

# A novovoronyezsi 6. zónán mért xenon tranziensek vizsgálata

Hegyí György, Maráczy Csaba, Temesvári Emese

Energiatudományi Kutatóközpont

1525 Budapest, 114 Pf. 49.

*A teljesítményreaktorok működését kísérő xenon folyamatok részletei ma már jól ismertek, szimulációjukra a nemzetközi és a hazai irodalomban különböző modellek és számítógépes eszközök találhatók. Mivel a feladat reaktorspecifikus, így fel kell készülni a tervezett VVER-1200 típus esetén felmerülő feladatokra ebből a szempontból is. Az utóbbi években induló új VVER-1000 és VVER-1200 blokkokon a fizikai indítás során az orosz szakemberek különböző xenon tranzienseket vizsgáltak egy új kísérleti módszerrel. Az elmúlt 10 évben a metodikáról egy sor publikáció jelent meg, legutóbb pedig a novovoronyezsi első VVER-1200 blokk fizikai indítása kapcsán találhattunk részletes adatokat.*

*A cikkben a publikációk alapján röviden bemutatjuk a közölt méréseket és az ismertett adatok alapján a KARATE-1200 kóddal végzett szimulációinkat.*

## Bevezetés

Az „érdektelen”  $^{135}\text{Xe}$ -izotóp először 1944. szeptember 26-án hozta kellemetlen helyzetbe a reaktortervezőket. Hanfordban a Nobel-díjas fizikus Enrico Fermi irányításával ezen a napon érte el minimális energiaszinten a kritikus állapotot a világ első teljesítményreaktora. A felterhelés során azonban a teljesítmény növekedése megállt, majd minden lehetséges operátori beavatkozás ellenére a reaktor leállt [1]. Az ok, amit Fermi és Wheeler később felismert, a nagy abszorpciós tulajdonsággal bíró mesterséges  $^{135}\text{Xe}$ -izotóp feldúsulása volt. Ez az izotóp a hasadási láncban ugyan kis gyakorisággal szerepel, de közvetett módon már jelentős mennyiségben keletkezik, és abszorpciós képessége óriási (**2,6-10<sup>6</sup> barn**) [2]. Jelenléte a reaktorban különösen akkor szembetűnő, ha elmarad a  $^{135}\text{Xe}$ -izotóp kiegészítése, pl. a reaktor leállítása után. Ekkor 6,7 óra felezési idővel továbbra is keletkezik (jód bomlása)  $^{135}\text{Xe}$ -izotóp, amit a 9,2 óra felezési idejű bomlás egymagában egy ideig nem tud ellensúlyozni. Tehát jelentős mennyiségű abszorbens halmozódik fel, ami megnehezíti a reaktor újraindítását. A reaktornak ezt a nehezen indítható állapotát, amely néhány órán át tartó tartalékreaktivitás-csökkenést jelent, jódgödörnek hívják.

Azóta a xenonmérgezés viselkedését a reaktorban stacioner és tranziens állapotban részletesen vizsgálják. Ismert, hogy bizonyos reaktorjellemzők esetén (geometria/ teljesítmény) a  $^{135}\text{Xe}$  koncentrációjának lengése és a reaktor instabilitása is előfordulhat. Kompakt zónák esetében – ide tartozik a VVER-440 reaktor is – a térbeli instabilitás nem jelentős [3].

A nagyobb teljesítményű VVER erőműveknél, ahol a zónák geometriai mérete is megnőtt, komoly feladat a xenon-viselkedés modellezése. Az AES-2006-os zónák esetében az időfüggő folyamatok vizsgálatának jelentőségét az is alátámasztja, hogy ezeket a hálózat szükségleteinek megfelelő terheléskövetésre is fel kell készíteni. A xenon folyamatok fontossága is szerepet játszik abban, hogy a 2000-es évek óta több, a fizikai indításhoz kapcsolódó új mérési módszert próbáltak ki a VVER-1000 reaktorokon. Az időfüggő xenon folyamatokhoz kapcsolódó kísérleti

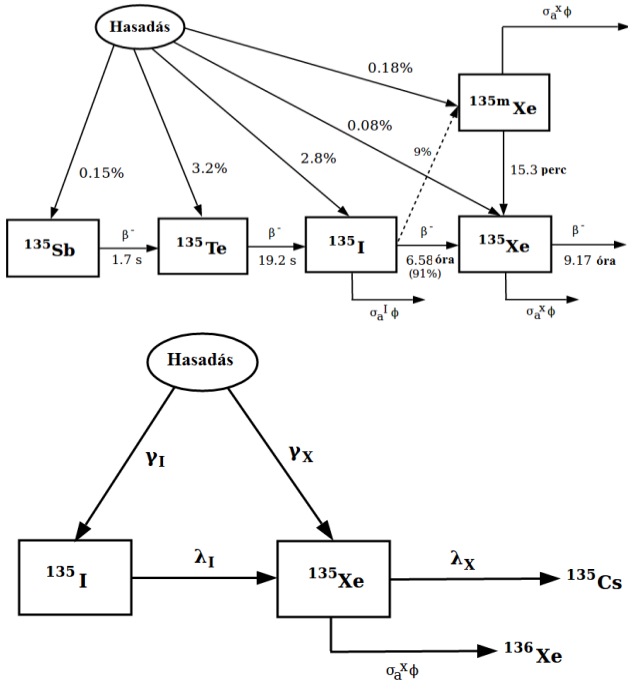
módszert különböző atomerőműveknél (VVER-1000-nél [5-9] és az új AES-2006-nál [10] is) alkalmazták.

Ebben a cikkben röviden bemutatjuk a xenon folyamatok modellezésére a KARATE-1200 programrendszerbe beépített modellt, majd az irodalomban található mérések alapján néhány teljesítményváltozással, axiális és radiális xenonlengéssel kapcsolatos mérést ismertetünk a saját szimulációinkkal együtt.

## Xenonmodell a KARATE-1200 programban

A  $^{135}\text{Xe}$  keletkezése a reaktorban bonyolult folyamat, amely függ a zónában található kazetták típusától és élettörténetétől (hasadóanyag-tartalomtól). Egy egyszerű, csak  $^{235}\text{U}$  magot tartalmazó termikus reaktorban a maghasadás során keletkező hasadási termékek közül a  $^{135}\text{Xe}$  keletkezését mutatja az 1. ábra. Figyeljünk fel arra a tényre, hogy a  $^{135}\text{Xe}$ -izotóp nagy része órákkal a megfelelő hasadás után jelenik meg a reaktorban, és jelentős abszorpciós hatáskeresztmetszete útján csak ekkor hat vissza a neutronfluxusra. A jód előtti elemek rövid felezési idejük miatt [ $^{135}\text{Sb}$  (1,7 s),  $^{135}\text{Te}$  (19,2 s)] úgy vehetők, hogy azok közvetlenül hasadásból keletkeznek. A gerjesztett xenon izomer [ $^{135m}\text{Xe}$  (15,3 perc)] felezési ideje is rövid, ezért a xenon jó közelítéssel közvetlenül a jódból keletkezik.

Az 1. ábrán bemutatott fizikai folyamatok a reaktor zónájának valamennyi pontjában lejátszódnak, ahol hasadásra alkalmas izotóp- és neutronfluxus található. Ugyanakkor a reaktor különböző pontjaiban a bomlási folyamatok időbeli alakulásai egymástól függetlenek, a szomszédos pontokban lezajló folyamatokat csak a neutronfluxus befolyásolja, ami azonban a neutrodiffúzióon keresztül térben változik. Így az izotópkoncentrációkra vonatkozó egyenletek közöséges időfüggő differenciál-egyenletek, melyekben néhány paraméter helyfüggő.



1. ábra: A xenon részletes (felül) és egyszerűsített (alul) keletkezési lánc

Ezeket a folyamatokat (adott hasadóanyagra, reaktornódusra) az alábbi közelítő egyenletekkel lehet leírni:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \gamma_I \sum_f \Phi(t) - \lambda_I I(t) \tag{1}$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \gamma_X \sum_f \Phi(t) + \lambda_I I(t) - \lambda_X X(t) - \sigma_a^X \Phi(t) X(t) \tag{2}$$

ahol:

- I(t) a t-edik időpillanatbeli <sup>135</sup>I-koncentráció (cm<sup>-3</sup>),
- X(t) a t-edik időpillanatbeli <sup>135</sup>Xe-koncentráció (cm<sup>-3</sup>),
- $\lambda_I$  a jód bomlási állandója (s<sup>-1</sup>),
- $\lambda_{Xe}$  a xenon bomlási állandója (s<sup>-1</sup>),
- $\gamma_I$  a jód hasadási hozama az adott nehézizotópra vonatkoztatva,
- $\gamma_{Xe}$  a xenon hasadási hozama az adott nehézizotópra vonatkoztatva,
- $\Phi(t)$  a t-edik időpillanatbeli fluxus (cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),
- $\sum_f$  a makroszkópikus hasadási hatáskeresztmetszet,
- $\sigma_a^X$  a xenon mikroszkópikus abszorpciós hatáskeresztmetszete.

A fenti egyenleteket a szakirodalomban ([4], [11]) részletesen elemezték. A következőkben csak néhány könnyen levezethető összefüggésre hívjuk fel a figyelmet, amelyek az egyenletek aszimptotikus megoldásai állandó fluxus esetére ( $\Phi = \text{const}$ ):

$$I_\infty = \frac{\gamma_I \sum_f \Phi_0}{\lambda_I}, \quad X_\infty = \frac{(\gamma_I + \gamma_X) \sum_f \Phi_0}{\lambda_X + \sigma_a^X \Phi_0}$$

A kampánymenet tervezése során a stacionárius megoldásokat alkalmazhatjuk.

Külön kell foglalkozni azokkal az eseményekkel, melynek során a reaktor állapotában hirtelen változások következnek be (felterhelés, leterhelés, nem tervezett abszorbens rúd mozgatása). Ilyen esetekben a stacioner diffúziós egyenletek nem írják le helyesen a reaktornódusokban lejátszódó folyamatokat; a gyors változások miatt a reaktor egyes térfogatelemeiben a fluxus hirtelen változik, ami befolyásolja a reaktormérgek lokális koncentrációját. Ilyen jelenséget már az ötvenes években is tapasztaltak nagyméretű teljesítményreaktorokban (1955-ben a Savannah River, pár évvel később a Shippingport reaktornál [12]). Ekkor a klasszikus szabályozó rendszerek, melyeket a reaktorteljesítmény állandó értéken tartására terveznek, alkalmatlanok, mivel beavatkozásuk könnyen a fluxusprofil axiális, esetleg radiális billegő mozgását okozhatják.

A KARATE-1200 programban, adott geometriafelosztás mellett, a kazetták izotóp-összetétele a kampánymenetnek megfelelő mértékben folyamatosan változik. A kevéscsoport-állandók paraméterezéséhez ezek legfontosabb elemeit folyamatosan követi a kód. Az <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U és a <sup>239</sup>Pu hasadóanyag stacioner koncentrációja is rendelkezésre áll - a kiegészi lépéseknek megfelelően. Hasonlóan a <sup>135</sup>Xe, és a <sup>135</sup>I egyensúlyi koncentráció is. Azonban opcionálisan meghívható egy olyan modell, melynek feladata a térfogatelemekben - adott időpontbeli a <sup>135</sup>Xe- és a <sup>135</sup>I-koncentrációk alapján - egy lépésben kiszámolni az új koncentrációkat tetszőleges idő után.

A modell feltételezi, hogy az adott időlépés során csak a xenon és a jód koncentrációja változik, a felhasznált további paraméterek (fluxus, hasadóanyag-tartalom, stb.) állandók egy számítási lépésben. A modellben a <sup>135</sup>Xe és a <sup>135</sup>I hasadási hozamait az <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U és a <sup>239</sup>Pu esetében közvetlenül figyelembe vesszük, míg a többi hasadóképes nehézizotóp esetében a hasadási hozamot az előző három számtani közepével közelítjük. A jód hasadási hozamai kumulatívok, a xenon hasadási hozamai függetlenek. Az <sup>235</sup>U és a <sup>239</sup>Pu termikus hasadását, az <sup>238</sup>U-nak pedig az epitermikus hasadását vesszük figyelembe a hasadási hozam modelljében.

## Xenon tranziensek mérése a VVER-1200 zónán

Az utóbbi időben a fizikai indításról megjelent orosz cikkek a megszokott mérések mellett (zónaszimmetria, szabályozó csoportok értékessége, reaktivitás-együtthatók) új típusú kísérletekről is informálnak, melyek a zónában lezajló xenon tranzienseket vizsgálják. Ezek a folyamatok alapvetően két nagy csoportba oszthatók:

- integrális tranziens esetében a zónában lévő xenon átlagos koncentrációja változik, például a fel- és leterhelés alkalmával,
- térbeli tranziens esetében a koncentrációeloszlás a zónán belül változik meg, például az SZBV rudak mozgatása miatt.

Az új mérési módszerről először VVER-1000 reaktorokkal kapcsolatban olvashattunk (pl.: a Tianwan atomerőmű (Kína) 1. blokkján [6], [8]). A kísérlet stacioner állapotból indul, ahol adott a teljesítmény, és kialakult az egyensúlyi xenonkoncentráció. Ezután az operátor adott teljesítményugrást generál, ami egy xenon tranzienszt eredményez. Az új stacioner állapot kialakulásáig a kritikus állapotot két,

alapvetően különböző módon tarthatjuk fent: vagy SZBV rúd mozgásával, vagy a bórsav-koncentráció változtatásával. Az első módszer nagy hátránya, hogy abban a zóna teljesítményének erős axiális változását okozzuk, amit nehéz pontosan mérni és biztonsági kérdéseket is felvet. Ez a probléma nem áll fenn a homogén módon elkeveredő bórsav esetében. A hivatkozott cikkek szerint az új VVER reaktorokban nagy pontossággal, gyorsan mérhető a bórsav-koncentráció, és az operátor lehetőségei is adottak a viszonylag gyors homogén koncentrációváltozás megvalósításához. Az eljárás nagy előnye, hogy a méréseket bármilyen reaktorteljesítmény-változásnál elvégezhetjük, ideértve a 100%-os teljesítményt is. Összességében tehát az integrális xenon tranziens mérése alatt a reaktor teljesítményét előírt szinten tartják, a kritikusságot pedig a bórsav-koncentráció időben folyamatos módosításával érik el, amelyet mérnek.

A térbeli xenon tranzienseket a nominálshoz közeli teljesítményen vizsgálták. Az axiális lengést a teljesítmény-detektorok jeleiből képzett ún. axiális offset (a reaktor felső és alsó tételének teljesítménykülönbsége osztva a reaktor teljesítményével, százalékban) időfüggő értékének megadásával, a radiálisat a mért kazettateljesítmények alapján határozták meg. Mindegyik mérési típust az első VVER-1200 indítási mérései előtt tesztelték.

## Kritikus bórsav-koncentráció változás fel-és leterhelés során

A VVER-1200 reaktorra négy mérést publikáltak [10]. Ezek közös jellemzője, hogy a leírásuk nem tartalmaz információt a teljesítményváltozás módjáról, csak a mértékére. Bár a mérések során a teljesítmény elérte a  $3200 \text{ MW}_t$  értéket is, nincs adat a termohidraulikai jellemzőkről egyik esetben sem. A méréssel kapcsolatban csak a kritikus bórsav-koncentráció változás időfüggése adott, más paraméterek, mint például az SZBV csoportok helyzete, nincsenek megadva.

Megjegyezzük, hogy az orosz irodalomban az aktív zóna hosszában adják meg a rúdhelyzetet. Például a félig kihúzott rúd helyzete 50%, ami a mi esetünkben azt jelenti, hogy a zóna aljától 187,5 cm-re kezdődik az SZBV rúd abszorbens része, alatta moderátor anyag van a csövekben. Kérdéses, hogy a méréseknél mi volt az a bórsav érték, amihez képest a különbséget képezték.

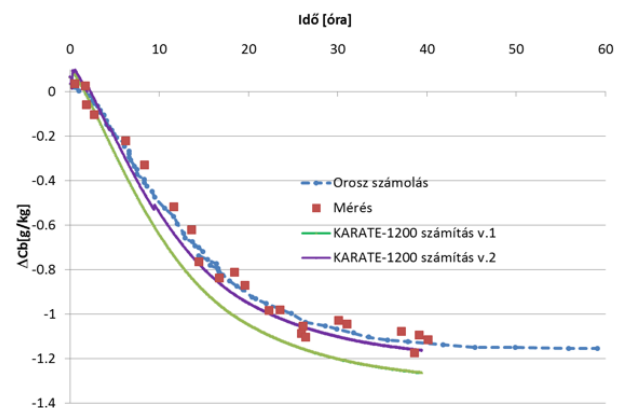
A hiányzó adatokra „ad hoc” feltételezéssel vettünk fel adatokat, és a közölt méréseket a következő módon szimuláltuk:

- A kritikus HZP (Hot Zero Power) állapot beállítása (teljesítmény: 1 MW, nyomás: 16,2 MPa, zóna belépő hőmérséklete:  $280^\circ\text{C}$ ,  $H_{11} = 300 \text{ cm}$ ,  $H_{12} = 100 \text{ cm}$ , a többi SZBV kint van a zónából).
- A 40 és a 75%-os teljesítmények esetében a nyomás: 16,2 MPa, a zóna belépő hőmérséklete:  $295^\circ\text{C}$ , a  $H_{12} = 100 \text{ cm}$ , a többi SZBV rúd kint van a zónából.
- A bórsav-koncentráció csökkentését, esetenként a rudak kihúzását oly módon állítottuk be, hogy a teljesítménynövekedés  $\sim 4,0 \text{ MW/perc}$  volt (hasonlóan a VVER-440-hez).
- Amikor a teljesítményszint eléri a mérésben definiált értéket, a zóna belépő hőmérséklete  $295^\circ\text{C}$  ( $3200 \text{ MW}_{th}$

esetében  $299^\circ\text{C}$ ), az SZBV rúdhelyzetek nem változnak. Ebben az állapotban került meghatározásra a bórsav-koncentráció referenciaértéke. A teljesítménynövelés során már a xenon tranziens opcióban számol a kód.

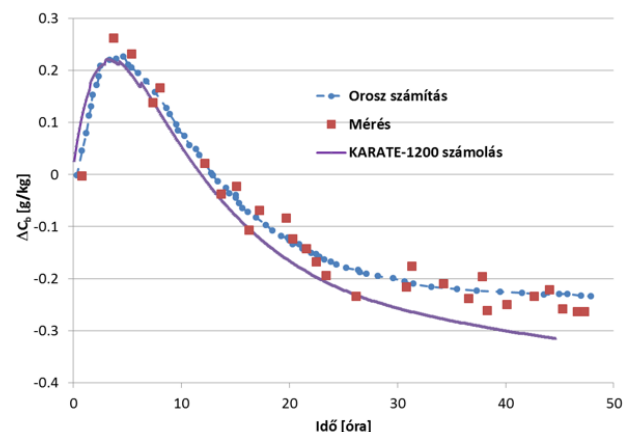
- Ettől a ponttól kezdve a teljesítmény- és az egyéb zónaparaméterek állandó értéken voltak, a xenon folyamatot a bórsav-koncentráció változásával követtük.

Az első esetben a fizikai indítás MET (minimálisan ellenőrizhető teljesítmény) állapotából indult a felterhelés 40%-os teljesítményre. Ebben az esetben a kezdeti állapothoz tartozó koncentrációk kicsik, a tranziens során felépülő xenon okoz „mérgezést”, reaktivitáscsökkenést, ezért a kezdeti kritikus bórsavat hígítani kellett (2. ábra). Ebben az esetben egy olyan stratégiát is kiszámoltunk, ahol a 12. SZBV csoport helyzete kis mértékben változott a tranziens alatt.

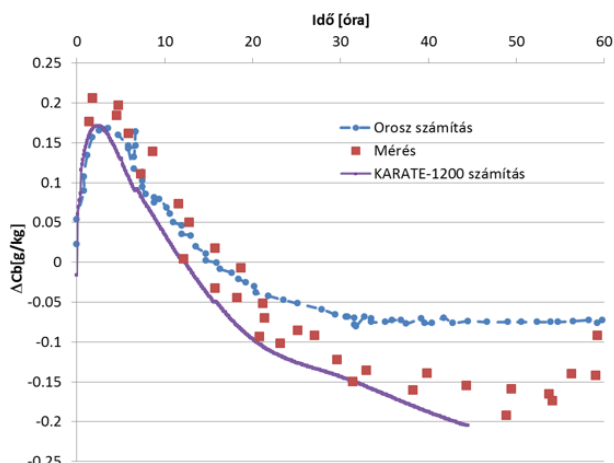


2. ábra: A xenon tranziens a 0-40%-os teljesítményváltozás esetén: a referenciaadatok (lásd [10] 1.ábra) és a szimuláció a KARATE-1200 kóddal. A kritikusságot a 2. esetben rúdmozgás is kísérte.

Két másik esetben az induló teljesítmény viszonylag nagy, azaz a jód és a xenon koncentrációja jelentős. Ezekben az esetekben kezdetben a fluxus (teljesítmény) növelése a stacioner xenon kiégését (csökkenését) okozza, ezért a reaktor szuperkritikus állapotba kerülne a bórsav-koncentráció növelése nélkül, de közben megnő a jód koncentrációja, és ez visszahat a xenonra. A teljesítmény növekedése nagyobb egyensúlyi koncentrációt is jelent, azaz a bór hígítása nélkül szubkritikus állapotba kerülne a reaktor (3-4. ábra).



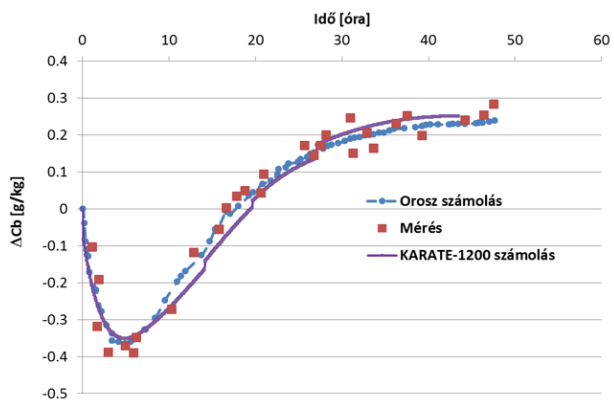
3. ábra: A xenon tranziens a 40-75%-os teljesítményváltozás esetén: a referenciaadatok (lásd [10] 2.a. ábra) és a szimuláció a KARATE-1200 kóddal



4. ábra: A xenon tranziens a 75-100%-os teljesítményváltozás esetén: a referenciaadatok (lásd [10] 2.c. ábra) és a szimuláció a KARATE-1200 kóddal.

A negyedik eset során a teljesítmény csökken, itt a fenti esetekkel ellentétes változást várunk és látunk a mérésben (5. ábra).

Annak ellenére, hogy a 2-5. ábrán bemutatott modellszámítások pontosításához szükséges az input adatok kiegészítése, megállapíthatjuk, a KARATE-1200 xenonmodellje jól visszaadja a mért időfüggést. Számításaink mind a négy integrális xenon folyamatra összhangban vannak az orosz eredményekkel.

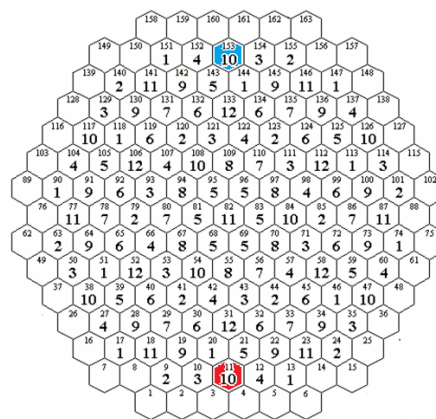


5. ábra: A xenon tranziens a 75-40%-os teljesítményváltozás esetén: a referenciaadatok (lásd [10] 2.b. ábra) és a szimuláció a KARATE-1200 kóddal.

## SZBV rúd gyors mozgásával gerjesztett xenonlengés mérése

Az orosz cikk [10] a térbeli xenon tranziensek két típusára ismertet egy-egy mérést. A kísérletekkel kapcsolatban szükségünk lesz az SZBV csoportok elhelyezkedésére a zónában, amit a 6. ábrán adunk meg.

Az axiális xenonlengést 70% körüli teljesítményen végezték. A stacioner állapotból a 12. SZBV csoportot – amely a teljesítményszabályozás reguláris eszköze – először lenyomták 60%-ra, majd 4 óra után felhúzták 90%-os állapotba. Ez utóbbi teljesítményemelkedést okoz, de a kísérlet során a bórsav hígításával a reaktivásbevitelt kompenzálták. A mérés időfüggését és eredményét csak ábrákon adták meg, amelyet így elég nehéz volt reprodukálni.

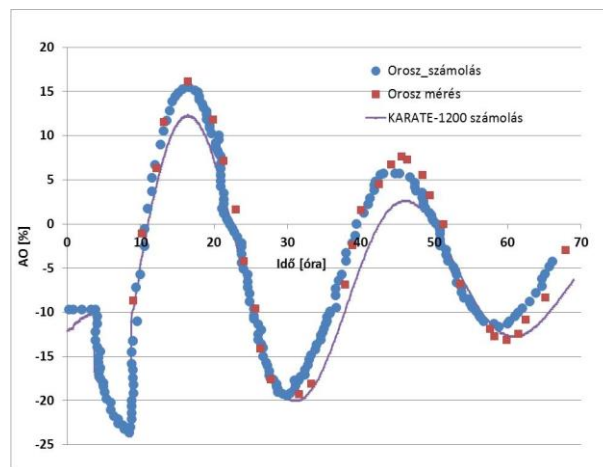


6. ábra: A tizenkét SZBV csoport radiális elhelyezkedése a VVER-1200 zónában. A 10. csoport alsó elemét (11-es kazetta, piros) használjuk a radiális mérés során a tranziens kiváltásához, párja a zóna tetején található 153-as kazetta (kék)

A kapott adatokat figyelembe véve a következő, kissé egyszerűsített feladatot számoltuk ki, és hasonlítottuk össze a kísérlet végeredményeként megadott axiális offset értékekkel:

- A kezdeti állapotban a zóna teljesítménye 2400 MW,  $H_{12} = 270$  cm a többi SZBV rúd kint van a zónából,
- A következő 3,6 órában a rúd lassan felfele mozog:  $H_{12} = 274$  cm, a teljesítmény változatlan,
- Ezután 24 perc alatt a 12. SZBV csoport rúdrait lenyomta az operátor  $H_{12} = 225$  cm-re. A reaktivitásváltozást bórozással kompenzálják, így a teljesítményt állandónak vesszük.
- A munkacsoportot (12. SZBV csoport) 4 órán keresztül lent tartják.
- A következő 30 percen a 12. SZBV csoportot kihúzzák, helyzete  $H_{12} = 337,50$  cm. A folyamat során a teljesítmény lassan 2240 MW-ra csökken.

A teljesítmény és a rúdhelyzet a kapott ábrán ennél bonyolultabban változik, ennek modellezésétől a nehezen leolvasható adatok miatt eltekintettünk. Ezzel feltételeztük, hogy a rövid idejű instabilitások nem befolyásolták a tranziens jellemzőit. Az egyszerűsített számolás eredményét és az orosz adatokat a 7. ábrán hasonlítjuk össze.



7. ábra: Axiális xenonlengés a 12. SZBV csoport mozgata során: a referenciaadatok (lásd [10] 3. ábra) és a szimuláció a KARATE-1200 kóddal.



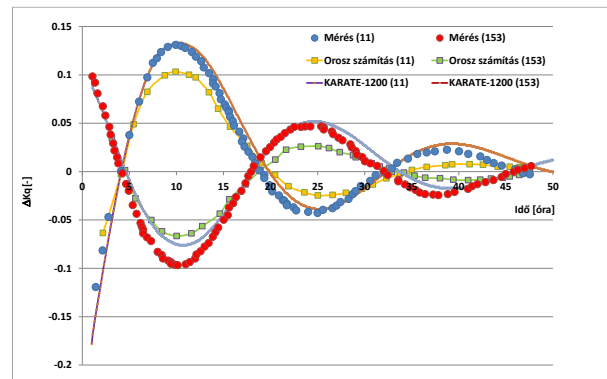
A radiális irányú tranziens a 10. SZBV csoport egy szélső elemének mozgásával gerjesztették, nevezetesen a zóna 11. sorszámú kazettájában lévő abszorbenst nyomták a zóna aljára (lásd a 6. ábrán a piros színű kazettát). Ez a csoport üzemszerűen nincs a zónában. Az adatközlés szerint a beejtett kazettát 4 órán keresztül tartották lent, majd a rúd gyors kihúzásával a teljesítményeloszlás „billegését” és így a xenoneloszlás hullámzását érték el. A mérés eredményeként a 11-es és a zónában vele átellenes pontban található 153-as kazetta (lásd a 6. ábrán a kék színű kazettát) teljesítményváltozását adták meg.

A szimuláció lépései a mi esetünkben a következők voltak:

- Kezdeti állapot: A zóna teljesítménye 2400 MW, az összes SZBV rúd kint van a zónából. Meghatározásra kerül a normált referencia-teljesítményeloszlás.
- Elindul a tranziens. A 10. SZB csoport egy elemét, amely a 11-es pozícióban található benyomjuk a zónába 4 órára, Erre az egy kazettára  $H=0$  cm.
- A leesett kazettát viszonylag gyorsan (0,1 óra alatt) kihúzzuk, miközben folytatódik a xenon tranziens számolása.
- A szimulációt további 48 órán keresztül követjük, miközben a reaktort a bórsavval tartjuk kritikus állapotban, a kezdeti teljesítményen. Minden számítási lépés során meghatározzuk a normált teljesítményeloszlást. Ez utóbbi szakasz tartozik a mérésbe.

A 8. ábrán látható a tranziens során mért és a számított kazettára átlagolt normált teljesítményeloszlás-változás a mérés előtti szimmetrikus referencia állapothoz képest.

A 7.-8. ábrán bemutatott modellszámítások esetében is igaz, hogy az input adatok közelítő jellege miatt csak kvalitatív következtetések levonására van módunk. Megállapíthatjuk, hogy a KARATE-1200 xenon modellje jó közelítéssel visszaadja a mért időfüggést. A radiális lengés esetében jobb a méréssel való egyezés, mint az orosz számítás.



8. ábra: Radiális xenonlengés egy kazetta kihúzása során: a referenciaadatok (lásd [10] 4. ábra) és a szimuláció a KARATE-1200 kóddal.

## Összefoglaló

A geometriai és teljesítményparaméterek alapján a VVER-1200 reaktorban a xenon tranziensek jelentős szerepet kaphatnak, amit a kísérletek is igazoltak. Ezekre a folyamatokra a kampányok tervezésekor és az üzemvitel során folyamatosan figyelni kell, amihez megfelelően verifikált és validált számítási kódokra van szükség. Ehhez a munkához a leghasznosabb háttér a valós fizikai környezetben, pontosan meghatározott körülmények között gondosan végrehajtott mérések biztosítják.

A közelmúltban több orosz tanulmány foglalkozott a VVER-1000 és VVER-1200 (AES-2006) reaktorokon végzett xenonmérések bemutatásával és azok számításával. Ezekből az anyagokból egy sor értékes információt nyerhetünk saját programrendszerünk teszteléséhez. Bár a mérések szimulációjához számos paramétert kellett feltételezni, megállapítható, hogy a kapott információk hatékonyan felhasználhatók voltak az újonnan kifejlesztés alatt álló kódrendszer verifikálásához.

## Irodalomjegyzék

- [1] "HISTORIC AMERICAN ENGINEERING RECORD HANFORD CULTURAL AND HISTORICAL RESOURCES PROGRAM", HAER No. WA. 164, DOE/RL-2001-16
- [2] Roggenkamp P.L. "The Influence of Xenon-135 on Reactor Operation \50 Years of Excellence in Science and Engineering at the Savannah River Site", Citizens for Nuclear Technology Awareness, Technical Symposium Proceedings, 2000.
- [3] Vigassy József: "A xenon folyamatok vizsgálata a reaktorbiztonság szempontjából", KFKI-1983-16 (HU ISSN 0369 5330 / ISBN 963 372 047 8)
- [4] Cs. Maráczy, A. Keresztúri, J. Gadó: "Parametrization of few-group constants." *Atomnaya Energiya* 60, 210 (1986)
- [5] S. P. Aver'yanova, et al. "Investigation of xenon transient processes in VVER-1000 at the Tianwan NPP (China)", *At. Energ.*, 105, No. 4, 183–190 (2008).
- [6] Artem Bikeev, Mikhail Kalugin, Anna Shcherenko, Denis Shkarovsky, "Simulation of VVER-1000 startup physics tests using the MCU Monte Carlo code", *Annals of Nuclear Energy* 117 (2018) 60–66 (doi.org/10.1016/j.anucene.2018.03.001)
- [7] P. E. Filimonov and S. P. Aver'yanova, "Maintaining equilibrium offset – effective method of suppressing a xenon oscillations in VVER-1000," *At. Energ.*, 90, No. 3, 231–233 (2001).
- [8] J.S. P. Aver'yanova, K. B. Kosourov, Yu. M. Semchenkov, et al., "Testing of improved control algorithms for VVER-1000 energy release in maneuvering regimes at the Tianwan NPP (China)," *At. Energ.*, 103, No. 5, 277–282 (2007).
- [9] S.S.Gorodkov, S.G.Dement'ev, D.S.Oleynik, "FULL-SCALE VVER-1000 MODEL FOR MONTE CARLO CALCULATION OF CORE NEUTRON CHARACTERISTICS. MCU-PD AND BIPR-7A RESULTS COMPARISON", 19th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, At St.St. Constantine and Elena, Bulgaria, September 21-25, 2009
- [10] S. P. Aver'yanova, N. S. Vokhmyanina, D. A. Zlobin, P. E. Filimonov, and V. P. Povarov, "Investigation of Transient Xenon Processes in VVER-1200 at the Novovoronezh NPP", *At. Energ.*, 124, No. 4, (2018). (doi.org/10.3139/124.110817) (Russian Original Vol. 124, No. 4, April, 2018, UDC 621.039.50)
- [11] Csom Gyula. „Atomerőművek üzemtana 1-2”, Műegyetemi Kiadó, 1997.
- [12] A.G.Ward, "The problem of flux instability in Large Power Reactors", CRRP-657, 1956, AECL-345, Canadian Report