenetel

közötti átmenetet, lehetővé téve a repedés típusának, geometriájának, anyagjellemzőinek és terhelési viszonyainak együttes figyelembevételét. Újabb kutatások [11], már a FAD különböző továbbfejlesztéseit javasolják az értékelés finomhangolására, figyelembe véve a hőátadó csövek valós anyagtulajdonságait és a károsodott elemek repedéseinek elhelyezkedését, orientáltságát, illetve geometriai tulajdonságait.

A hőátadó csövek szerkezetintegritásának korszerű értékelése érdekében elengedhetetlen a törésmechanikai jellemzők pontos meghatározása üzemi körülmények között. Ehhez további célzott anyagvizsgálatok szükségesek, különös tekintettel az üzemi hőmérsékleten (pl. 300 °C) érvényes mechanikai tulajdonságokra, valamint azok időbeli változásának nyomon követésére.

A témakörhöz kapcsolódóan végzett anyagvizsgálatok – mint például BERGANT és szerzőtársai [12] tanulmányában bemutatott eredmények – rámutatnak arra, hogy a hőátadó csövek törésmechanikai jellemzőinek pontos meghatározása elengedhetetlen a szerkezetintegritási értékelések megbízhatóságának növeléséhez. Az eredmények alapján megállapítható, hogy bár a vizsgált hőátadó csövek kedvező hőmérsékletfüggő törésmechanikai viselkedést mutatnak, az üzemi hőmérsékleten történő vizsgálatuk továbbra is kiemelt jelentőséggel bír. A hőmérsékletváltozás hatásainak figyelembevétele különösen fontos a repedéskritériumok pontos meghatározása és a hosszú távú üzemeltetési biztonság szempontjából.

A mérések és állapotmonitorozás mellett a numerikus szimulációk azért kiemelten fontosak, mert lehetővé teszik a repedések viselkedésének előrejelzését olyan bonyolult terhelési és geometriai helyzetekben is, amelyeket kísérletileg nehéz vagy költséges vizsgálni (4. ábra). Ez különösen lényeges a súlyos baleseti forgatókönyvek esetén, ahol a biztonsági tartalékok pontos ismerete elengedhetetlen. [13]

A hőátadó csövekben detektált repedések egymásra gyakorolt hatásának vizsgálata a szerkezetintegritási értékelések egyre fontosabb kutatási irányát képezi. [14] A kapcsolódó tanulmányban a szerzők a korábban kidolgozott analitikus egyenletek eredményeit hasonlítják össze numerikus törési eseteket modellező szimulációkkal, különböző repedésmélységek és geometriai elhelyezkedések esetén. A vizsgálat kiterjed az egymással párhuzamos, átfedő, nem átfedő, valamint részben átfedő repedésekre, lehetővé téve a repedések kölcsönhatásának pontosabb megértését és annak hatását a cső integritására.



4. ábra. Cső repedési nyomásának meghatározása kísérleti és numerikus módszerek segítségével [13]

A legújabb kutatási irányt képviseli a gőzfejlesztő hőátadó csöveinek digitális iker modelljének megalkotása. [15] Egy ilyen rendszer épít az elmúlt évtizedek kutatási eredményeire és műszaki fejlődésére. A modell két fő technológiát integrál: a kiterjesztett végeselemes módszert (XFEM) és gépi tanulási algoritmusokat. A kutatás során kísérleti adatok és szimulációs eredmények alapján összehasonlították a különböző előrejelzési módszerek pontosságát, rugalmasságát és tanítási költségét. A tanulmány új technikai alapot kínál a nukleáris berendezések állapotfelügyeletének és karbantartási stratégiáinak optimalizálásához.

3. ÖSSZEGLZÉS

A korszerű tudományos ismeretek és az üzemeltetés során gyűjtött tapasztalatok lehetőséget teremtenek a korábban alkalmazott szerkezetintegritási értékelési eljárások továbbfejlesztésére. Ezáltal lehetőség nyílik a hőátadó csövek különböző degradációs mechanizmusainak korai detektálására, megfelelő dokumentálására, valamint a folyamatok még hatékonyabb monitorozására. Mindez hozzájárul a biztonságos és gazdaságos üzemeltetés megvalósításához nemcsak a már működő atomerőművek esetében, hanem a tervezés alatt álló nagyerőművek, a negyedik generációs reaktorok, illetve az SMR (kis moduláris reaktor) projektek vonatkozásában is.

4. SUMMARY

Latest developments in the field of the heat transfer tubes and the operational experience provides an opportunity to further develop previously applied structural integrity assessment methodologies. These developments enable the early detection, accurate documentation, and more effective monitoring of various degradation mechanisms affecting heat transfer tubes. These improvements contribute to the safe and economically efficient operation not only of existing nuclear power plants, but also of facilities under design, including large-scale reactors, fourth-generation systems, and small modular reactor (SMR) projects.

6. IRODALOM

- [1] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION REACTOR DATABASE <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary> [elérés: 2025.10.08.]
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Nuclear Power Reactors in the World – 2025 Edition* Reference Data Series No. 2 Bécs, 2025, <https://doi.org/10.61092/iaea.lg28-w3uk>
- [3] CACUCI D. G. (Ed.): *Handbook of Nuclear Engineering, Vols. 1–5*, Springer Science+Business Media, New York, 2010, ISBN: 978-0-387-9830-7

- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators*, IAEA-TECDOC-1668, Bécs, 2011, ISBN 978-92-0-121410-2 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1668_web.pdf [elérés: 2025.10.08.]
- [5] KATONA T.J., BIRO Á., RÁTKAI S.: *Feasibility of Safe Operation of WWER-440-Type Nuclear Power Plants for Up to 60–70 Years*, *Energies*, Vol. 16, 4170, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16104170>
- [6] SLUGEN V., VETERNIKOVA J. S., DOMANKOVA M., GAVALEC M., PETZOVA J., SLNEK D., DZUBINSKY M., SHUGAYLO O., SZENTHE I., GILLEMOT F., ZARAZOVSKII M., LYDMAN J., KOPRIVA R., SZAVAI Sz., SRBA O.: *VVER long-term operation – A review based on the material studies results from past and ongoing EU-supported research projects*, *Nuclear Engineering and Design* 435, 2025 <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113949>
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity*, IAEA-TECDOC-1577, IAEA, Bécs, 2007, ISBN 978-92-0-110307-9 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1577_web.pdf [elérés: 2025.10.08.]
- [8] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE: *Steam Generator Integrity Assessment Guidelines Revision 3*, EPRI, Palo Alto 2009 <https://www.nrc.gov/docs/ML1004/ML100480243.pdf> [elérés: 2025.10.08.]
- [9] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE: *Steam Generator Program Guidelines, NEI 97-06 [Rev. 3]*, Nuclear Energy Institute, Washington D.C., 2011 <https://www.nrc.gov/docs/ML1113/ML111310708.pdf> [elérés: 2025.10.08.]
- [10] BERGANT M. A., YAWNY A. A., PEREZ IPINA J. E.: *Failure Assessment Diagram in Structural Integrity Analysis of Steam Generator Tubes*, *Procedia Materials Science*, Vol. 8, pp. 128-138, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.056>
- [11] BERGANT M. A., YAWNY A. A., PEREZ IPINA J. E.: *A comparison of failure assessment diagram options for Inconel 690 and Incoloy 800 nuclear steam generator tubes*, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 140, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107310>
- [12] BERGANT M. A., YAWNY A. A., PEREZ IPINA J. E.: *J-resistance curves for Inconel 690 and Incoloy 800 nuclear steam generator tubes at room temperature and at 300 °C*, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 486, pp. 298–307., 2017 <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.01.040>
- [13] MOHANTY S., MAJUMDAR S., NATESAN K.: *Steam generator tube rupture simulation using extended finite element method*, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 305, pp. 697–705., 2016, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.06.031>
- [14] KIM J.-S., LEE M.-W., KIM Y.-J., KIM J.-W.: *Numerical validation of burst pressure estimation equations for steam generator tubes with multiple axial surface cracks*, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 51, pp. 579–587., 2019, <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.10.013>
- [15] JIANG Y., XIA H., ZHANG J., ZHU Y., ZHANG K., HUANG X., YIN W., JIANG P.: *Digital twin model generation for crack propagation in steam generator tubes*, *Methods and implementation*. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 224, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111697>