

A Szuper-VVER reaktorokról

Szabó András, Maráczy Csaba, Hegyi György, Pataki István

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út. 29-33.

A Szuper-VVER reaktor összefoglaló elnevezés a jelenlegi VVER-1000 két továbbfejlesztett változatára vonatkozik, amelyek jellegzetességeik révén jobb üzemanyag-hasznosítást és magasabb hatásfokú körfolyamat csatolását teszik lehetővé. Az egyik ilyen koncepció az evolúciós Szuper-VVER, amelynél a neutronspektrum üzem közbeni változtatásával érhető el magasabb kiégés és konverziós-tényező; itt különböző profilírozású kazetták teljesítmény-eloszlását vizsgáltuk a SCALE programrendszerrel. Az egykörös, superkritikus nyomású, negyedik generációs VVER (VVER-SCP) a magasabb nyomással és maximális hőmérséklettel jobb hatásfokú körfolyamat csatolását teszi lehetővé, illetve a zárt üzemanyagciklus és a fegyver minőségű plutónium készletek felszámolására irányuló törekvések szempontjából is ígéretes. Ennél a kapcsolt neutronfizikai-termohidraulikai kódunk kezdeti eredményeit mutatjuk be.

Az evolúciós Szuper-VVER reaktor

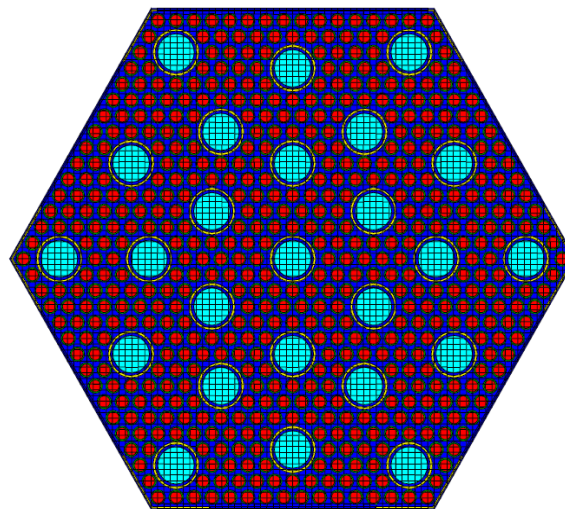
A spektrális eltolás

Az úgynevezett spektrális eltolás ötlete már évtizedekkel ezelőtt felmerült. A koncepció lényege, hogy a kampány elején a reaktor kemény neutronspektrummal üzemel, majd a kampány végén tolódik el a neutronspektrum a termikus energiatartományba. Ezzel a módszerrel a kampány első részében a neutronfelesleg egy része nem neutron abszorbensek által kötődik le, hanem az ^{238}U rezonanciáinak energiatartományában elnyelődve plutóniumot termel, amely a kampány második felében hasznosul, így növelve az üzemanyag-hasznosítás hatásfokát. A közelmúltban a VVER reaktorok egy lehetséges továbbfejlesztéseként folytattak kutatásokat egy spektrális eltolást alkalmazó reaktorral kapcsolatban, ez a koncepció az evolúciós Szuper-VVER nevet kapta [1].

Ez egy módosított VVER-1000 reaktor, melyben a neutronspektrum változtatását nagyméretű cirkónium szabályozóelemekkel végzik, amelyek moderátort szorítanak ki az üzemanyag-kazettából, és így egy nagymértékben alumoderált fűtőelem ráccsal érik el a kemény neutronspektrumot (1. ábra). A kampány során a szabályozóelemeket folyamatosan kivonva teszik a reaktort kritikussá, akár bórsav használata nélkül is. A zóna a teljesen kihúzott szabályozóelemekkel is alumerált, mivel az üzemanyag-moderátor arány ekkor megegyezik a VVER-1000 reaktorokéval.

A 4,125% dúsítású UO_2 fűtőelem-pasztillák átmérője 0,565 cm, a pálcák külső átmérője 0,68 cm, a burkolat anyaga nióbbiummal ötvözött cirkónium. A rácsosztás 0,864 cm, és az ilyen, rendkívül kis pálcákból álló, sűrű, kazettánként 546 fűtőelem pálcát tartalmazó rácsban 25 darab, 7 pálcányi helyet elfoglaló, 1,75 cm külső átmérőjű szabályozóelem van. A szabályozó elemek 61 kazettában bór-karbid szabályozó rudak és 60 kazettában cirkónium rudak, amelyek 2,2 cm külső átmérőjű, 0,1 cm falvastagságú

vezetőcsövekben mozognak. A teljes reaktor 163 kazettát tartalmaz, és termikus teljesítménye 3000 MW, ami megegyezik a VVER-1000 reaktorokéval.



1. ábra: A Super-VVER kazetta SCALE modellje.

Piros - fűtőelem-pasztilla; Sárga - Zr burkolat/szerkezeti anyag; Kék - moderátor; Türkiz - Zr szabályozóelem

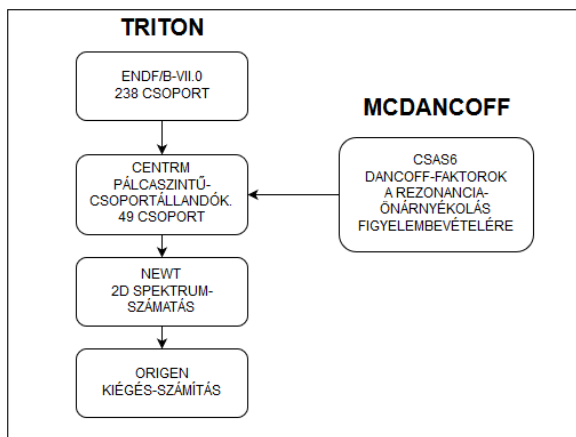
Az ötlet egyik problémája, hogy a teljesítmény-egyenlőtlenségek jelentősen megnőhetnek a kazettákon belül, így különböző kazetták teljesítményeloszlását vizsgáltuk a SCALE programrendszerrel [2].

A számítási rendszer ismertetése

A kazettán belüli egyenlőtlenségi tényezők vizsgálatához a SCALE reaktorfizikai programrendszert használtuk. A számítási séma a 2. ábrán látható. A számítás evaluált hatáskeresztmetszetekből indul ki, amelyekből a CENTRM modul számít aszimptotikus közelítésben pálcánkénti csoportállandókat, 49 energiacsoportban. A pálcaszintű csoportállandókkal a karakterisztikák módszerén alapuló

NEWT kód végez 2D spektrumszámítást a kazettára, és az így kapott spektrummal a kiégés-számítást az ORIGEN kód végzi. A kazetták környezetét fehér peremfeltétellel vettük figyelembe, ami azt jelenti, hogy a kazetta oldalain a be- és kilépő neutronáram megegyezik, és a belépő neutronfluxus izotróp. Minden spektrumszámításnál görbületi paraméter iterációval tettük a kazettát kritikussá.

Két fontos kiegészítést kell tennünk a számítási rendszer gerincéhez. Egyrészt a SCALE-ben a pálcaszintű csoportállandók számításakor alkalmazott aszimptotikus közelítés nem megfelelő egy ilyen irreguláris rácsnál, ezért a MCDANCOFF modulal Monte-Carlo számításokkal Dancoff-faktorokat számítottunk kiégetlen kazettákra, és a megfelelő pálcacsoportoknál ezek használatával korrigáltuk a csoportállandókat. A másik fontos kitétel, hogy a kampányszámítások során szimuláltuk a kazettában a szabályozóelemek kihúzását, mivel akkor várható a teljesítmény-egyenlőtlenségek maximuma. Itt azt feltételeztük, hogy a rudak kihúzása lineáris, és ekkor cseréltük ki a szabályozórudakat moderátorra.

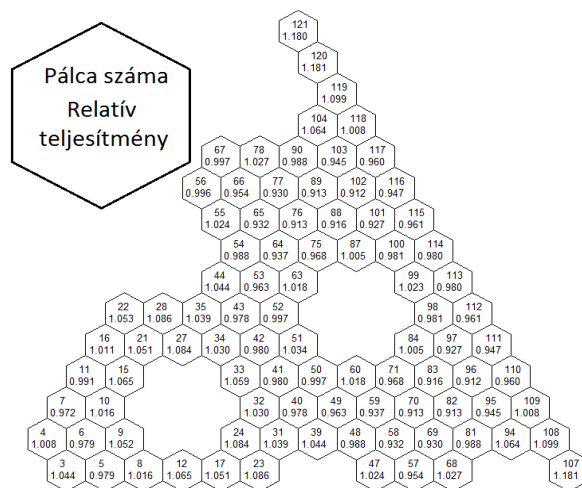


2. ábra: A SCALE számítási rendszere.

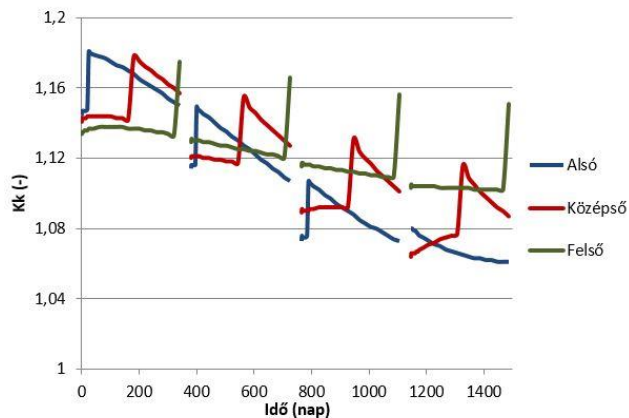
A számítás eredményei

Három különböző hőmérsékletű esetet (szegmenst) definiáltunk: a zóna/kazetta belépésénél, közepénél és kilépésénél. Mivel nem álltak rendelkezésre adatok, a Kalinin-3 reaktordinamikai tesztfeladat hőmérsékleteit használtuk fel. Fontos megjegyezni, hogy a vezetőcsövekben lévő moderátor hőmérséklete a modellben megegyezik a zóna belépő hőmérsékletével, mivel az csak a vezetőcsöveken keresztül melegszik. Négy, 352 effektív nap hosszú kampányt szimuláltunk, köztük 30 napos átrakási periódussal.

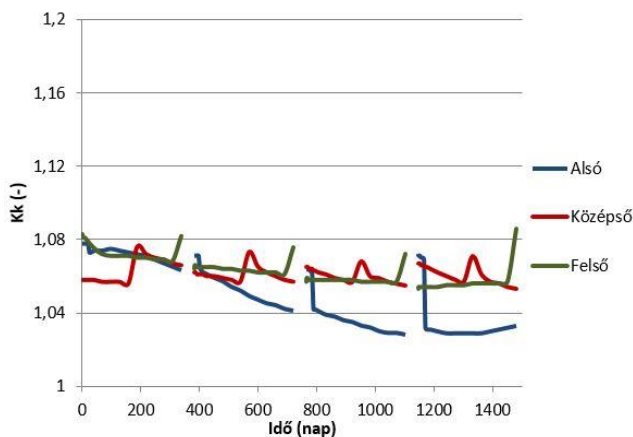
Először egységes dúsítású kazettákra vizsgáltuk a teljesítmény-eloszlásokat. A kazetta alsó részének közel 0 kiégésű, spektrumváltás utáni teljesítmény-eloszlása a 3. ábrán látható. Itt megfigyelhető, hogy a teljesítmény-egyenlőtlenségek maximuma a kazetta sarkánál található, és a szabályozóelemek környezetében is megnőtt, ez igaz volt az összes esetre. Ezek alapján kezdtünk el profilírozást kidolgozni. A 4. ábrán a profilírozatlan kazetták teljesítmény-egyenlőtlenségének maximumai láthatók az idő függvényében. Látható, hogy ezek a spektrumváltás után a legnagyobbak, és a kiégéssel csökkennek. Azt találtuk különböző profilírozások vizsgálatánál, hogy a kiégéssel nem feltétlen csökkennek az egyenlőtlenségek. Ez látható az 5. ábrán is, ahol a kazettán belüli teljesítmény-egyenlőtlenségi tényezők láthatóak az idő függvényében.



3. ábra: A szimmetria-szektor teljesítmény-eloszlása egy kazettában (0 kiégés, alsó szegmens, nincs profilírozás).



4. ábra: A kazettán belüli teljesítmény-egyenlőtlenségi tényező változása a kazetta pozíció és az idő függvényében, profilírozás nélkül.



5. ábra: A kazettán belüli teljesítmény-egyenlőtlenségi tényező változása a kazetta pozíció és az idő függvényében, profilírozással.

Ennek oka, hogy a spektrum térbeli alakja jelentősen megváltozik a spektrum-váltáskor. Ha a kiégés során a két spektrum időbeli eloszlása egyenlőtlen, az egyes pálcák hasadóanyag-tartalma is jelentősen eltérhet. Ez különösen igaz a kazetta felső részére, ahol az üzemanyag túlnyomórészt kemény spektrummal ég ki, majd a

kampány végén a spektrális eltolás következtében jelentősen megváltozik a spektrum.

Munkánk során több profilírozást is megvizsgáltunk. Mivel a kazetták alsó és felső részén a teljesítmény-egyenlőtlenlégek másképpen változnak, az előbbi nagyrészt lágy, utóbbi pedig kemény spektrummal ég ki, így végül axiális és radiális profilírozást is javasoltunk. Ezzel számításaink szerint elérhető a teljesítmény-egyenlőtlenlégek jelentős csökkentése, ám ez egyéb problémákat vet fel (pl. gyárthatóság). A teljesítmény-egyenlőtlenlégek részletesebb vizsgálatához természetesen az egész zónára kiterjedő pályaszintű számítások szükségesek.

A VVER-SCP reaktor

Az orosz SCWR

A VVER-SCP (vagy VVER-SKD) a negyedik generációs reaktorok egyik altípusának, a szuperkritikus vízzel hűtött reaktornak (SCWR, SuperCritical-Water-cooled Reactor) az orosz változata. A rendszer nyomása a reaktorban a víz kritikus nyomását meghaladja, így nem mutat fázisátalakulást, a nyomás fennmaradása esetén nincs forrásos krízis, csak a hőátadás bizonyos mértékű leromlása fordul elő. A tervezett magas kilépő hőmérséklet nagy termodinamikai hatásfokot eredményez. Az egykörös elképzelésben a kilépő hűtőközeg közvetlenül a turbinára vezethető a költséges gőzfejlesztők alkalmazása nélkül. Ez a koncepció gyors neutronspektrumú, amely magas, 0,9-es konverziós-tényezőt biztosít, és kiegészített VVER üzemanyagból és fegyver minőségű plutóniumból gyártott MOX (Mixed-OXide) üzemanyaggal működhet, ami egyszerre lépés a zárt üzemanyagciklus és a fegyver minőségű plutónium készletek felszámolása felé. Ezen túl a reaktor alkalmas lenne a nátrium-hűtésű BN reaktorok által termelt plutónium hasznosítására is. Létezik egy- és két-utas változat is, ami azt jelenti, hogy a hűtőközeg egyszer, illetve kétszer halad át a zónán, utóbbi a hőmérséklet-maximumok csökkentésének szempontjából ígéretes, mivel egy keverőtérben egyenlítődnek ki a hőmérsékletek. A koncepció kidolgozása azonban még kezdeti stádiumban van [3,4].

A reaktor termikus teljesítménye 3850MW, a hűtőközeg belépő hőmérséklete 280°C, kilépő hőmérséklete 540°C. A reaktor 245 darab, külső fallal rendelkező kazettát tartalmaz, a töltet rácsosztása 207 mm. A kazettafal külső kulcsmérete 205 mm, falvastagsága 2,25 mm. Egy kazettában 252 üzemanyagpálca, 18 vezetőcső a szabályozó rudaknak és egy központi mérőcső helyezkedik el. A pasztillák átmérője 9,4 mm, a MOX üzemanyag sűrűsége 9,3 g/cm³, ebből 0,7 g/cm³ a fegyver-plutónium. A burkolat külső átmérője 10,7 mm, falvastagsága 0,55 mm, anyaga EP172 acél.

Az SCWR reaktorok tervezésének egyik problémája, hogy a hűtőközeg sűrűsége a zónán való áthaladás során közel nyolcadára csökken, így a teljesítmény-egyenlőtlenlégek megnövekedhetnek. Ez elsősorban a fűtőelemek burkolata szempontjából kritikus. Emiatt a reaktorra csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számításokat tervezünk a KARATE programrendszerrel [5,6].

A számítási rendszer ismertetése

Távlati célunk a KARATE programrendszerrel végzett nodális csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számításokkal egyensúlyi kampány tervezése, ami lehetőséget biztosít a jelenlegi koncepciónak a korábbinál részletesebb vizsgálatára. Ennek lépései a következők:

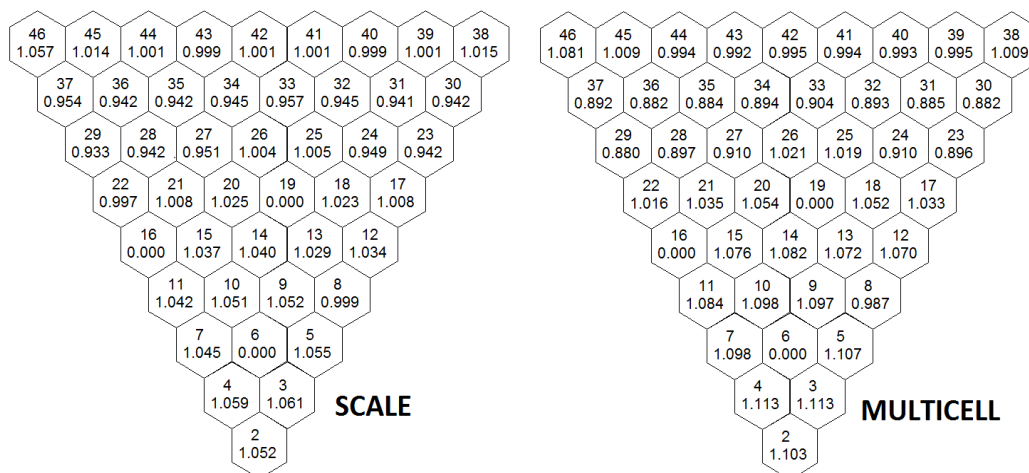
- A MULTICELL 2D transzport kód eredményeinek összehasonlítása nagy pontosságú SCALE-NEWT számításokkal. Ez azért szükséges, mert a MULTICELL kódot termikus reaktorok számítására fejlesztették ki és validálták.
- A fűtőelemkazetták diffúziós csoportállandóinak számítása a MULTICELL programmal és azok paraméterezésének kidolgozása. Itt nagymértékben támaszkodunk az irodalmi adatokra és az intézetben szerzett tapasztalatokra.
- A csoportállandókat felhasználva a szuperkritikus KARATE nodális csatolt neutronfizikai-termohidraulikai kóddal 3D számítások, majd ezek alapján egyensúlyi kampány kidolgozása.
- Konzervatív forrócsatorna-számítások a 3D nodális számítások eredményei alapján.

Eddigi számítási eredmények

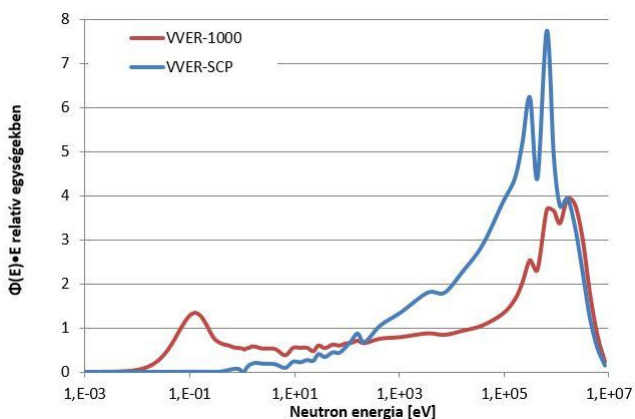
A SCALE-NEWT MULTICELL összehasonlításokat különböző, az áramlási útvonal mentén különböző hőmérsékletű rétegeket definiálva végeztük. Az 6. ábrán a programokkal kapott teljesítmény-eloszlások láthatók. Az eltérések maximuma 5%, ami alapján a MULTICELL kód elfogadható pontossággal modellezi a kazettát. Ezt követően ismételt számításokkal csoportállandókat hoztunk létre, majd paramétereztük azokat a következő paraméterek függvényében:

- A fűtőelemkazetták kiegészése
- A szubcsatornában áramló hűtőközeg sűrűsége
- A vezetőcsőben áramló hűtőközeg sűrűsége
- A kazettafalak közti hűtőközeg sűrűsége
- A fűtőelemek átlaghőmérséklete
- A ¹³⁵Xe koncentrációja
- A ¹⁴⁹Sm koncentrációja
- A ²³⁹Pu koncentrációja
- A szabályozórudak pozíciója.

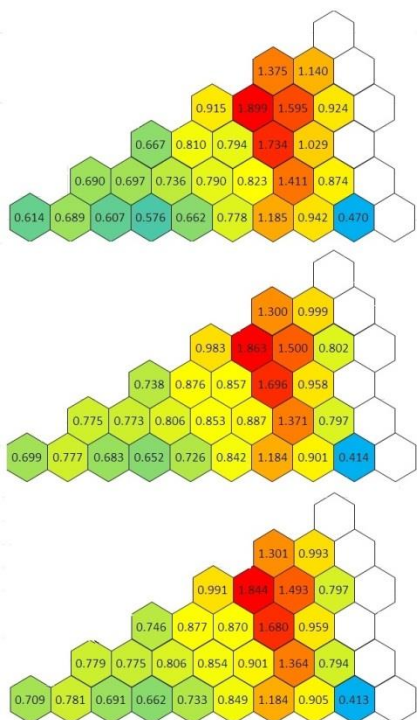
A vezetőcsövek és a kazettafal hűtőközegének sűrűségét azért vettük külön paraméternek, mivel csak a vezetőcsővön, illetve a kazettafalon keresztül melegegnek. Mivel a neutronspektrum gyors, ami jelentősen eltér a jelenlegi VVER reaktorokétól (7. ábra), így egyértelműen indokolt a többscsoport-közelítés. Emiatt kétfő-, négy- és hatscsoport-állandókat hoztunk létre. A többscsoport közelítést a KIKO3DMG [7] kóddal, a kétutas áramlási útvonalaknak megfelelő zónamoddellen végzett számítások is indokolják. Ennek eredményei a 8. ábrán láthatók. A hat csoport értékekhez képest a kazettánkénti teljesítmény-egyenlőtlenlégek maximális eltérése két csoport esetén 14,7%, 4 csoport esetén csak 1,9%.



6. ábra: A kazetta szimmetria-szektorának teljesítményeloszlása.



7. ábra: Egy VVER-1000 és egy VVER-SCP reaktorban lévő fűtőelempszilla neutronspektrumának összehasonlítása 0 kiégés esetén.



8. ábra: A kazettánkénti teljesítményegyenlőtlenségek a zóna szimmetriaszektorában. Fentről lefele: kettő, négy, illetve hat energiacsoport.

A csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számításokat a KARATE GLOBUS, a KIKO3DMG és a szuperkritikus KARATE-termohidraulika nodális kódok összekapcsolásával tervezzük. A maximális burkolathőmérsékletek uralása céljából a kazetták bemenetére szánt szűkítőket használhatjuk a zóna forgalomeloszlásának hangolására. A kiégés során teljesítmény-átrendeződés jön létre a zónában, amely a forgalomeloszlás változásán keresztül is kihat a burkolathőmérsékletekre. A termohidraulikai modul a forgalomeloszlás megváltozásának figyelembevételére a hűtővíz nyomásesés számítását is elvégzi, amely tartalmazza a lokális nyomáseséseket és az elosztott nyomásesést is a zóna mentén. A VVER-SCP reaktor kazettaiban a jó hűtőközeg-keveredés érdekében az eredetileg a fémhűtésű gyorsreaktorokban használt helikális drót távtartókat alkalmaznak, melynek elosztott nyomásesés számítására Rehme korrelációját használjuk.

Ahogy már korábban említettük, a koncepció nem egészen kidolgozott. A termohidraulika modellhez nem állnak rendelkezésre részletesen kidolgozott áramlási útvonalak, mivel ezek kutatása jelenleg is folyik, így a kapcsolt számításokhoz a modellt a részletesen megtervezett HPLWR háromutas áramlási útvonalai alapján dolgozzuk ki.

Összefoglalás

Az evolúciós Szuper-VVER reaktor esetében - amelynél a neutronspektrum üzem közbeni változtatásával érhető el magasabb kiégés és konverziós-tényező - a kazettán belüli egyenlőtlenségi tényező csökkentésére radiális és axiális dúsításprofilozást javasoltunk a SCALE programrendszerrel elvégzett számítások alapján. Az egykörös, szuperkritikus nyomású, negyedik generációs, MOX üzemanyaggal tervezett VVER-SCP számítási modelljének több elemét létrehoztuk, javaslatot tettünk a részletesen kidolgozott európai HPLWR reaktor áramlási útjainak alkalmazására. A későbbiekben a több energiacsoportot alkalmazó nodális kampányszámításaink segítségével vizsgáljuk az ilyen reaktorok esetében kritikus fontosságú üregtényezőt is.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap támogatásával, a VKSZ_14-1-2015-0021 azonosító számú Nemzeti Nukleáris Kutatási Program keretében készült.

Irodalomjegyzék

- [1] Pavel Teplov et al.: *The main characteristic of the evolution project SuperVVER with spectrum shift regulation*, *Kerntechnik*, August, Vol. 78, No. 4, Pages 285-291
- [2] Oak Ridge National Laboratory (2011): *Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, Manual, ORNL/TM-2005/39 Version 6.1*
- [3] S. B. Rhyzov et al.: *Concept of a single-circuit RP with vessel type supercritical water-cooled reactor*, *The 5th international symposium on SCWR (ISSCWR-5)*, Vancouver, British Columbia, Canada, March 13-16, 2011
- [4] A.P. Glebov et al.: *Prospects of VVER-SKD reactor in a closed fuel cycle*, *Nuclear Energy and Technology* 1 (2015) 60–67
- [5] Keresztúri A, Hegyi Gy, Korpás L, Maráczy Cs, Makai M and Telbisz M (2010), *General features and validation of the recent KARATE-440 code system*. *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, 207–238
- [6] Hegedűs Cs, Hegyi Gy, Hordósy G, Keresztúri A, Makai M, Maráczy Cs, Telbisz F, Temesvári E, Vértes P (2002), *The KARATE Program System*, *PHYSOR 2002*, Seoul, Korea, October 7-10
- [7] I. Pataki, A. Keresztúri : *Development and verification of new nodal methods in the KIKO3DMG code*, *Kerntechnik* 79 (2014) 4