



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Nukleáris Technikai Intézet

**Az SCW-SMR reaktor koncepció állandósult állapotának  
és tranziens viselkedésének termohidraulikai vizsgálata**

**Investigations of the steady-state and transient thermal-hydraulics  
behaviour of the SCW-SMR reactor concept**

**PhD téziszfüzet**

Varju Tamás

Témavezető: Prof. Dr. Aszódi Attila

Budapest  
2026

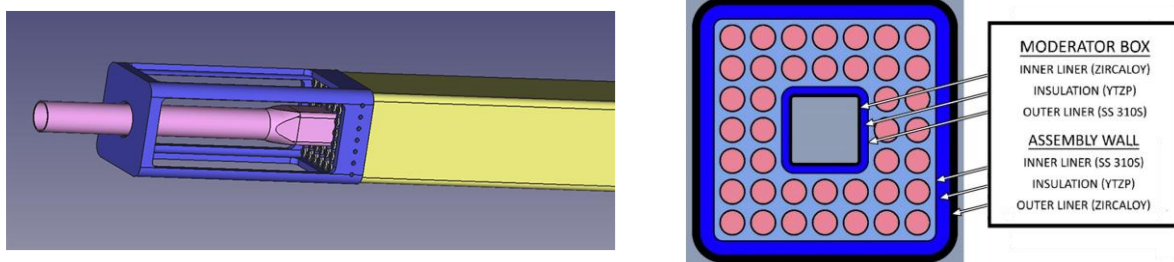


# 1. Bevezetés

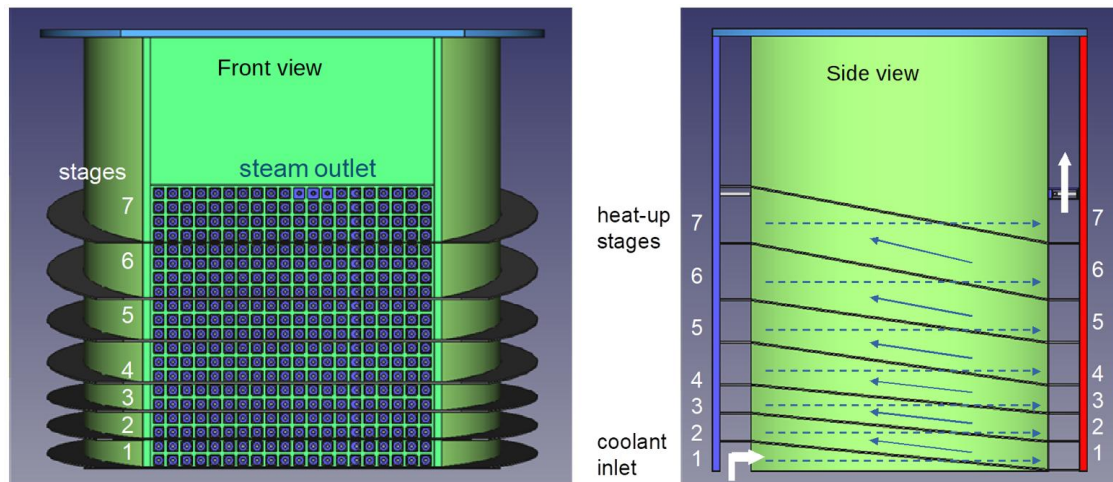
A szuperkritikus nyomású vízhűtésű reaktor (SuperCritical-Water-cooled Reactor - SCWR) a Generation IV International Forum (GIF) által további fejlesztésre és elemzésre kiválasztott negyedik generációs nukleáris reaktorok egyike (GIF, 2025; OECD/NEA, 2014). Az SCWR nagy előnye, hogy ez az egyetlen olyan GIF koncepció, amely technológiailag a jelenleg világszerte üzemben lévő vízhűtésű nukleáris reaktorokon és szuperkritikus nyomású fosszilis hőerőműveken alapul (Tillman, 2018). Következésképpen kihasználhatja ezeknek a létesítményeknek a kiterjedt tervezési, építési és üzemeltetési tapasztalatait, valamint a rendelkezésre álló technológiai berendezéseit. Ez jelentősen csökkenti a fejlesztési és építési költségeket és időt, amelyek egyúttal sokkal pontosabban tervezhetők is mint a nem vízhűtéses 4. generációs koncepciók esetén. További előnye, hogy a magas, legalább 500 °C-os kimeneti hűtőközeg hőmérséklet 43-50 % körüli hatásfok elérését teszi lehetővé, ami jelentős előrelépést jelent a hagyományos harmadik és 3+ generációs vízhűtésű reaktorokra jellemző 35-38 %-hoz képest, illetve új felhasználási területeket is megnyit (Schulenberg és Leung, 2023).

Az elmúlt évtizedekben számos SCWR koncepciót dolgoztak ki az Európai Unióban, Kanadában, Japánban, Kínában, Oroszországban, Dél-Koreában és az Egyesült Államokban. Ezek közül az egyik legfejlettebb az európai High Performance Light Water Reactor (HPLWR) (Schulenberg és Starflinger, 2012), amelyet nemzetközi együttműködés keretében dolgoztak ki. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) is részt vett az ehhez kapcsolódó kutatási és fejlesztési folyamatban, amelynek eredményeit számos folyóirat cikkben és két doktori disszertációban tették közzé (Reiss, 2011; Kiss, 2018). Más koncepciókhoz képest a HPLWR egyedülálló módon háromjáratú zóna konfigurációval rendelkezik. Ezt elsősorban azért vezették be, hogy a burkolat felületi hőmérséklete a magas kilépő hűtőközeg hőmérséklet ellenére is viszonylag alacsony maradjon. Az évek során elvégzett széles körű elemzések alapján bár ez a megoldás jelentősen csökkentette a burkolat maximális hőmérsékletét, azonban nem bizonyult elégségesnek. Számos más problémát is azonosítottak, mint például a remanens hő természetes cirkulációval történő elvonásának ellehetetlenülését (Schulenberg és Otic, 2021).

2020 és 2025 között az ECC-SMART projekt (ECC-SMART, 2025; ENEN, 2025) keretében megkezdődött egy új európai koncepció, a Supercritical Water-cooled Small Modular Reactor (SCW-SMR, lásd Ábra 1 és Ábra 2) (Schulenberg és Otic, 2021; Schulenberg és Otic, 2022) fejlesztése és elemzése. Ez a HPLWR továbbfejlesztett, kis moduláris változatának tekinthető, amely ötvözi az SCWR technológia és a kis moduláris reaktorok (SMR) előnyeit. A kezdeti tervezési fázisban a fejlesztők elsődleges célja az volt, hogy a HPLWR összes fontos gyengeségét orvosolják, és mindegyikre megfelelő műszaki megoldást találjanak.



Ábra 1: Üzemanyag kazetta (bal oldal: rögzítő elem (kék), kazetta fal (sárga), moderátor csatorna (pink) (Schulenberg and Otic, 2021); jobb oldal: keresztmetszeti nézet (Antók et al., 2024))



Ábra 2: Az SCW-SMR reaktortartályának belső felépítése a hűtőközeg áramlási útjával (szaggatott nyíl – áramlás a kazettákban; folytonos nyíl – áramlás a spirális csatornában) [P11]

Az SCW-SMR termikus teljesítménye 290 MW, a reaktortartály kimeneti nyomása 25 MPa, a bemeneti és kimeneti hőmérséklete pedig 280 °C, illetve 500 °C. A zóna téglatest geometriájú, és 400 vízszintesen elrendezett fűtőelemet tartalmaz. A második ábrán látható komplex zóna konfigurációt úgy tervezték, hogy hét felmelegedési szintből álljon, hasonlóan egy tipikus szuperkritikus nyomású fosszilis hőerőműhöz. A hideg tápvíz először moderátor szerepet tölt be és így kétszer áramlik át a zónán, miközben 310 °C-ra melegszik fel. Ezt követően lép be a hét egymást követő felmelegedési szintből álló hűtőközeg régióba (Ábra 2).

## 2. Célkitűzések

A javasolt komplex zónaelrendezés két fő célja az volt, hogy a HPLWR-ben megfigyelt magas burkolat hőmérsékleteket a szintek közötti keveredés elősegítésével (hét szint használata) csökkentsék, és hogy a remanens hő természetes cirkulációval történő elvonását (vízszintes kazetta elrendezés és köztük spirális csatornák használata) lehetővé tegyék.

A BME, és én személyesen is részt vettem az ECC-SMART projektben és az előzetes SCW-SMR koncepció kidolgozásában. A PhD keretében végzett kutatási munkám a koncepció termohidraulikai modellezésére és elemzésére összpontosított, melyhez az Aprós rendszerkódot használtam. Ezen elemzések elsődleges célja az volt, hogy megvizsgáljam a zóna és a reaktortartály viselkedését különféle üzemi és üzemzavari körülmények között, ellenőrizsem a fenti tervezési célok teljesülését, és értékeljem a HPLWR-hez képest elért javulást.

A részletes modell kidolgozása és az azzal végzett elemzések mellett az is célom volt, hogy az Aprós modellt fejlesztési eszközként is felhasználjam, hozzájárulva az eredeti reaktortartály konfiguráció továbbfejlesztéséhez, valamint a primerkör és a biztonsági rendszerek kidolgozásához, amelyek a projekt első részében még egyáltalán nem álltak rendelkezésre.

### 3. Kutatási módszertan

Doktori kutatásom során a finn VTT Kutatóintézet és a Fortum Oyj vállalat által fejlesztett Apros rendszerkódot használtam. Ezt világszerte, de különösen Európában különböző nukleáris és hagyományos erőművek és létesítmények determinisztikus biztonsági elemzéséhez használják. Emellett néhány teljesléptékű atomerőmű-szimulátor számítási motorjaként is szolgál. Az egyetemen a 2000-es évek eleje óta használjuk oktatási és kutatási célokra.

Az Apros már régóta képes szuperkritikus nyomású vízzel dolgozni (Kurki, 2008; Hänninen, 2009), és az elmúlt években számos alkalommal használták is SCW alapú rendszerek modellezésére, beleértve a HPLWR-t (Kurki és Seppälä, 2009; Schlagenhauser et al., 2010; Andreani et al., 2012). Szuperkritikus nyomású rendszer szimulációja során a kód lényegében továbbra is a hagyományos kétfázisú megoldót használja. Ugyanakkor bizonyos fejlesztésekre volt ehhez szükség, ahogy azt a fejlesztők a fent említett publikációikban bemutatták.

Doktori kutatásomat először egy sor benchmark elemzéssel kezdtem, amelynek két fő célja volt: egyrészt megmutatni, hogy az Apros kód képes megfelelően modellezni az SCW-SMR koncepcióban várható állapotokat, másrészt meghatározni az optimális modellbeállításokat. Ezen célokat szem előtt tartva két fő elemzéssorozatot hajtottam végre. Az első a szuperkritikus vízben végbemenő hőátadási folyamatokra összpontosított, míg a második a hidegágban bekövetkező, hűtőközeg-vesztéses (LOCA-típusú) kezdeti események modellezésével foglalkozott. Az Apros számítási eredményeimet kvalitatív módon értékeltem a mért adatokkal való összehasonlítással, valamint kvantitatív módon a Fast Fourier Transform Based Method (with Signal Mirroring) (FFTBM-SM) (Prošek és Mavko, 2009) és a Stochastic Approximation Ratio Based Method (SARBM) (Islamov és Ustinov, 2000) módszerek segítségével.

A kísérleti vizsgálatokat követően kifejlesztettem az SCW-SMR koncepció részletes Apros modelljét, beleértve a felmelegedési szinteket reprezentáló felhasználói komponenst. Ezt követően az SCW-SMR reaktorfizikai modellek fejlesztőivel együttműködve egy offline csatolási módszert dolgoztunk ki az Apros és Serpent 2 modellek között, majd iteratív számítások segítségével meghatároztuk a reaktorkoncepció névleges üzemállapotához tartozó paramétereket. Ezek az elemzések az egyes szinteken belül jelentős egyenlőtlenséget mutattak a kazetták teljesítmény-tömegáram arányában, ami magas hőmérsékleti egyenlőtlenséget, és így magas maximális burkolat-hőmérsékletet eredményezett. Ezen megfigyelések fényében később megnőveltem az alkalmazandó névleges tömegáramot és bevezettem egy a kazetták belépésénél alkalmazandó, az egyes pozíciókban eltérő átmérőjű szűkítő furatokat tartalmazó, tömegáram-hangoló lemezt, amelynek méretoptimalizálását is elvégeztem. Mindezzel az volt a célom, hogy egyenletesebb eloszlást érjek el a teljesítmény-tömegáram arányokban, és így csökkentsem az egyes kazettákban jelentkező hőmérsékleti csúcsokat. Ezen fejlesztések pozitív hatásait szintén csatolt Apros – Serpent 2 számításokkal igazoltuk.

Az állandósult állapot elemzését követően a kutatásomat annak részletes vizsgálatával folytattam, hogy az SCW-SMR esetén lehetséges-e a remanens hő természetes konvekcióval történő elvezetése egy hosszútávú teljes feszültségvesztéssel járó kezdeti eseményt követően. Az elemzést egy paramétervizsgálat keretében, különböző modell- és rendszerkonfigurációk mellett hajtottam végre, jellemzően 72 órás időtartamig, vagy a kazetta leszáradás bekövetkeztéig. PhD kutatásom utolsó lépésében pedig a vizsgálatokat az egyik hidegági vezeték guillotine-típusú, 200 %-os törésének elemzésével zártam, hogy a koncepció tranziens viselkedésével kapcsolatos ismereteket tovább bővítsem, többek között a lefúvatási és újraelárasztási folyamatokra vonatkozó tapasztalatokkal. Ez szintén egy paramétervizsgálat keretében valósult meg a szükséges és elégséges biztonsági rendszer konfiguráció feltérképezésének érdekében.

## 4. Tézispontok

A doktori kutatásom során elért és publikált, valamint a disszertációmban bemutatott új tudományos eredményeket az alábbi lista foglalja össze:

- I. Szuperkritikus nyomású víz közeggel, többféle geometriában (függőleges cső, függőleges pálca és pálcaköteg, valamint vízszintes cső), a peremfeltételek (belépő hőmérséklet, tömegfluxus, hőfluxus, nyomás) variálásával Apros elemzéseket hajtottam végre három kísérlet sorozat modellezésének céljából. A vizsgálat különféle normál és elfajult hőátadási állapotokat fedett le, illetve egyes esetekben pszeudo-kritikus fázisátmenetre is sor került. A kutatás során az Apros kódban rendelkezésre álló összes hőátadási korrelációt, illetve a 3- és 6-egyenletes megoldókat is megvizsgáltam. Ezzel átfogóan feltérképeztem az Apros, illetve a benne rendelkezésre álló korrelációk jelenlegi képességeit és korlátait. Megállapítottam, hogy ha az SCW közeg hőátadásának számításánál a legjobb becslésű modellt szükséges alkalmazni, akkor arra a Bishop, míg a konzervatív modellezéséhez a Mokry korreláció javasolt. [P1]
- II. Elkészítettem a PMK-2, illetve a PSB-VVER kísérleti berendezések Apros rendszerkódos modelljét, majd végrehajtottam három hidegági, kisméretű LOCA tranziens elemzését. Az eredmények kvalitatív és kvantitatív (SARBM, FFTBM, FFTBM-SM) módszerekkel történő értékelésével megmutattam, hogy az Apros nagy pontossággal képes reprodukálni az ilyen típusú eseményeket, ugyanakkor a hidroakkumulátor modellje alapbeállításokkal pontatlan lehet. Eredményeim alapján a fejlesztők az Apros kód hidroakkumulátor modelljét továbbfejlesztették, amely munkát én tesztelőként támogattam. A kísérleti elemzések jelentősen hozzájárultak az SCW-SMR optimális nodalizációjának, illetve a CCFL modell, a kritikus kiáramlás és az üzemzavari befecskendezés beállításainak megfelelő kiválasztásához, valamint személyes validációmhoz nukleáris biztonsági elemzőként [P2] [P3] [P4]
- III. A kísérleti elemzések tapasztalatai alapján a SARBM, FFTBM és FFTBM-SM módszerek használatával kapcsolatosan két javaslatot fogalmaztam meg: 1, A vízszint típusú paraméterek értékelése során globális helyett lokális referencia szint használata szükséges a konzisztens eredmények eléréséhez. 2, Az FFTBM-SM módszer esetén 0,2-es primerköri nyomásra vonatkozó szigorú kritérium érték használata javasolt a hagyományos FFTBM módszer 0,1-es értékével szemben. [P2] [P3] [P4]
- IV. Az SCW-SMR koncepció reaktortartályának CAD modellje alapján létrehoztam egy modellezési adatbázist, majd ennek segítségével elkészítettem az SCW-SMR részletes rendszerkód modelljét Apros-ban. A koncepció szerinti hét felmelegedési szint egyszerű modellezésének, illetve a későbbi egyszerű módosíthatóságának céljából kifejlesztettem egy Apros felhasználói komponenst. Ez egyetlen felmelegedési szintet reprezentál, egyedien paraméterezhető, és megteremti a termohidraulikai modell egyszerű csatolási lehetőségét külső reaktorfizikai modellekkel. Az általam elkészített reaktortartály modell teljes egészében figyelembe veszi az SCW-SMR igen bonyolult áramlási útvonalát, illetve az összes belső hőátadási folyamatát, amely a természetes cirkulációt igénylő tranziens elemzéseknél kulcsfontosságú. A Serpent reaktorfizikai modell fejlesztőivel együttműködve kidolgoztunk egy offline csatolási módszert a modellek között MATLAB környezetben. Ezt követően iteratív számításokat végeztünk a reaktorkoncepció állandósult állapotára és meghatároztuk a hőmérsékleti eloszlásokat a moderátorban, hűtőközegben, burkolatban és üzemanyagban kétféle zónatöltetre. [P5] [P9]

- V. Számítások segítségével megállapítottam, hogy az SCW-SMR alapkoncepció zónájában nagy hőmérsékleti egyenlőtlenségek, magas burkolat hőmérsékletek, illetve az eredetileg tervezettnél magasabb kilépő hőmérséklet figyelhető meg. A koncepció továbbfejlesztésének céljából javaslatot tettem a névleges forgalom 150 kg/s-ra való megemelésére, továbbá én vezettem be elsőként az inhomogén méreteloszlású belépő szűkítőket az SCW-SMR koncepcióba az Apros modellen keresztül és én vizsgáltam meg elsőként a hatásukat a hőmérséklet-eloszlásokra. Az Apros-Serpent kódrendszerrel elvégzett szűkítő optimalizációs eljárás eredményeként meghatároztam az optimális szűkítő átmérőket is. Az eredmények alapján a javasolt módosításokkal a maximális hűtőközeg hőmérséklet 560 °C-ról 505 °C-ra, a meleg csatorna maximális burkolat hőmérséklete 610 °C-ról kb. 520-525 °C-ra, míg a felső szintek meleg csatornájának maximális üzemanyag hőmérséklete kb. 100 °C-kal csökkenthető, miközben a hőmérséklet egyenlőtlenségek is minimalizálhatók. A módosítás eredményeként megnövekvő zóna nyomásesés mértékét is meghatároztam. [P6]
- VI. Megterveztem, majd elkészítettem az SCW-SMR koncepció primer körének, biztonsági rendszereinek (reaktorvédelem, turbina bypass lefűvató rendszer, izolációs kondenzátorok, hidroakkumulátorok), illetve a védelmeinek és irányítástechnikájának részletes Apros modelljét. Az elkészült teljes modell segítségével hosszútávú SBO elemzéseket (72 óráig) hajtottam végre egy érzékenységvizsgálat keretében. Az elemzésekkel igazoltam, hogy a figyelembe vett biztonsági rendszerek megfelelő működése esetén a természetes cirkuláció képes gyorsan és hatékonyan kialakulni a bonyolult reaktortartály koncepció ellenére, így a passzív hőelvonás rövid- és hosszútávon is biztosítható. Megmutattam továbbá, hogy ha egy hosszabb ideig fennálló SBO esemény a vízbetáplálás teljes hiányával párosul (tervezési alapon túli kezdeti esemény), akkor üzemanyag leszáradás következhet be, azonban csak több óra elteltével. A leszáradás kezdeti eseménytől számított időpontja erősen függ az izolációs kondenzátor magassági elhelyezkedésétől és a hőtadó csövek számától. A vizsgált esetekben (magasság: 1-20 m; csövek száma: 20-200) ez 7-25 óra között változott. [P7]
- VII. Az automatizált nyomáscsökkentő rendszerrel (ADS), az aktív kisnyomású üzemzavari befecskendező rendszerrel (LPIS) és a gravitációs befecskendező rendszerrel (GDCS) kibővített modell segítségével végrehajtottam a hidegági 200 %-os hűtőközegvesztéses üzemzavar részletes elemzését egy paramétervizsgálat keretében. Az elemzésekkel igazoltam, hogy a reaktorvédelem, az ADS lefűvató és a hidroakkumulátorok megfelelő működése esetén az üzemanyag, illetve a burkolatának túlhevülése elkerülhető az első néhány órában a reaktortartályban kialakuló belső cirkulációnak és a moderátor régió hatékony hőelvonásának köszönhetően. Megmutattam továbbá, hogy a rendszer nyomása kellő mértékben és ütemben lecsökkenthető az aktív vagy akár passzív kisnyomású befecskendezés megkezdéséhez, illetve meghatároztam ezen rendszerek kritériális paramétereit (LPIS:  $\geq 35$  kg/s tömegáram; GDCS:  $\geq 17.5-20.0$  m magasság) az üzemanyag leszáradás teljes elkerülésének és a hosszútávú hőelvonás biztosításának érdekében. Az elemzésekkel arra is rámutattam, hogy az üzemzavari hűtőközeg hatékonyabb hasznosítása érdekében a ZÜHR rendszereket érdemes a reaktortartály belső moderátor régióhoz kapcsolni a megszokott leszálló gyűrűs csatorna és felső keverőtér helyett. [P8]

## 5. Alkalmazási területek

A doktori kutatásom során kifejlesztett modellek és módszerek, illetve az elért eredmények a jövőben a nukleáris ipar több területén is hasznosíthatók.

Az I. és III. tézispontban megfogalmazott, a szuperkritikus nyomású vízre vonatkozó hőátadási korrelációkkal, illetve az FFTBM(-SM) és SARBM kvantitatív kiértékelési módszerek használatával kapcsolatosan megfogalmazott ajánlások más SCWR koncepciók modellezésénél, illetve bármilyen tranziens benchmark számítás értékelésénél hasznosíthatók. A jövőbeli kutatási projektjeimben én magam is építkezni fogok az itt összegyűjtött tapasztalatokra.

A kifejlesztett, részletes SCW-SMR Apros modell a koncepció kidolgozásának további fázisaiban is nagy segítséget nyújthat a különféle rendszerek méretezése, illetve a teljes koncepció biztonsági értékelése és demonstrálása során. A koncepció viselkedésével kapcsolatosan összegyűjtött tapasztalatok az SCW-SMR, a HPLWR és akár más nem európai koncepciók továbbfejlesztését is nagymértékben támogathatják. Továbbá, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által szervezett, és jelenleg folyamatban lévő CRP I31034 azonosító számú kutatási projekt keretében is hasznosíthatom az eddigi modellezési tapasztalatokat.

Az Apros – Serpent 2, illetve az Apros – SPNDYN kódrendszerekhez kidolgozott csatolási módszerek és eljárások átültethetők teljesen más, akár nem szuperkritikus víz technológián alapuló koncepciók, vagy jelenleg is üzemelő atomerőművi blokkok csatolt szimulációja során.

## 6. Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

### Folyóirat cikkek

- [P1] T. Varju, A. Csige, A. Kiss, V. Filonov, Y. Filonova, D. Fedorov, A. Pucciarelli, S. Kassem, W. Ambrosini, „Discussion and perspectives for improvements of heat transfer correlation capabilities for fluids at supercritical pressures”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 421, 113085, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113085>
- [P2] T. Varju, Á. Aranyosy, R. Orosz, V. Holl, T. Hajas, A. Aszódi, „Analysis of the IAEA SPE-4 small-break LOCA experiment with RELAP5, TRACE and APROS system codes”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 377, 111109, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111109>
- [P3] T. Varju, R. Orosz, Á. Aranyosy, V. Holl, T. Hajas, A. Aszódi, „Sensitivity analysis of the IAEA SPE-2 small-break LOCA experiment with RELAP5, TRACE and APROS system codes”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 388, 111630, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111630>
- [P4] T. Varju, R. Orosz, B. Kardos, B. Biró, A. Aszódi, „Analysis of a PSB-VVER small break LOCA experiment with APROS and TRACE system codes”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 206, 110662, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110662>
- [P5] T. Varju, B. Babcsány, P. Mészáros, Cs. Antók, Sz. Czifrus, „Coupled reactor physics and thermal-hydraulics analysis of an SCW-SMR reactor concept - Part I: Model development and demonstration”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 217, 111222, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111222>
- [P6] T. Varju, Cs. Antók, P. Mészáros, B. Babcsány, „Coupled reactor physics and thermal-hydraulics analysis of an SCW-SMR reactor concept - Part II: Improvement of the concept and sensitivity analyses”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 217, 111221, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111221>
- [P7] T. Varju, A. Aszódi, „Investigation of the passive heat removal from the SCW-SMR reactor core in the event of a Long-Term Station Blackout”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 444, 114349, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114349>
- [P8] T. Varju, A. Aszódi, „Parameter analysis of the cold-leg LBLOCA initiating event of the SCW-SMR reactor concept”, *Nuclear Engineering and Design*, (javított verzió beadva), 2025.

### Konferencia cikkek

- [P9] T. Varju, A. Kiss, Cs. Antók, B. Babcsány, I. Boros, P. Mészáros, Z. Bertesina, Sz. Czifrus, „Current results of BME NTI in the ECC-SMART project: different analysis on the SCW-SMR”, in *Proceedings of the 31st International Conference on Nuclear Engineering*, Prága, Csehország, Augusztus 4-8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE31-135760>

## 7. További tudományos közlemények

- [P10] X. Zhao, W. Ambrosini, A. Pucciarelli, S. Kassem, T. Varju, A. Kiss, I. Otic, Y. Filonova, V. Filonov, J. Zhu, J. Bi, „Report on the results of the benchmark exercise (D3.2)”, *ECC-SMART projekt jelentés*, 2023. URL: <https://enen.eu/wp-content/uploads/2021/03/D3.2-Report-on-the-results-of-the-benchmark-exercise.pdf>
- [P11] I. Otic, T. Schulenberg, W. Ambrosini, A. Pucciarelli, O. Chaaraoui, T. Varju, A. Kiss, B. Babcsány, Cs. Antók, P. Mészáros, Z. Bertesina, Sz. Czifrus, V. Filonov, D. Fedorov, Y. Filonova, Y. Dubyk, A. Nava-Dominguez, X. Zhao, „Report on the preconceptual studies on the core layout and passive safety concept of the SCW-SMR (D3.3)”, *ECC-SMART projekt jelentés*, 2024. URL: <https://enen.eu/wp-content/uploads/2021/03/D3.3-Report-on-the-preconceptual-studies-on-the-core-layout-and-passive-safety-concept-of-the-SCW-SMR.pdf>
- [P12] X. Zhao, P. Wu, J. Zhao, T. Varju, A. Nava-Dominguez, Y. Filonova, V. Filonov, W. Ambrosini, A. Pucciarelli, “Report on the improved system codes describing how they improved (D3.4)”, *ECC-SMART projekt jelentés*, 2024. URL: <https://enen.eu/wp-content/uploads/2021/03/D3.4-Report-on-the-improved-system-codes-describing-how-they-improved.pdf>
- [P13] R. Orosz, T. Varju, Á. Aranyosy, V. Holl, T. Hajas, A. Aszódi, „RELAP5, TRACE and APROS Model Benchmark for the IAEA SPE-4 Experiment”, *U.S. NRC, NUREG report: NUREG/IA-0533*, 2022. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2226/ML22266A054.pdf>
- [P14] R. Orosz, T. Varju, Á. Aranyosy, V. Holl, T. Hajas, A. Aszódi, „RELAP5, TRACE and APROS Model Benchmark for the IAEA SPE-2 Experiment”, *U.S. NRC, NUREG report: NUREG/IA-0544*, 2024. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2408/ML24082A018.pdf>
- [P15] B. Kardos, „PSB-VVER kísérletek modellezése az APROS rendszerkóddal”, *MSc diplomamunka*, BME, 2023. (Témavezető: T. Varju)
- [P16] P. Mészáros, „SCW-SMR koncepció reaktorfizikai és termohidraulikai vizsgálata Serpent 2, RELAP5 és Apros kódok segítségével”, *Tudományos Diákköri Konferencia (TDK)*, 2022. (Témavezetők: B. Babcsány, T. Varju)
- [P17] P. Mészáros, „SCW-SMR koncepció reaktorfizikai és termohidraulikai vizsgálata Serpent 2 és Apros kódok segítségével”, *MSc diplomamunka*, BME, 2023. (Témavezetők: T. Varju, B. Babcsány)
- [P18] Z. Bertesina, „Coupled thermal-hydraulics and neutron-physics analysis of an SCW-SMR reactor concept”, *MSc diplomamunka*, BME, 2023. (Témavezetők: B. Babcsány, T. Varju)
- [P19] T. Varju, Z. Bertesina, B. Babcsány, „Coupling of Apros and SPNDYN to analyse the SCW-SMR concept within ECC-SMART”, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors*, ISBN: 9791256081332, Pisa, Olaszország, Február 3-5, 2025. DOI: <https://doi.org/10.12871/9791256081332>

- [P20] Zs. J. Várkonyi, „SCW-SMR zónakoncepcióra vonatkozó csatolt egyensúlyi zónaszámítás aktualizált ciklus eleji töltetervvel”, *Tudományos Diákköri Konferencia (TDK)*, 2024. (Témavezetők: B. Babcsány, T. Varju) URL: <https://tdk.bme.hu/ConferenceFiles/TTK/2024/Paper/SCWSMR-zonakoncepciora-vonatkozoz-csatolt-20241103-201047.pdf?paperId=14089>
- [P21] B. Babcsány, Z. Bertesina, Zs. J. Várkonyi, P. Mészáros, Cs. Antók, T. Varju, „Equilibrium state core calculations for an SCW-SMR concept using the Apros-SPNDYN coupled code system”, *EPJ N – Nuclear Sciences & Technologies*, vol. 11, no. 76, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2025072>
- [P22] Zs. J. Várkonyi, T. Varju, Cs. Antók, B. Babcsány, „Coupled equilibrium state calculation for the SCW-SMR core concept with updated BoC core layout”, in *Proceedings of the European Nuclear Young Generation Forum (ENYGF'25)*, Zágráb, Horvátország, Június 2-6, 2025.
- [P23] A. Zsiros, T. Varju, B. Babcsány, „Further development of the Apros-SPNDYN coupled thermohydraulic-reactor physics code system for transient calculations for the SCW-SMR core concept”, in *Proceedings of the European Nuclear Young Generation Forum (ENYGF'25)*, Zágráb, Horvátország, Június 2-6, 2025.
- [P24] A. Zsiros, „Az Apros-SPNDYN csatolt termohidraulikai-reaktorfizikai programrendszer felkészítésének megkezdése az SCW-SMR zónakoncepcióra vonatkozó tranziens számításokra”, *BSc szakdolgozat*, BME, 2025. (Témavezetők: B. Babcsány, T. Varju)

## 8. Irodalmi hivatkozások

- M. Andreani, D. Bittermann, P. Marsault, O. Antoni, A. Keresztúri, M. Schlagenhauser, A. Manera, M. Seppälä, J. Kurki, „Evaluation of a preliminary safety concept for the HPLWR”, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 55, pp. 68-77, 2012.
- C. Antók, S. Czifrus, V. Giusti, „Neutronic calculations for preliminary core design of SCW-SMR”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 209, 2024.
- ECC-SMART, 2025. ECC-SMART projekt weboldal [Online]. Elérhető: <https://ecc-smart.eu/>.
- ENEN, 2025. ECC-SMART projekt oldal [Online]. Elérhető: <https://enen.eu/index.php/portfolio/ecc-smart-project/>.
- GIF, 2025. Generation IV International Forum - Super Critical Water Reactors (SCWR) [Online]. Elérhető: <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/super-critical-water-reactors-scwr>.
- M. Hänninen, „Phenomenological extensions to APROS six-equation model”, *VTT PUBLICATIONS* 720, 2009.
- IAEA, 2021. CRP I31034 announcement [Online]. Elérhető: <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-crp-advancing-thermal-hydraulic-models-and-predictive-tools-for-design-and-operation-of-scwr-prototypes-i31034>.
- R. Islamov, V. Ustinov, „Uncertainty analysis and stochastic approximation”, in *Proceedings of the International Meeting on Best-Estimate Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000)*, Washington, USA, November 2000.
- A. Kiss, „Thermal hydraulic investigations of the coolant flow in Supercritical Water-cooled Reactor relevant geometries”, *Phd Disszertáció*, BME, Budapest, 2018.
- J. Kurki, „Simulation of Thermal Hydraulic at Supercritical Pressures with APROS”, in *Proceedings of the International Youth Nuclear Congress 2008 (IYNC 2008)*, Interlaken, Svájc, Szeptember 20–26, 2008.
- J. Kurki, M. Seppälä, „Thermal Hydraulic Transient Analysis of the High Performance Light Water Reactor Using APROS and SMABRE”, in *Proceedings of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20)*, Espoo, Finnország, Augusztus 9-14, 2009.
- OECD/NEA, 2014. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems.
- A. Prošek, B. Mavko, „Quantitative Code Assessment with Fast Fourier Transform Based Method Improved by Signal Mirroring”, *U.S. NRC, NUREG/IA-0220 report*, Washington, 2009.
- T. Reiss, „Coupled Neutronics – Thermal hydraulics Analysis of SCWRs”, *Phd Disszertáció*, BME, Budapest, 2011.
- M. Schlagenhauser, T. Schulenberg, J. Starflinger, D. Bittermann, M. Andreani, „Design proposal and parametric study of the HPLWR safety system”, in *Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2010 ICAPP 10*, San Diego, USA, Június 13-17, 2010.
- T. Schulenberg, J. Starflinger, „High Performance Light Water Reactor: Design and Analyses”, *KIT Scientific Publishing*, 2012.
- T. Schulenberg, I. Otic, „Suggestion for design of a small modular SCWR”, in *Proceedings of the 10th International Symposium on SCWRs (ISSCWR-10)*, Prága, Csehország, Március 15-19, 2021.
- T. Schulenberg, I. Otic, „Concept of a Small Modular SCWR With Horizontal Fuel Assemblies”, *ASME Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, vol. 8, no. 3, 2022.
- T. Schulenberg, L.K.H. Leung, „Super-critical water-cooled reactors”, *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, Second edition, Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 259-284, 2023.
- D.A. Tillman, „Coal-Fired Power Plants: 2000–Present and Beyond”, *Coal-Fired Electricity and Emissions Control*, Butterworth-Heinemann, pp. 207-236, 2018.