

A ZR-6 kritikus rendszer méréseinek felhasználása transzport kódok tesztelésére

Hegy György, Hordósy Gábor, Keresztúri András, Maráczy Csaba

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

1525 Budapest 114 Pf. 49, tel.: +36 1 392 2222

A ZR-6 kritikus rendszeren végzett mérések pontossága és a különböző intézetekben ezek felhasználásával elvégzett számítások, metodikai vizsgálatok azt bizonyítják, hogy a kísérletekben kapott adatok alkalmasak finom hálós diffúziós, vagy annál fejlettebb algoritmusok pontosságának vizsgálatára. Ezek a mérések a VVER-440 típusú reaktorok számítására az MTA Energiatudományi Kutatóközpont (MTA EK), a KFKI Atomenergia Kutatóintézet (KFKI AEKI) jogutódja által kifejlesztett KARATE-440 programcsomag validációs adatbázisának elemei. 2008-tól az európai uniós NURESIM program keretében a francia eredetű APOLLO kóddal végeztünk összehasonlító számításokat. A cikk röviden ismerteti a kísérleti programból felhasznált méréseket és az elvégzett szimulációkat. A KARATE számítások az ENDF/B-VI magfizikai adatok alapján készültek, míg a francia kód a JEF 2.2 adatbázist használja. A különböző eredetű könyvtárak hatását a szimuláció pontosságára MCNP számításokkal mutatjuk be. Eredményeinket összehasonlítjuk egyéb irodalmi adatokkal is.

Bevezetés

Egy atomerómű üzemeltetése során nagy pontossággal és megbízhatósággal kell a tervezési és biztonsági kérdéseket megválaszolni. Ehhez szükséges térben és időben a reaktor bármely állapotában a teljesítménysűrűség változó értékét ismerni a reaktor aktív zónájában. A reaktorfizika feladata ilyen számítási modell megalkotása. A számításokból levonható következtetések csak akkor hihetőek, ha magukat a számításokat a lehető legáltalánosabb esetekben kísérletileg ellenőriztük. Egy működő erőműben korlátozott a mérések lehetősége, ezért a kritikus rendszerek releváns módon megválasztott rácsain elvégzett mérések alapvető jelentőségűek a számítási apparátus validálásában. Az alacsony teljesítmény miatti visszacsatolások hiánya és a zónakonfigurációk megválasztásának szabadsága lehetővé teszi egy sor részprobléma beható vizsgálatát.

A neutronok diffúzióját leíró transzport egyenletek jól ismertek, alkalmazásuknál azonban két probléma merül fel: egyrészt néhány ideális esettől eltekintve nem ismert a megoldás, másrészt csak pontatlanul ismerjük azokat a hatáskeresztmetszeteket, amelyek a megoldáshoz szükségesek. A kritikus rendszereken végzett mérésektől tehát közelítő módszereink igazolását és a hatáskeresztmetszet könyvtáraink ellenőrzését várjuk.

Egyszerűbb esetben a vizsgált rács perturbálatlan, amelynek ismétlődő elemei a moderátorral körülvett üzemanyag pálcák (dúsított, szinterelt uránpasztilla és burkolat). A mérések és számítások közötti eltérés ekkor a magfizikai hatáskeresztmetszet-adatok pontatlanságának rovására írható, mivel ebben az esetben a közelítő módszereink viszonylag nagy pontosságúak.

A vizsgálandó esetek nagy részében azonban a perturbálatlan tartományok mellett vagy épp bennük irregularitásokat kell

figyelembe venni, úgymint: a kazettafal, a kazetták közti vízrés, vagy abszorbens pálcák a reaktivitás lekötésére. A perturbációk gyakran együtt jelentkeznek. Itt a transzportegyenletek megoldási módszerei is jelentős hibaforrást jelentenek, és a mérésekkel történő összevetés is komplexebb feladat.

Az üzemanyag-kazetták, a moderátor- és egyéb szerkezeti anyagok reaktortípus-függők, így természetes, hogy egy számítási apparátus reaktor-specifikus minősítéséhez elengedhetetlen olyan mérések felhasználása, amelyek az adott konstrukcióra jellemző elemeket tartalmaznak. A ZR-6 kritikus rendszert a VVER típusú reaktorokat üzemeltető országok éppen azért fejlesztették ki az 1970-es években, hogy az előbb ismertetett feladatoknak megfelelő adatbázist hozzanak létre. Jelenleg különböző VVER üzemeltetők eltérő kódrendszereket használnak, így napjainkban nem csak a saját fejlesztésű KARATE programcsomag, de más intézetek által készített programok validációjára is felhasználják ezeket a méréseket.

Ebben a cikkben röviden ismertetjük a ZR-6 kritikus rendszert, majd néhány példát mutatunk be az alkalmazások közül. Olyan eseteket választottunk ki, melyet a KARATE-440 program moduljaival és az APOLLO programmal is kiszámítottunk. Az első kód az MTA KFKI AEKI fejlesztése, és az ENDFB-VI hatáskeresztmetszet könyvtárat használja. A második francia kód, amely a JEF 2.2 nukleáris adatbázist használja, ez a kód a NURESIM (**N**uclear **R**eactor **S**imulation) program keretében egy európai uniós általános reaktorfizikai programcsomag része. Az eredmények kielégítő pontossága mellett, néhány különbség az alkalmazott eltérő magfizikai adatbázisokban kereshető. Ennek igazolására Monte Carlo számításokat végeztünk.

A ZR-6 kritikus rendszer

A kísérletek részletes leírása, a vizsgált rácok jellemzői és az azokat terhelő pontatlanságok elemzése megtalálható a szakirodalomban [1-5]. Itt csupán néhány adatot és információt ismertettünk, amelyek fontosak a bemutatott elemzések alátámasztásához.

A kísérleti berendezés kialakítása során a fő szempont az volt, hogy a VVER reaktorokban található kazettán belüli geometriát valósítsuk meg. A kísérleti elrendezések legfontosabb paramétereit az 1. táblázatban foglaltuk össze. A moderátor és a reflektor desztillált víz, esetenként homogén bórsav-koncentrációval.

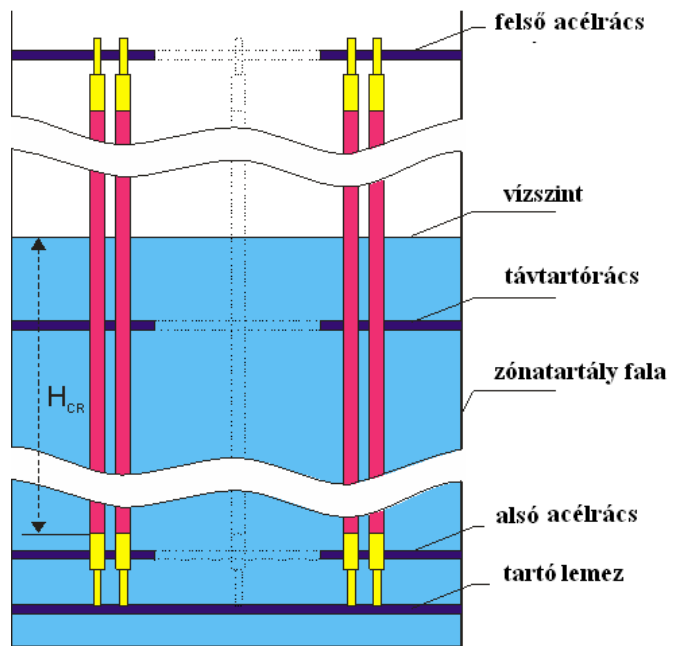
1. táblázat A cikkben felhasznált ZR-6 rácok főbb paramétereit

Üzemanyag-tabletta dúsítása (^{235}U)	1,6%, 3,6%, 4,4% UO_2
külső sugara	3,800 mm
sűrűsége	10,28 g/cm ³
Üzemanyag-pálca burkolat anyaga	Zr(Nb) ötvözet (Nb tartalom: 1 súlyszázalék)
belső / külső sugara	3,875 mm / 4,525 mm
sűrűsége	6,55 g/cm ³
Rácsosztás	11,0 mm, 12,7 mm, 15,0 mm, 19,05 mm
Bórsav koncentráció [g/kg]	0,0 - 7,2
Hőmérséklet [°C]	20,0 - 130,0
Abszorbens típusa	ZrB ₂ , B ₄ C, Eu ₂ O ₃ , Gd ₂ O ₃ (különböző koncentrációban)
A Gd ₂ O ₃ abszorbens tablettá sugara	3,80 mm
sűrűsége	3,70 g/cm ³
Mérési elrendezés	szabályos, perturbált rác, ill. kazetta imitáció

A Kurcsatov Intézetből kapott urán-pálcák az erőműben használtaknál rövidebbek voltak, de egyéb jellemzőik azonosak. A rác mindig hatszögletű elrendezésű, a rácsparaméter széles tartományban változott (11,0 - 19,05 mm) úgy, hogy a H/U viszony [16] megfeleljen az üzemvitel során várható értékeknek. Esetünkben a 11,0 mm-es, szoros illeszkedésű, alulmoderált rácok az üzemviteli tartománynak megfelelő H/U viszonyt szimulálják (VVER-1000 típus), és nagy kihívást jelentenek az aszimptotikus számítások számára. Hasonlóan alulmoderáltak a 12,7 mm-es rácok is, kivéve az 1,6%-os dúsítást, míg a 15 mm reguláris rác közel optimális moderáltságú. Ezzel az aszimptotikus kódok széles tartományban validálhatók.

A mérések során a kritikusságot a vízszint változtatásával érték el. Ennek előnye, hogy a mérés alatt nincs zavaró perturbáció a rendszerben. A mérési elrendezésben egyetlen elkerülhetetlen szimulációs probléma a mozgatható rácstartó, amelyet biztonsági okokból minden esetben használni kellett (1. ábra). Ezt a kiértékelés során korrekcióval figyelembe kellett venni (lásd [1] és [5]). Amint az 1. táblázatból kitűnik, különböző perturbált zónák vizsgálatára is volt lehetőség.

Ezek jelentősége az, hogy a gadólińiumos kazetta megjelent az erőművekben, nagyon megnőtt.



1. ábra: A zóna axiális keresztmetszete

A ZR-6 eredmények nyilvánosak. Az adatok kiértékelésére megfelelő statisztikai program áll rendelkezésre, ami szükség esetén az adatok előhívását és újraértékelését is könnyen elvégezhetővé teszi [5-6].

Mért adatok, kísérleti módszerek

Általában többféle mérést végeztek a zónákon, de a kritikus vízszintet (H_{cr}) és a vízszint reaktivásra gyakorolt hatását ($\partial\rho/\partial H$) minden zónán meghatározták. Ilyenkor a hőmérséklet és a bórsav-koncentráció értéke állandó volt. Ezen paraméterek kismértékű változtatásával a hőmérséklet, illetve a bórsav szerinti reaktivitás-együttható ($\partial\rho/\partial C_B$, $\partial\rho/\partial T$) is meghatározható volt.

Az axiális és radiális eloszlásokat kétféle módszerrel mérték. Egyrészt a besugárzás után a hasadási termékek aktivitását mérték meg pálcánként, másrészt a pálcák felületén elhelyezett Dy, Cu, Eu, Au monitor fóliák aktivitását mérték.

A mikroeloszlásokat az uránpasztillák környezetében elhelyezett különböző fóliákkal vizsgálták, így meghatározható volt a perturbációk közelében a fluxus azimutális alakja is. A fluxus eloszlás spektrális paramétereit is meghatározták fóliamérésekkel. A spektrális indexek mérése metodikai szempontból igen fontos a KARATE programcsomag esetében. A mérési metodikák részletes leírása [1]-ben található.

A kísérleti elrendezéshez készítendő modell során fontos feladat volt a kritikus szint feletti pálcaszakaszok, az úgynevezett száraz zóna modellezése (lásd 1. ábra). Ehhez egyrészt Monte Carlo-számítások adtak segítséget, de a besugárzások alapján kapott eloszlások is megmutatták, hogy a koszinuszos alpmódus létezik, és ennek segítségével az axiális görbületi tényező bevezethető:

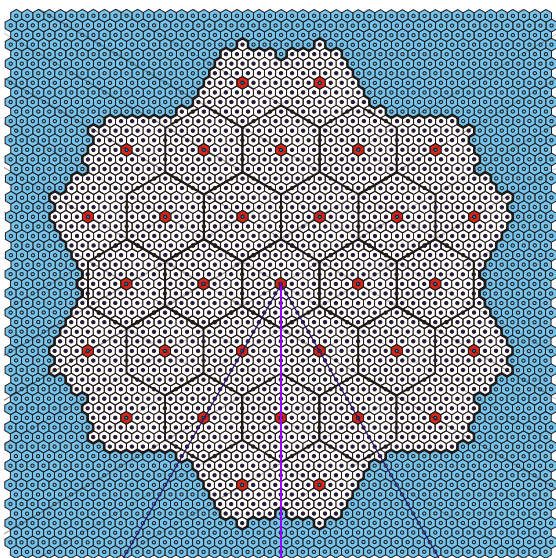
$$B_Z^2 = \left(\frac{\pi}{H_{cr} + \lambda_Z} \right)^2 \quad (1)$$

Ezzel azonos következtetésre vezettek a dinamikus mérésen alapuló H_{cr} kritikus vízszint- és $\partial\rho/\partial H$ reaktivitás-értékek is.

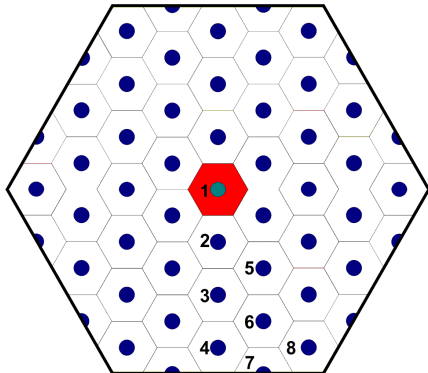
Az aszimptotikus ZR-6 rácok esetében a teljesítmény-eloszlásmérésekből a zónára jellemző anyagi görbületi tényezőt is meg lehetett határozni. Ezekben az esetekben a rácosztás (mm), a dúsítás, a bórkoncentráció (g/l) és a hőmérséklet ($^{\circ}C$) egyértelműen jellemzik a méréseket.

A gadolíniumos perturbációt tartalmazó zónák

A VVER reaktorokban egyre szélesebb körben alkalmazott gadolíniumos mérőanyag miatt nagy jelentősége van azoknak a méréseknek, ahol ezt az effektust vizsgálták. Az alapkonfigurációban 1517 darab, 3,6 % dúsítású pálcát volt 12,7 mm rácstávolsággal. A perturbáció során a zóna geometriai középpontjától kezdve minden hetedik üzemanyagpálcát abszorbensre cseréltek. Így jött létre az X7 jelű elrendezés, ahol X a perturbáció anyagának típusát jelöli, - jelen vizsgálatban gadolíniumot, de - a mérésekben különböző egyéb abszorbens anyagokat is vizsgáltak. A nagy mennyiségű mérés alapján bizonyítható volt, hogy az ilyen esetekben a radiális eloszlások a zónán felbonthatók egy Bessel típusú makrofluxusra $J_0(B_r r)$ és egy, a makrocellára jellemző eloszlásra, amelyet az abszorbens rúd tulajdonságai határoznak meg. Az axiális alakra itt is az aszimptotikus méréseknél jellemző alpmódus adódott. Az axiális kifolyást (λ_z) az abszorbensről függetlenül találták [5]. Ezzel perturbált rácok esetére bevezethető volt a makrocella-konceptió (lásd 2. és 3. ábrát).



2. ábra: 1488 UO₂ (fekete pont) és 31 X típusú abszorbens-pálcát tartalmazó X7 zóna. Az elrendezés 31 makrocellából áll.



3. ábra: Szimmetrikus pozíciók az X7 típusú makrocellában (lásd a 2. ábrán)

A számításokhoz felhasznált kódok

A neutronfluxusra vonatkozó transzportegyenletet végső soron ugyan a zónára kell megoldanunk, de ez a nagyszámú független változó miatt jelenleg is nagy számítógépkapacitást igénylő feladat, és ezért a programok általában több lépésben oldják ezt meg. A megoldás lépéseit röviden ismertetjük a KARATE-440 program esetében.

A KARATE-440

A KARATE-440 a VVER-440 típusú, nyomottvízes, hexagonális kazettából álló reaktorok üzemviteli szempontból lényeges paramétereit határozza meg (kampánytervezés, átrakás, xenontranziens, a biztonsági elemzések keretparamétereit). Az 1990-es évek óta folyamatosan használt programrendszer részletesen ismerhető a szakirodalomból [7-9]. Itt csupán a cellaszámítás szintjét részletezzük.

A cellát és annak környezetét modellező programrendszerben használt sokcsoport- állandó könyvtárak az ENDF/B-VI nukleáris adatbázis alapján készültek. A MULTICELL kód több hatszögös cellára kiterjedő tartományban sokcsoport transzport számítás végez a körgyűrűkre osztott cellák radiális inhomogenitásának figyelembevételével. Az első ütközési valószínűségeket tartalmazó sokcsoport egyenleteket az MGCP modul oldja meg. Az egyenletekben szereplő makroszkopikus hatáskeresztmetszetek az izotóponkénti koncentrációk és a mikroszkopikus hatáskeresztmetszetek függvényei. Az egyes izotópok koncentrációit a kiégés függvényében a BURN modul, a fűtőelemcella hőmérséklet eloszlását a TEMP modul számolja.

A mikroszkopikus hatáskeresztmetszeteket a program MGCP könyvtára tartalmazza - rezonanciaárnyékolás nélkül - 35 epitermikus és 35 termikus energiacsoportban. A három legfontosabb rezonanciaizotóp (U-235, U-238, Pu-239) esetében a rezonancia-önárnyékolás nem hanyagolható el. A fel nem bontott tartományban az árnyékolás az ekvivalencia tételekből adódik. Az árnyékolt mikroszkopikus hatáskeresztmetszeteket a feloldott rezonanciák tartományában a PEACO modul számolja fűtőelem-régióként. A sokcsoport spektrumszámítások ultrafinom energiacsoportokra átlagolt végtelen hígítású szórási, hasadási és abszorpciós hatáskeresztmetszeteket használnak az ebben a reaktorban előforduló fontosabb rezonancia izotópok (U-235, U-238 és Pu-239) feloldott rezonanciáit tartalmazó energiatartományban. A kapott csoportállandók hőmérsékletfüggők.

A program a fenti modulokon kívül egy, a kifolyást B1 közelítésben figyelembevevő modult is tartalmaz.

Az APOLLO program

Az APOLLO determinisztikus transzport kódot a CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) fejlesztte 1983 óta. A NURESIM programban [10] ezt a kódot használják a kritikusági számításokhoz. A Boltzmann-egyenlet megoldására többféle lehetőséget is ajánl a programcsomag [11-12]. Egyik lehetőség az ütközési valószínűségeken alapuló integrális forma, de használhatjuk a végesdifferenciaközelítést is az SN (diszkrét irányok) módszer alapján. Ez a megoldás a heterogenitásokat jól veszi figyelembe, de a sok változó miatt hosszadalmas a számítás. Jelenleg a karakterisztikák módszerével (rögzített irányok mellett, direkt integrálás) bővül a megoldási választások száma. Mindegyik közelítésben megoldhatjuk a sajátérték feladatot

vagy a forrásproblémát, és megkaphatjuk a direkt, vagy az adjungált fluxust. Az SN megoldó (diamond) poligon gyémánt, vagy q súlyozást használ, vagy nodális térbeli közelítést. Az ütközési valószínűségek módszere a felületi áram közelítést, vagy a 2D numerikus integrálás módszerét alkalmazza. Különböző egyedi közelítések is részei a programnak, úgymint: a dupla heterogenitás, nemlineáris homogenizálás, önárnyékolás, kifolyás. Geometria szempontjából is széles a választék a különböző típusú elemi celláktól az inhomogén bonyolult kazettáig.

Az APOLLO program különböző kritikusági és zónaszámító kódok része, így például része a SAPHYR és a CRYSTAL/DARWIN programsomagnak.

A számításainkban felhasznált kód (APOLLO-2 verziószám: 2.7) a JEF 2.2 magfizikai adatbázist használja, amelynek alapján kifejlesztették a saját 172-csoport könyvtárt.

Az MCNP program

A kritikusági probléma megoldására egy lehetséges módszer az is, hogy valószínűségi alapon szimuláljuk a szórás, hasadási folyamatokat. A folytonos energia-reprezentációt használó Monte Carlo-programok esetében (mint például az általunk használt MCNP4C általános célú, folytonos energia reprezentációt használó program [13]) a determinisztikus számítások során alkalmazott közelítésekből és a csoportállandók származtatásából fakadó hibaforrás nem szerepel. A geometriai modell elkészítésénél szükségszerűen alkalmazott közelítésekből pedig általában kisebb a hiba, mint a gyakorlatban használt determinisztikus kódok esetében. A megfelelő statisztika kivárása azonban néha nagy gépidőt jelenthet.

A geometriai input a teljes zóna 30 fokos szektorát tartalmazza a lehető legrészletesebb adatokkal, beleértve a pálcák felső és alsó rögzítését, a szerkezeti anyagokat, a mozgatható közbenső rácsfixáló elemet és a zónakosár alját. A száraz rács is része a modellnek. Minden számítás 50 passzív és 600 aktív ciklust tartalmazott ciklusonként 25000-nél több neutronnal.

Eredmények

A nagyszámú [14] validációs számításból itt két sorozatot mutatunk be: főleg olyan szimulációkat, amelyekben ugyanarra a mérési sorozatra a hazai és a francia kóddal is végeztünk számításokat. A részletes statisztikai vizsgálat túlmutat ezen az ismertetőn.

Aszimptotikus számítások

A sokcsoportállandó könyvtárak teszteléséhez zero teljesítményű, asimptotikus jellegű perturbálatlan rácsok kiválasztása célszerű. Ilyen esetben a matematikai modelltől eredő számítási hibák elhanyagolhatóak. A perturbálatlan zónában a neutronfluxus helyfüggése a görbületi paraméterrel jól leírható, kis teljesítményen nincs hőmérsékleti visszacsatolás. Ilyen feltételek mellett a mért és a számított adatok összehasonlítása a modell mögött álló sokcsoport-állandó könyvtárat és a spektrumszámítási módszert jellemzi. Mind a MULTICELL, mind az APOLLO kód esetében az üzemanyagcella négy egyenlő térfogatú gyűrűre volt felosztva. A következő gyűrű alakú tartomány a rés és a burkolat anyaga volt, majd a hatszöges moderátor tartomány következett reflektív határfeltétellel.

Aszimptotikus közelítésben kezelhető rácsok görbületi tényezője függ a kritikus vízszinttől, az effektív zónasugártól, amely a rendszerben található pálcák elemi celláinak területéből határozható meg, valamint a λ_r radiális és λ_z axiális kifolyás kísérletileg meghatározott értékeitől:

$$B_m^2 = B_z^2 + B_r^2 = \left(\frac{2.4048}{R_f + \lambda_r} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_{cr} + \lambda_z} \right)^2 \quad (2)$$

A számítások végeredménye a sokszorozási tényező (k_{eff}), amely a görbületi tényező közvetlen felhasználásával adódott mindegyik kód esetében. Néhány esetben kiszámítottunk spektrumjellemzőket is, úgymint a δ^{28} gyorsasadási paramétert és a neptunium/diszprózium spektrális indexet. A mért és számított adatokat a 2-4. táblázat tartalmazza, ahol a méréseket a ZR-6 leírásánál definiált módon adjuk meg az első oszlopban. Ezután a mért paraméter, majd az esetenként több kóddal számított értékek következnek. A spektrális mérések szimulációja a MULTICELL kóddal enyhe fölébecslést mutat (2-3. táblázat).

2. táblázat A különböző kóddal számolt k_{eff} összehasonlítása

ZR-6 INPUT adatok		k_{eff} meghatározása		
Cellatípus	Mért B^2 [m^{-2}]	APOLLO2	MULTI-CELL	HELIOS [14]
12,7/3,6/0,0/ 20	100,41±0,40	0,9998405	1,0087	1,00797
12,7/3,6/0,0/ 80	96,55±1,29	0,9964078	1,0040	1,00438
12,7/3,6/0,0/130	90,27±0,91	0,9951552	1,0023	1,00327
12,7/3,6/4,0/ 20	74,16±0,34	1,0062140	1,0037	1,01361
12,7/3,6/4,0/ 80	72,07±0,21	1,0015331	1,0089	1,00928
12,7/3,6/4,0/130	67,63±0,20	1,0018240	1,0131	1,00962
12,7/3,6/5,8/ 20	64,95±0,26	1,0039300	1,0079	1,01076
12,7/3,6/5,8/ 80	61,69±0,20	1,0052950	1,0094	1,01258
12,7/3,6/5,8/130	59,02±0,13	1,0020304	1,0064	1,00978
12,7/4,4/0,0/ 20	112,58±1,65	0,9948031	1,0037	1,00265
12,7/4,4/0,64/20	66,01±0,55	1,0018420	1,0102	1,00954
11,0/3,6/0,0/ 20	64,02±0,49	0,9869809	0,9975	0,99919
11,0/3,6/0,0/ 80	59,76±0,31	0,9793478	0,9897	0,99166
11,0/3,6/0,0/130	120,36±0,65	0,9773558	0,9867	0,98894
11,0/3,6/0,96/20	106,60±1,84	0,9920521	1,0020	1,00388
15,0/3,6/0,0/ 20	136,80±0,64	1,0024381	1,0087	1,00879
15,0/4,4/0,0/ 20	62,14±0,62	1,0005381	1,0033	1,00257
15,0/3,6/4,0/ 20	70,25±0,81	1,0123560	1,0137	1,01748

3. táblázat Gyorshasadási paraméter néhány ZR-6 rács esetében

Cellatípus	Mért gyorsasadási paraméter: δ^{28}	MULTICELL
11,0/3,6/0,96/20	0,0853±0,0027	0,08598
12,7/1,6/0,0/ 20	0,0667±0,0039	0,06268
12,7/3,6/0,0/ 20	0,0543±0,0013	0,05528
12,7/4,4/0,0/ 20	0,0557±0,0014	0,05393
12,7/4,4/0,64/130	0,0578±0,0014	0,05430

4. táblázat Spektrális index szimulációja néhány ZR-6 rács esetében

Cellatípus	Mért spektrális index: $SI(Np/Dy)$	MULTICELL
11,0/3,6/0,0/ 20	6,1535±0,0911	6,157
11,0/3,6/0,0/130	6,8162±0,0993	6,620
11,0/3,6/1,0/ 20	6,3107±0,0878	6,217
12,7/1,6/0,0/ 20	2,544 ±0,040	2,480
12,7/3,6/0,0/ 20	4,0170±0,0287	3,936
12,7/3,6/0,0/130	3,9920±0,0253	4,195
12,7/3,6/5,8/ 20	4,4428±0,0667	4,284
12,7/3,6/5,8/130	4,5700±0,0254	4,546
12,7/4,4/0,0/ 20	4,3430±0,0540	4,533
15,0/1,6/0,0/ 20	2,1016±0,0426	1,952
15,0/3,6/0,0/ 20	3,0959±0,0343	2,819
15,0/3,6/4,0/ 20	3,4086±0,0289	3,061
15,0/4,4/0,0/ 20	3,2365±0,0799	3,169

A KARATE-440 MULTICELL programja, de az APOLLO kód is általában kissé fölé becsüli a sokszorozási tényezőt (4. táblázat). Összehasonlításként az 5. oszlopban a szakirodalmából vett adatokat mutatunk be, amelyeket a HELIOS kóddal határoztak meg [15]. A magyar és a francia kód közt az egyik lényeges különbség a hatáskeresztmetszet könyvtárakban van. Azért, hogy az ebből eredő különbséget becsülhessük, az MCNP4C Monte Carlo-kóddal is elvégeztük a szimulációkat azonos input adatokkal, de kicserélve a könyvtárakat.

Az eredményeket az 5. táblázatban találjuk a számolt esetekre, megadva az átlag és a szórás értékét is. Az ENDF/B-VI könyvtár esetében az MCNP4C alábecsli a sokszorozási tényezőt (-210 pcm), a JEF könyvtárral az eltérés +143 pcm. Az MCNP számítást referenciának fogadva el a számítási sorozatok átlaga alapján az APOLLO alábecsli ezeket a rácsokat (-365 pcm), a MULTICELL pedig fölé (+654 pcm).

5. táblázat A különböző könyvtárakkal számolt k_{eff} összehasonlítása

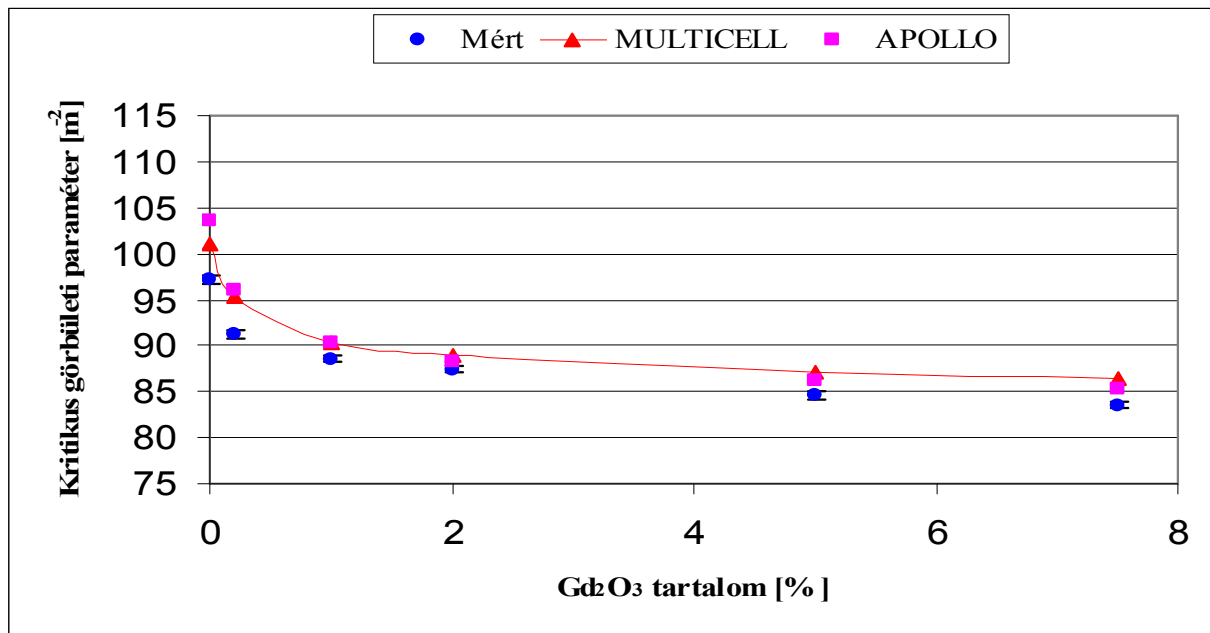
Cellatípus	APOLLO2.7	MCNP4C		KARATE-440
	JEF 2.2		ENDF/B-VI	
12,7/3,6/0,0/ 20	0,9998405	1,0043	1,0004	1,0087
12,7/3,6/4,0/ 20	1,0062140	1,0022	0,9961	1,0037
12,7/3,6/5,8/ 20	1,0039300	1,0024	0,9973	1,0079
12,7/4,4/0,0/ 20	0,9948031	0,9995	0,9938	1,0037
11,0/3,6/0,0/ 20	0,9869809	1,0021	0,9974	0,9975
15,0/3,6/0,0/ 20	1,0024381	0,9966	0,9887	1,0087
15,0/4,4/0,0/ 20	1,0005381	1,0048	1,0020	1,0033
11,0/3,6/0,96/20	0,9920521	0,9994	0,9955	1,0020
15,0/3,6/4,0/ 20	1,0123560	1,0001	0,9962	1,0137
átlag	0,997775	1,0014	0,9979	1,0044
szórás	0,008820	0,0024	0,00291	0,0070

A gadolíniumos perturbációt tartalmazó (X7) makrocellák

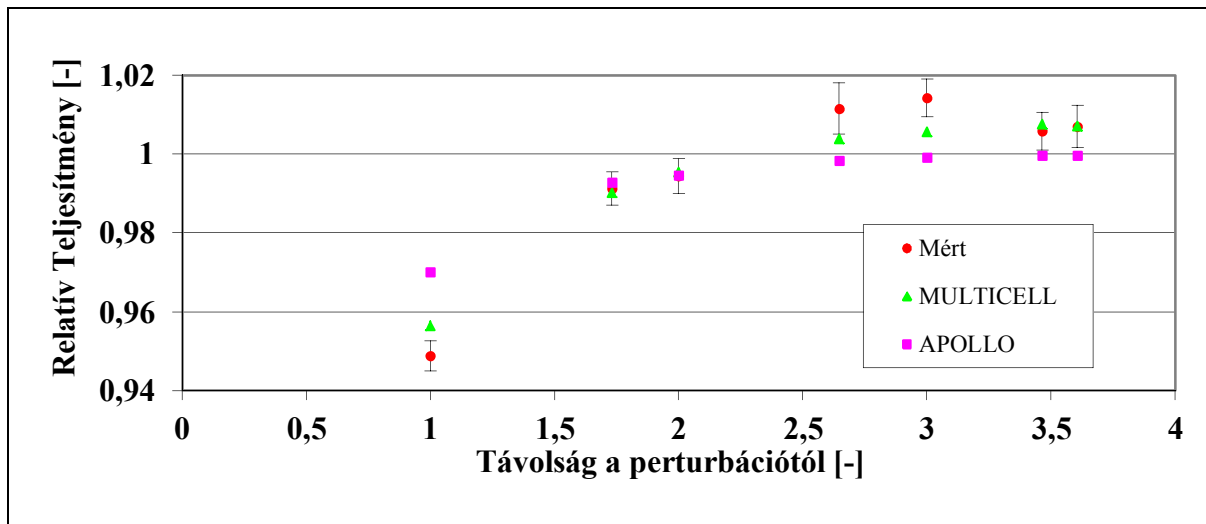
A Gd tartalmú abszorbenst és a közelében lévő fűtőelem-pálcákat tartalmazó X7 makrocellákból felépíthető a zónának a reflektor perturbációtól távoli tartománya (lásd 2-3. ábra). Itt lehetőség volt arra, hogy a mért hasadási reakciógyakoriság eloszlása szeparálható legyen egy, a makrocellán belüli eloszlásra és a zónát jellemző radiális Bessel-függvényre [2]. A módszer segítségével - a makrocellán belüli eloszláson kívül - kiértékelhető a radiális görbületi tényező is. Az axiális görbületi tényező mérésével együtt meghatározott anyagi görbületi tényező lehetővé teszi a makrocella kritikussági számítások tesztelését. A különböző erősségű Gd-abszorbensek alkalmazása miatt a konfiguráció alkalmas az abszorbensek körül kialakuló teljesítmény-eloszlás modellezésének ellenőrzésére és a kritikussági számítások tesztelésére. A MULTICELL és APOLLO programokkal a gadolíniumos makrocellákat is modelleztük a széleken periodikus határfeltétel előírásával. A 6. táblázatban, illetve a 4. ábrán tüntettük fel a számított makrocellák típusát, az abszorbens rudakban található Gd_2O_3 tömegszázalékát, a mért és a számított kritikus görbületi paraméterek értékét, valamint a mért görbületi paraméter mellett számított effektív sokszorozási tényezőt.

Megfigyelhető, hogy magas Gd_2O_3 tartalom esetében a kritikus görbületi paraméter értéke telítésbe kezd menni.

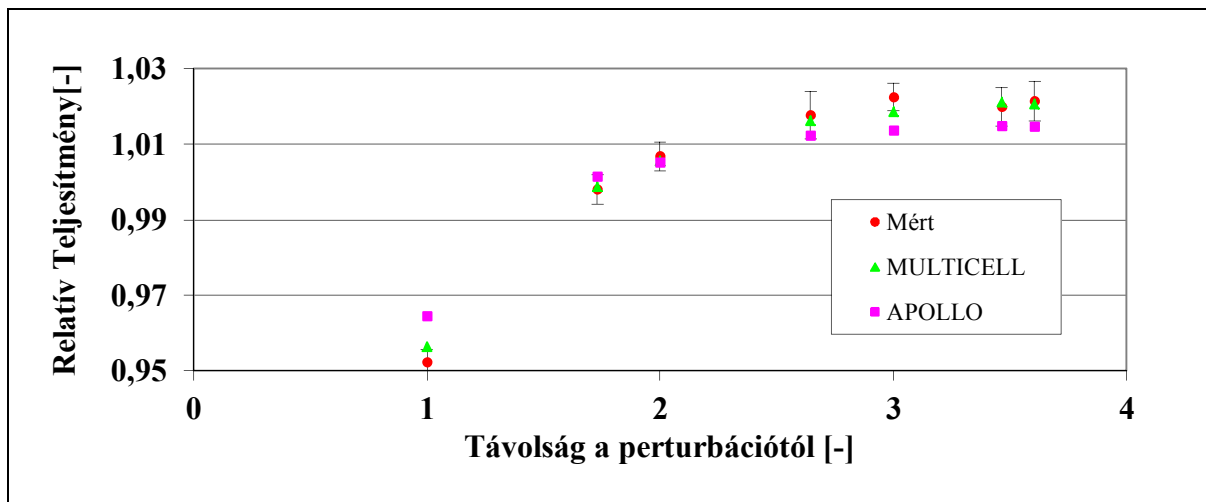
A makrocellán belüli teljesítmény-eloszlást is számoltuk a tesztelt kódokkal. A nagyobb dúsítású gadolíniumos cellákra az eredményeket az 5-7. ábrákon mutatjuk be. Ezek az ábrákon a távolság egysége a két egymás mellett található pálcá távolsága (az origóban található az abszorbens). Az általános egyezés a mért és számított eloszlások között megfelelő. A gadolíniumos perturbációk szimulációja során érdekes tapasztalat, hogy a két program eredménye hasonló mértékben és irányban tér el a mért értékektől, továbbá a két kód - bár különböző algoritmust használ - közel azonos eredményt ad.



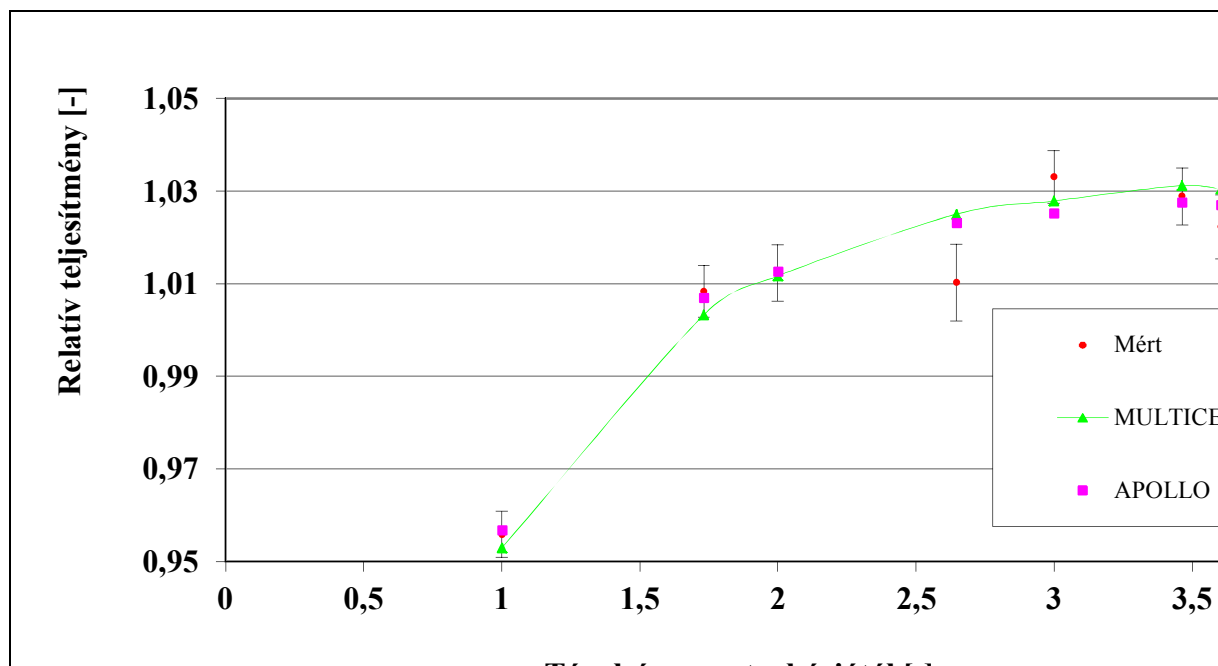
4. ábra: A mért és számított kritikus görbületi paraméterek értéke a Gd_2O_3 tartalom függvényében (A Gd_2O_3 tartalom súlyszázalékban)



5. ábra: A K7 makrocellán belüli mért, a MULTICELL és az APOLLO programokkal számított teljesítmény-eloszlás



6. ábra: A L7 makrocellán belüli mért, a MULTICELL és az APOLLO programokkal számított teljesítmény-eloszlás



7. ábra: A M7 makrocellán belüli mért, a MULTICELL és az APOLLO programokkal számított teljesítmény-eloszlás

6. táblázat A különböző Gd tartalmú abszorbenssel perturbált rácsok mért és számított kritikusági paramétereit.

Gd ₂ O ₃ Makrocella		Mért és számolt görbületi tényező: B ² [m ⁻²]			k _{eff}	
Név	dúsítás (s%)	Mért	MULTICELL	APOLLO	MULTICELL	APOLLO
I7	0,0	97,13±0,41	101,00	103,556	1,01198	1,01992
J7	0,2	91,22±0,46	95,37	96,139	1,01302	1,01535
K7	1,0	88,58±0,34	90,40	90,233	1,00574	1,00513
L7	2,0	87,43±0,35	88,85	88,2315	1,00445	1,00248
M7	5,0	84,60±0,41	87,12	86,087	1,00796	1,00465
N7	7,5	83,55±0,38	86,34	85,197	1,00888	1,00517

Összefoglalás

A ZR-6 kritikus rendszeren végzett mérésekkel a KARATE-440 programrendszer MULTICELL transzport kódját és a NURESIM program keretében az MTA KFKI AEKI számára átadott APOLLO programot teszteltük.

Aszimptotikus rácsokon a két program esetében a sokszorozási tényező a mérttel jó egyezést mutatott. Monte Carlo-számítások segítségével a kódok által használt,

különböző hatáskeresztmetszet-könyvtárak hatását megbecsültük.

A nagy Gd tartalmú abszorbensrudak alkalmazása esetében a két programmal számított sokszorozási tényezők számítási pontossága nem csökkent le. A makrocellán belüli mért és számított teljesítmény-eloszlások jól egyeznek a vizsgált esetekre.

Általánosságban kijelenthető, hogy a ZR-6 mérések a nemzetközi gyakorlatban is jól használhatók.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni prof. Szatmáry Zoltánnak, aki Gyimesi Zoltánnal együtt a ZR-6-on folytatott tudományos munkát folyamatosan irányította, és a ZR-6 műszaki személyzetnek, akik technikai leleményességükkel biztosították a kiváló mérési lehetőséget.

Köszönet illeti az Európai Bizottság 516560 (FI6O) szerződésszámú NURESIM projektjét a számítások finanszírozásáért.

Irodalomjegyzék

- [1] Z. Szatmáry (coordinator), et al.: *Experimental Investigations of the Physical Properties of VVER-type Uranium-Water Lattices, Final Report of TIC, Vol. 1, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1985.*
- [2] C. Alvarez, J. Bardos, et al.: *Experimental Investigations of the Physical Properties of VVER-type Uranium-Water Lattices, Final Report of TIC, Vol. 3, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.*
- [3] *Experimental Investigations of the Physical Properties of VVER-type Uranium-Water Lattices, Final Report of TIC, Vol. 4, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1998.*
- [4] Z. Szatmáry: *Additional Data, Amendments, Reevaluations, Supplement to the Final Report of TIC, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.*
- [5] Z. Szatmáry (evaluator), *The VVER Experiments: Regular and Perturbed Hexagonal Lattices of Low-Enriched UO₂ Fuel Rods in Light Water, Part 2, Handbook of Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC/(99)03/IV Volume IV, LEU-COMP-THERM-015 and LEU-COMP-THERM-036 (2007)*
- [6] Z. Szatmáry: *User`s Manual of Program RFIT Part 1- 4. KFKI-1991-13/G tól 16/G*
- [7] A. Kereszturi, Gy. Hegyi, L. Korpas, Cs. Maraczy, M. Makai, M. Telbisz, "General features and validation of the recent KARATE-440 code system", *Int. J. of Nuclear Energy Science and Technology, Vol.5, No.3, pp.207 - 238, URL: <http://www.inderscience.com/10.1504/IJNEST.2010.033476> (2010)*
- [8] Cs. Hegedűs, Gy. Hegyi, G. Hordósy, A. Keresztúri, M. Makai, Cs. Maráczy, M. Telbisz, E. Temesvári, P. Vértes: „The KARATE Program System”, *PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10.*
- [9] Keresztúri A., Maráczy Cs., Panka I., Hegyi Gy., Trosztel I., Molnár A.: „Új fűtőelemek bevezetéséhez, a teljesítménynövelés engedélyezéséhez szükséges számítógépes modellezés”, *NUKLEON 4:(3) Paper 95. 7 p. (2011)*
- [10] D. Cacuci, J.M. et al.: "NURESIM: An European Platform for Nuclear Reactor Simulation", *2006 FISA Conf. on the 6th Framework Euratom Research Program, European Commission, Luxembourg (2006)*
- [11] R. Sanchez et al.: „APOLLO2 Twelve Years Later”, *M&C Conference 1999*
- [12] *APOLLO2 v.2.7 User`s manual, CEA Saclay, 2006*
- [13] "MCNPTM-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", *Version 4C, Judith F. Briesmeister, Editor, LA-13709-M, December 2000, Los Alamos National Laboratory*
- [14] Gy. Hegyi, G. Hordósy, "Analysis of ZR-6 VVER Lattice Experiments Using Deterministic and Monte Carlo Methods", *Proc. of NCS D 2005 Topical Meeting, "Integrating Criticality Safety into the Resurgence of Nuclear Power", Knoxville Tennessee, September 19-22, 2005, CD ROM*
- [15] T. Simeonov, Ch. Wemple, "HELIOS-2: Benchmarking Against Hexagonal Lattices", *Proc. of the 18th Symposium of AER, Eger, Hungary, October 6-10, 2008, pp 281-297.*
- [16] Szatmáry Zoltán, "Bevezetés a reaktorfizikába", *Egyetemi jegyzet, Budapest 2000.*