

A paksi teljesléptékű szimulátor kétfázisú termohidraulikai modelljének lecserélése

Dr. Házi Gábor¹, Páles József¹, Végh Endre², Jánosy János Sebestyén¹

Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet, Szimulátor Laboratórium
1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós utca 29-33., +36 1 392 2222/1874,
Atomenergia Mérnökiroda
1121 Budapest, Konkoly Thege 29-33., +36 1 392 2222/1131

A paksi atomerőmű teljesléptékű szimulátorának rekonstrukciója 2008-ban kezdődött. A munka részeként a szimulátorban eredetileg alkalmazott kétfázisú termohidraulikai modellt (SMABRE) lecseréltük egy az intézetünkben kifejlesztett kétfázisú modellre (RETINA). Az új modell megfelelőségét tranziens tesztek sorozatával igazoltuk. A kiválasztott tesztek a szimulátorban mindkét modell felhasználásával lefuttattuk, és a kapott eredményeket egymással, illetve mérési eredményekkel hasonlítottuk össze. A beillesztést és a gyakorlatilag azonos futási eredmények elérését főként az nehezítette, hogy a két kódban jelentős különbségek vannak az alkalmazott modellekben és a numerikus módszerekben.

Bevezetés

A paksi atomerőmű teljesléptékű szimulátora 1988 óta üzemel. Az elmúlt két évtizedben a szimulátor majdnem minden komponensét felújították, vagy lecserélték, hogy a rendszer elegendően legyen a vele szemben támasztott újabb és újabb követelményeknek. A számítástechnika folyamatos fejlődése lehetővé tette mind a hardver, mind a szimulációs modellek korszerűsítését a szimuláció hűségének megtartása és javítása érdekében. Időközben változtak a szimulátorral szemben támasztott követelmények is. Eredetileg a szimulátort csak az operatív személyzet oktatására használták, de az utóbbi évtizedben sikeresen alkalmazták teszt-környezetként a reaktorvédelmi rendszer felújítása során, és bővült a szimulátorral futtatható tranziensek köre is.

Az erőmű teljesítménynövelése kapcsán új típusú, gadóliummos fűtőelemeket vezetnek be, és a várható változatos zónakonfigurációkra szimulátoros képzéssel kell felkészíteni az operátorokat. Ehhez a szimulátorban részletesebb és nagyobb felbontású neutronkinetikai és termohidraulikai modellekre volt szükség. Ezért 2008-ban elindult egy rekonstrukciós munka, melyben az eredeti kétfázisú termohidraulikai modellt (SMABRE) egy az AEKI-ben kifejlesztett modellel (RETINA) cseréltük le. A saját fejlesztésű kód használatát több érv is alátámasztja:

- 1.) a beillesztésre szánt időt így minimalizálni tudtuk (mások által fejlesztett kétfázisú kód beillesztése korábban jóval több időt vett igénybe, és külső segítségre kellett támaszkodni),
- 2.) a később esetleg szükségessé váló módosításokat egy általunk fejlesztett kódban könnyebb megvalósítani,
- 3.) végül de nem utolsósorban a szimulátor így teljesen magyar termékévé vált, a korábbi elképzeléseknek megfelelően hasznosult egy magyar fejlesztés.

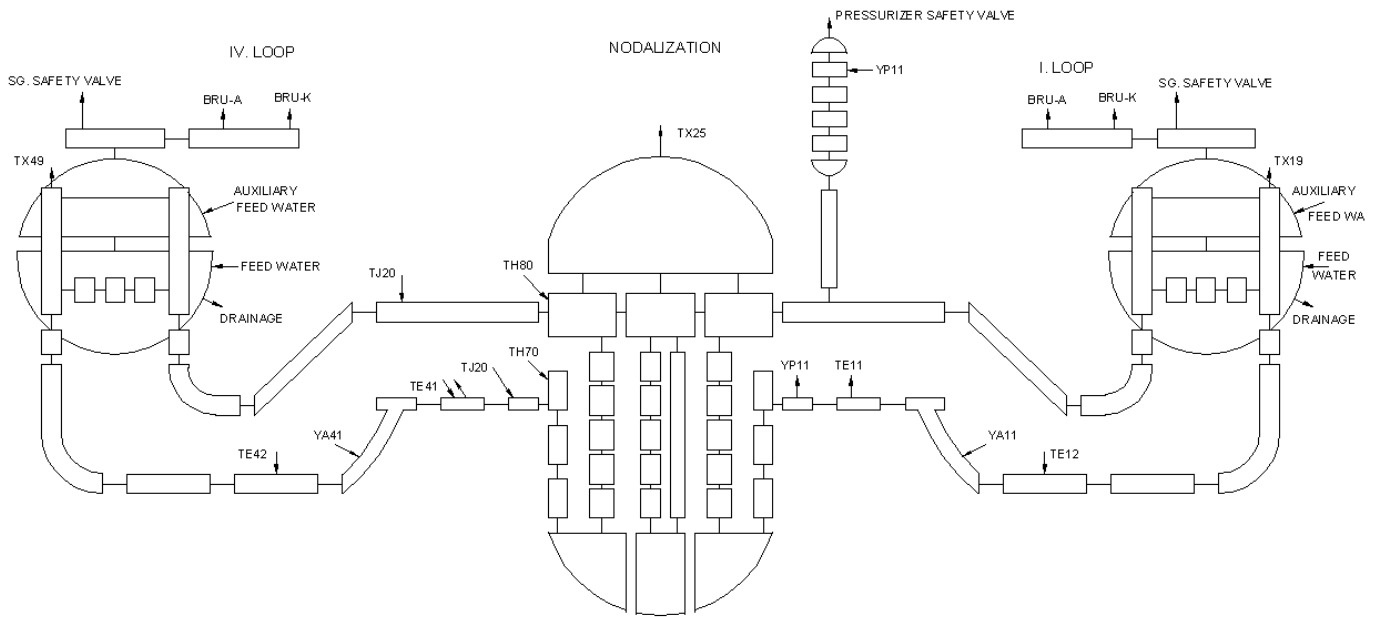
A cikkben röviden bemutatjuk a modell lecserélésére alkalmazott eljárást, összefoglaljuk a régi és az új modell közötti legfontosabb különbségeket. Végül néhány teszt eredményének bemutatásával betekintést adunk az új modell validálásába.

A RETINA beillesztése

A teljesléptékű szimulátor egy valószerű szimulációs keretrendszer köré épül. A szimulátort alkotó modellek futtatását és egymáshoz szinkronizálását egy ütemező program végzi úgy, hogy a valószerű követelményeknek megfelelően minden modell elvégezze a számításokat a 200 milliszekundumos szimulációs cikluson belül. A modellek közötti kommunikáció a szimulátor adatbázisán keresztül valósul meg. A moduláris felépítésnek köszönhetően a termohidraulikai modell lecserélése számítástechnikailag egyszerű feladat volt.

Mivel egy nagy komplexitású rendszert módosítottunk, fontos volt, hogy az átalakítás során keletkező hibák forrásának azonosítása minél egyszerűbb legyen. Ezért a termohidraulikai modell cseréjét három lépésben hajtottuk végre.

Az első lépésben kialakítottuk a SMABRE nodalizációjának megfelelő modellt, és a RETINA-n a szimulátortól függetlenül futtatva hangoltuk be a modellparamétereket a normál üzemi állapotnak megfelelően (1. ábra). A második lépésben az új modellt a szimulátorba illesztettük, és tranziens tesztek futtatása mellett módosítottuk tovább, hogy elegendően legyen az elvárásoknak. Végül a harmadik lépésben megnöveltük a zóna nodalizációjának felbontását, és a tranziens tesztek megismételve igazoltuk az új modell helyes működését. A felsorolt lépésekben a szimulátor eredeti neutronkinetikai modelljét használtuk, hogy a hibakeresést egyszerűbbé tegyük. Az új neutronkinetikai modellt csak ezek után, egy negyedik lépésben cseréltük le, melynek részleteire most nem térünk ki.



1. ábra: A termohidraulikai modell eredeti nodalizációjának részlete (1. és 4. hurok)

Az új termohidraulikai modell ellenőrzésére 12 tranziens teszt került kiválasztásra. A tesztek megválasztásánál az volt az elsődleges cél, hogy lehetőség szerint minél jobban lefedjék a szimulált berendezésekben lezajló fizikai folyamatokat. A kiválasztott teszteken túl az erőmű instruktorainak segítségével számos további tranziens futtatunk le, és vizsgáltunk meg.

Különbségek a modellek között

1994-ben a szimulátor által futtatható tranziensek körét kiterjesztették a nagy hűtőközeg vesztéssel járó (LOCA) baleseti szituációk számítására, melynek validálására az ÁGNES projekt eredményei szolgáltattak jó alapot [1,2]. A kiterjesztéshez az eredeti egyfázisú termohidraulikai modellt a Finnországi Technikai Kutatóintézetben (VTT) kifejlesztett SMABRE (SMAll-BREak) nevű kétfázisú modellre cserélték le, ami alkalmas volt számos kétfázisú áramlási tranziens számítására. A kétfázisú kód beillesztése során az eredeti termohidraulikai modell egyes részeit specifikus modellekkel kellett kiegészíteni, ami nagymértékben megnehezítette a nodalizáció változtatását.

Az új típusú fűtőelemek bevezetése a nodalizáció finomítását tette szükségessé a szimulátorban, ami hozzájárult ahhoz, hogy az eredeti kétfázisú termohidraulikai modellt lecseréljék egy 2000-ben az AEKI-ben kifejlesztett modellre, a RETINA-ra (REactor Thermohydraulics INteractive simulator).

A régi és az új modellrendszer számos tekintetben különbözik egymástól, ami jelentősen megnehezítette az azonos eredmények elérését. A következőkben röviden

összefoglaljuk a legfontosabb különbségeket. További részletek találhatóak [3,4]-ben.

Modellek

Bár a két kód azonos megmaradási egyenletek megoldásán alapul, jelentős különbségek vannak a két fázist elválasztó interfészen keresztüli hő-, tömeg-, és impulzusátadásra használt modellek között. Mindkét modell az öt egyenlet megoldásán alapuló megközelítést alkalmazza, ami a fázisokra felírt két-két tömeg és energia megmaradási egyenletből és egy keverékre felírt impulzus-megmaradási egyenletből áll. Az egyenletrendszer kiegészül még egy ún. drift-flux modellel, ami lehetővé teszi a fázisok között a sebesség különbség kialakulását.

A RETINA eredetileg egy a SMABRE-ban lévőnél bonyolultabb drift-flux modellt tartalmazott, ami a tranziens tesztek eredményeiben komoly eltérésekhez vezetett. Ezért az eredeti drift-flux modellt lecseréltük egy a SMABRE-ban lévőhöz hasonló egyszerűbb modellre.

Az öt egyenletből álló egyenletrendszert további modellekkel kell kiegészíteni, amelyek a fázisok közötti anyag- és energiátanszportot határozzák meg (párolgás és kondenzáció). Szintén külön modellek írják le az áramlást határoló falak és a fázisok közötti hő- és impulzusátadást. Bár a két kódban gyakorlatilag azonos modelleket alkalmaznak a falsűrűdés számítására (Blasius korreláció), a többi modell sok tekintetben különbözik egymástól.

A SMABRE-ban eredetileg használt párolgási és kondenzációs modellt időközben számos helyen módosítani kellett, hogy a szimulátor eleget tegyen az újabb követelményeknek. A modellezett rendszer bizonyos része-

iben (például a térfogatkompenzátorban és a gőzfejlesztőkben) az általános párolgási modelltől eltérő modellek alkalmazására volt szükség, és ezek a módosítások megnehezítették a nodalizáció megváltoztatását.

A RETINA-ban használt párolgási és kondenzációs modell szoros kapcsolatban van az interfészen keresztüli hőátadás modellezésével. A fázisok közötti anyagtranszport leírására használt összefüggés közvetlenül az interfészen keresztüli hőátadásból van származtatva, ami egymással konzisztens anyag- és energiáttranszportot eredményez. Az interfészen keresztüli hőátadás egy egyszerű modellen alapul, melyben a metastabil állapotban lévő víz vagy gőz egy relaxációs paraméter által meghatározott idő alatt kerül újra egyensúlyi állapotba (telítésbe). Ez a paraméter lehetőséget ad arra, hogy az olyan speciális helyeken, mint a gőzfejlesztők vagy a térfogatkompenzátor- ne kelljen külön párolgási modellt bevezetni.

A két kódban használt falhőátadási modellekben szintén jelentős eltérések vannak. Bár bizonyos áramlási formákhoz használt hőátadási korreláció mindkét kódban megjelenik, egymástól eltérő módon került felhasználásra, ami a modellek hőátadási viselkedésében kisebb eltérésekhez vezetett.

Numerikus megközelítés

A RETINA-ban alkalmazott numerikus megközelítés szintén jelentősen eltér a SMABRE-ban lévőétől. A két kódban a geometria leírása és felbontása hasonló módon történik eltolt rácsosztást alkalmazva a nyomás- és sebességmezőkre. Az egyenletek megoldására azonban a SMABRE időben explicit, míg a RETINA időben teljesen implicit módszert használ.

Az implicit megoldók rendszerint iterációs módszert alkalmaznak az egyenletrendszer megoldására. A RETINA-ban alkalmazott megoldó minden iterációs lépésben meghatározza a probléma Jacobi-mátrixát automatikus differenciálás segítségével. A nagy időlépések használata gyors tranziensek esetében a Jacobi-mátrix elemeinek túlbecsléséhez és a megoldás divergenciájához vezethet. A RETINA eredetileg automatikus lépésköz választás segítségével kerülte el a divergenciát, ami a gyors tranziensek esetén leprózta az időlépést.

Ez a stratégia nem bizonyult megfelelőnek a szimulátor által támasztott valósídejű követelmények mellett, ezért az iterációs időlépést a szimulációs ciklusnak megfelelően 200 milliszekundumra állítottuk, és az iterációk számát minden egyes időlépésben egyre korlátoztuk. A bevezetett korlátozások nem okoztak problémát a lassabb tranziensek esetében, de a gyors tranziensek divergenciájának elkerülésére további limitálásokat kellett bevezetni az egyenletrendszerben használt modellek esetén. Amint a következőkben megmutatjuk, a bevezetett szigorú korlátozások ellenére az új termohidraulikai modell elfogadható pontossággal alkalmas minden releváns tranziens futtatására.

Szimulációs eredmények

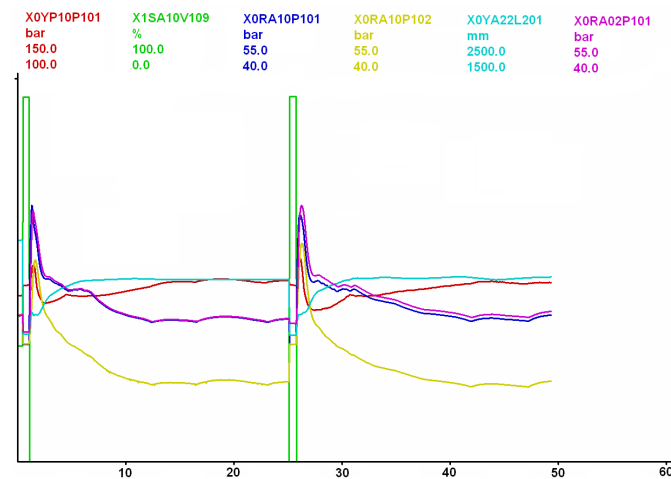
Az új termohidraulikai modell működését a 12 kiválasztott referencia tranziens és számos további teszt segítségével ellenőriztük. A referencia tesztek úgy lettek megválasztva, hogy minél átfogóbb képet adjanak az új modell működéséről [5]. A tesztek között szerepelnek szivattyú- és turbina-kiesések, különböző méretű primer és szekunder oldali törések, stb. A tesztek a régi és az új termohidraulikai

modell felhasználásával egyaránt lefuttattuk a szimulátorban, majd a kapott eredményeket összehasonlítottuk egymással. Ez a metodikai megközelítés megfelel egy validációs eljárásnak, hiszen a felhasznált referenciaszámítások részben összhangban vannak az évtizedes blokki tapasztalatokkal és mérésekkel, másrészt az AGNES projekt biztonsági elemzésein alapulnak. Megjegyezzük azonban, hogy még a hosszú évek kitartó munkájával beállított referenciaszámítások esetén is felmerült néhány esetben, hogy a referenciaszámítások és a blokki megfigyelések nem voltak teljes összhangban. Ilyen esetekben az instruktorok megfigyeléseit felhasználva természetesen a blokki megfigyelések reprodukálására törekedtünk a tesztelés végső fázisában.

Az eredmények megjelenítésére és összehasonlítására a szimulátor Instruktori Rendszerét, illetve egy a nodalizációs adatok részletes megjelenítésére kidolgozott programot (ISNODE) használtunk [6].

A vizsgált tranziensek a blokk névleges üzemi állapotából indulnak, ezért az összehasonlítások megkezdése előtt a RETINA-val létre kellett hoznunk egy kezdeti állapotot, amiben a legfontosabb üzemi paraméterek 2%-os pontossággal megegyeztek az előírt értékekkel. A következőkben bemutatjuk néhány tranziens teszt eredményét.

A 2. ábrán a turbina kiesés tranziens eredményei láthatóak. A vízszintes tengelyen a szimulációs idő, a függőleges tengelyen pedig a különböző színnel rajzolt fizikai mennyiségek láthatóak. Ezek a mennyiségek balról jobbra a térfogatkompenzátor (TK) nyomása, a turbina szabályozószelep pozíció, az 1. és 2. gőzkollektor nyomása, valamint a 2. gőzfejlesztőben lévő vízszint és nyomás.



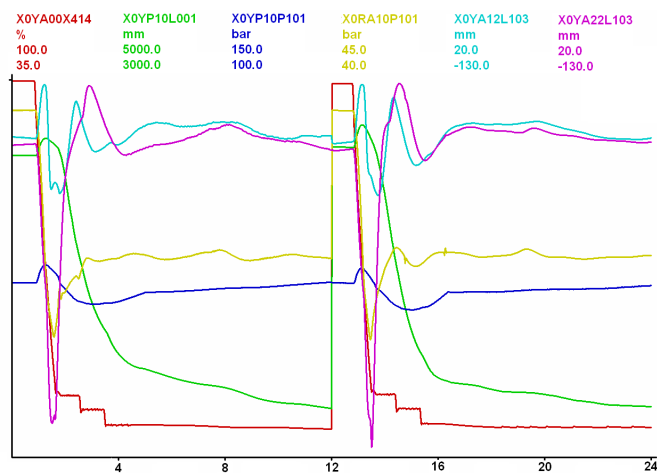
2. ábra: Turbina kiesés

A 0-tól 24 percig terjedő időintervallumban a RETINA-val futtattuk a tranziens, majd azonos kezdeti állapotból indulva megismételtük a számítást a SMABRE-val. A tesztben a szabályozószelep hibája miatt az 1. turbina kiesik, és a két gőzkollektor nyomása hirtelen növekedni kezd. Amint a kollektor nyomás eléri a 48 bar-os értéket, a redukáló szelep kinyit, és gőzt fúj le a kondenzátorba. A lefújás gyorsan ejti a gőzfejlesztő nyomását, ami intenzív forráshoz, és a vízszint megemelkedéséhez vezet.

A 3. ábrán a három fő keringtető szivattyú (FKSZ) kiesés tranziens eredményei láthatóak. Az előzőekhez hasonlóan, 0-tól 12 percig a RETINA eredményei láthatóak, majd megismételtük a tranziens a SMABRE-val. A megjelenített

adatok balról jobbra a neutronteljesítmény, a TK-vízszint és -nyomás, a gőzkollektor-nyomás, és a vízszint az 1-es és 2-es gőzfejlesztőkben.

A tranzien során kiesnek a fő keringtető szivattyúk a 2-es, 4-es és 6-os hurkokban tápkimaradás miatt. A zónán átáramló hűtőközeg forgalma lecsökken, ezért erősebben felmelegszik, és megemeli a nyomást a primerkörben. Végül a reaktorszabályozó 40 %-ra csökkenti a teljesítményt, és a primerköri nyomás ismét a névleges szintre áll be. Érdekes megemlíteni, hogy többek között a három FKSZ kiesés is olyan tranzien folyamat volt, melynél a tesztelés végső fázisában nem ragaszkodtunk a SMABRE eredményekhez. Blokki tapasztalatok alapján ugyanis három FKSZ kiesésnél a reaktorteljesítmény-szabályozó csak kétszer avatkozik be, és nem háromszor. Ennek megfelelően tovább finomítottunk a modelleken, hogy a RETINA számítások a valós blokki megfigyelésekkel legyenek összhangban.



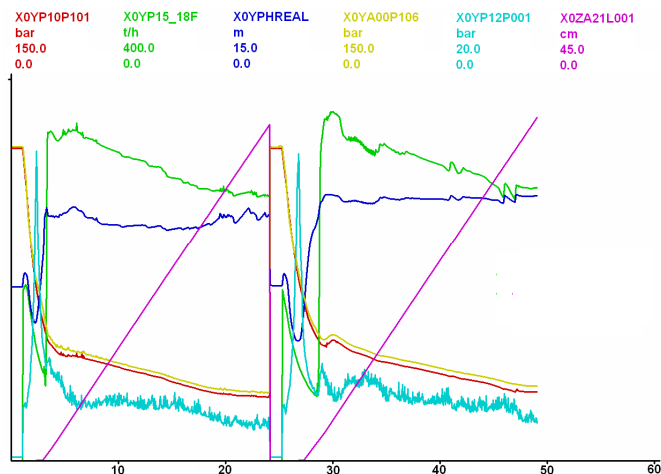
3. ábra: 2., 4., 6. FKSZ kiesés

A 4. ábrán a TK biztonsági szelep nyitás tranzien eredményeit mutatjuk be. A megjelenített adatok a TK-nyomás, TK biztonsági szelep forgalma, TK-vízszint, a zóna feletti nyomás, a buborékoltató tartály nyomása és a zomp vízszintje.

A tesztben a TK biztonsági szelepe kinyit, és lefúj a buborékoltató tartályba. A nyomás a tartályban gyorsan növekszik, amíg eléri a hasadó tárcsájának nyomását, és

átszakítja a tárcsát. Végül a tárcsán keresztül a primerköri hűtőközeg a konténmentbe távozik.

Amint a bemutatott tranzienekből is látható, a RETINA-val futtatott tesztek eredményei gyakorlatilag megegyeznek a SMABRE eredményeivel. Az előre kiválasztott tesztek mellett az instruktorok segítségével számos egyéb tesztet futtattunk és ellenőriztünk le. Ezek a tesztek főleg a TK és a gőzfejlesztők funkcionalitásának ellenőrzésére irányultak, illetve olyan tesztek közül álltak, amelyek csak a szimulátor vezénylő használatával futtathatók le (pl. lehűtés).



4. ábra: TK biztonsági szelep nyitás

Összefoglalás

A paksi teljesléptékű szimulátor eredeti kétfázisú termohidraulikai modelljét egy az AEKI-ben kifejlesztett modellre, a RETINA-ra cseréltük le. Bár az eredeti és az új modell között számos különbség van mind az alkalmazott modellekben, mind a numerikus megközelítésben, a RETINA-val kapott eredmények jól egyeznek a SMABRE eredményeivel. A jó egyezés részben annak köszönhető, hogy a kódokban alkalmazott modellek és numerikus módszerek kielégítő pontossággal írják le a fizikai folyamatokat. Másrészt az irányítástechnikai rendszer mindkét modellt azonos módon vezeti addig, amíg a modellek eredményei elegendően pontosak maradnak.

Irodalomjegyzék

- [1] Végh E., Hegyi Gy., Hegedűs Cs., Hózer Z., Jánosy J. S., Kereszturi A., *Simulation of the rod ejection accident in the Paks Full-scale Simulator*, XI. Annual Simulators Conference, 26, No. 3 1994.
- [2] Végh E., Jánosy J.S., Hózer Z., *Different LOCA scenarios in the Paks Full-scale simulator*. Simulators International XII., 27, No.3 1995.
- [3] Házi G., Mayer G., Farkas I., Makovi P., El-Kafas A.A.: *Simulation of a Small Loss of Coolant Accident by Using Retina V1.0D Code*, Annals of Nuclear Energy, 28, No.16, 1583-1594
- [4] Miettinen J., *A Thermohydraulic Model SMABRE for Light Water Reactor Simulations*, Helsinki, University of Technology, Espoo, Finland, 1999.
- [5] Bürger Gáborné, Házi Gábor, Páles József, Végh Endre, *Szimulátor rekonstrukció, Gép és termohidraulikai modell lecserélése, Rednszertervo*, 2007.
- [6] Végh Endre, *A Paksi Atomerőmű blokk-szimulátora modelljének vizualizálása*, VI. Nukleáris Technikai Szimpózium, 2007.