

„Katasztrófavédelmi díj” I.

PÁLYÁZAT

A PAKSI ATOMERŐMŰ

FÖLDRENGÉSBIZTONSÁGA

A FÖLDRENGÉS-VESZÉLY ÚJRAÉRTÉKELÉSÉTŐL A

CÉLZOTT BIZTONSÁGI FELÜLVIZSGÁLATIG

Dr. Katona Tamás János

2012

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	3
2. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG PROBLÉMÁJA	4
3. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG MEGVALÓSÍTÁSA	4
3.1. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG ALAPKÖVETELMÉNYEI	4
3.2. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁGI PROJEKT	5
3.3. A TELEPHELY SZEIZMICITÁSA, A BIZTONSÁGI FÖLDRENGÉS JELLEMZŐI	6
3.4. MEGALAPOZÓ VIZSGÁLATOK A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG UTÓLAGOS MEGVALÓSÍTÁSÁHOZ	8
3.5. A BIZTONSÁGI FUNKCIÓK MEGVALÓSÍTÁSÁNAK TECHNOLÓGIÁJA	9
3.6. A FELÜLVIZSGÁLAT, MINŐSÍTÉS MÓDSZERTANÁNAK MEGHATÁROZÁSA	11
4. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁGI MEGERŐSÍTÉSEK	12
5. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG ÉRTÉKELÉSE	14
6. AZ EREDMÉNYEK NEMZETKÖZI HASZNOSULÁSA	15
7. A KUTATÓ MUNKA ÚJ TERÜLETEI A CBF UTÁN	15
8. ÖSSZEFOGLALÁS	16
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	16
10. HIVATKOZÁSOK	17

Ábrák:

1. ÁBRA. VISZKÓZUS LENGÉSCSILLAPÍTÓK A GŐZFEJLESZTŐK ALATT	12
2. ÁBRA. HÍDSZERKEZET A LOKALIZÁCIÓS TORNYOK KÖZÖTT	13

Táblázatok:

1. TÁBLÁZAT. A GYORSAN MEGVALÓSÍTHATÓ MEGERŐSÍTÉSEK MENNYISÉGI JELLEMZŐI	12
2. TÁBLÁZAT. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁGI MEGERŐSÍTÉSEK FŐBB MENNYISÉGI JELLEMZŐI	14

1. BEVEZETÉS

Hazánk fejlődése szempontjából létfontosságú a kiszámítható, olcsó, megbízható és környezetkímélő villamosenergia-ellátás, ahogy azt a 2010-ben kidolgozott új, hosszú távú energia stratégia is rögzíti. A környezet- és klímavédelmi, gazdasági és ellátás-biztonsági célrendszert tekintve a nukleáris villamosenergia-termelésnek kedvező sajátosságai vannak (Katona, 2008; Katona, 2010a), ezért hazánk villamosenergia-ellátásának jelenleg és hosszú távon is meghatározó eleme a paksi atomerőmű üzemben tartása s a nukleáris villamosenergia-termelés fejlesztése. Az erőmű jelenlegi 2000MW villamos teljesítménye az ország beépített kapacitásának mintegy húsz százalékát képezi, de az igen magas rendelkezésre állás és teljesítmény-kihasználás miatt, a bruttó hazai termelés döntő hányadát – 2011-ben 43 %-át – adja. A paksi atomerőműnek elhanyagolhatóak a radiológiai környezeti hatásai, nem bocsát ki üvegházhatású gázokat, s bármilyen technológiával is helyettesítenénk, növekedne a teljes élelciklus alatt megtermelt energiára vetített kibocsátás.

Az elmúlt harminc év tapasztalatai egyértelműen igazolták, hogy az atomerőmű biztonsága folyamatos kihívások és fejlesztés tárgya. A fejlődést inspirálja és kikényszeríti a társadalom fokozott figyelme és kritikai magatartása, ennek és a műszaki tudományos fejlődésnek, az üzemeltetési tapasztalatok visszacsatolásának köszönhetően a biztonsági követelmények szigorodása, a nem utolsó sorban a nagy kataklizmákra – mint a TMI üzemzavar, a csernobili és a fukushimai katasztrófa – való szakszerű reagálás kényszere. A biztonság az atomerőmű létezési feltétele, ezért folyamatos figyelem tárgya és elsőbbsége van minden egyéb érdekhez képest. A paksi atomerőmű üzemideje alatt számos biztonságnövelő intézkedés történt, amelyekkel felszámoltuk az atomerőmű szisztematikus biztonsági elemzéseit és a nemzetközi követelményeket, illetve tapasztalatok alapján feltárt hiányokat. Az átfogó biztonságnövelő program eredményeként a biztonság szintje a paksival egykorú atomerőművékéét eléri, sőt meghaladja (Bajsz, Katona, 2002).

Pályázatom tárgyát műszaki-tudományos tevékenységem azon eredményei képezik, amelyek a paksi atomerőmű földrengés-biztonságának megvalósítását szolgálták a telephely földrengés-veszélyeztetettségének nyolcvanas években elkezdett újraértékelésétől a Célzott Biztonsági Felülvizsgálat (CBF) 2011-ben történt végrehajtásával bezáróan. Ez volt a legnagyobb volumenű projekt a paksi atomerőműben végrehajtott biztonságnövelő intézkedések között.

2. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG PROBLÉMÁJA

A paksi atomerőmű telepítésekor a földrengés-veszélyt az MSK-64 skála szerint ötös intenzitásfokra becsülték, amihez szabvány szerint 0,012-0,025g maximális vízszintes gyorsulást rendeltek, s így – az akkori szovjet normáknak megfelelően – az atomerőművet nem tervezték földrengés hatásaira. A tervezési alap alábecslése nyilvánvalóvá vált a nyolcvanas években megváltozott követelmények és az akkor végzett geológiai, szeizmológiai vizsgálatok fényében. 1993-ban pedig kiderült, hogy a tervezés alapját képező biztonsági földrengés maximális vízszintes gyorsulás értéke (PGA) több mint tízszerese lehet a tervezéskor feltételezettnél. A biztonsági probléma tényfeltáró értékelését az paksi atomerőmű 1994-ben publikált első szisztematikus biztonsági elemzéséhez adtam meg (AGNES, 1994).

1993-ban a Paksi Atomerőmű Zrt. egy átfogó projektet indított (Katona, 1995a; Katona, Szepes, 1997; Katona, 1997a), amely a paksi atomerőmű legnagyobb volumenű, csaknem másfél évtizedig tartó biztonságnövelő projektje lett, s mind a mai napig megőrizte aktualitását. A projekt a nemzetközi gyakorlatban precedens nélküli volt, mivel egy földrengésre nem tervezett létesítményt kellett földrengésállóvá tenni, azaz mind jogi, mind pedig műszaki értelemben kezelni kellett azt, hogy az atomerőmű tervezési alapja megváltozott (Katona, 2001; Katona, 2003).

A projekt kidolgozásához és végrehajtásához olyan műszaki-tudományos irányításra volt szükség, amely meghatározta az egész projekt műszaki tartalmát, módszertanát, illetve elméleti és kísérleti munkákkal megalapozta azokat.

3. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG MEGVALÓSÍTÁSA

3.1. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG ALAPKÖVETELMÉNYEI

Az atomerőművek földrengésre való tervezése általánosan azt jelenti, hogy biztosítani kell, hogy a tervezési alapba tartozó, 10^{-4} /év gyakoriságú¹ földrengés alatt és után is megvalósuljanak az alapvető nukleáris biztonsági funkciók.

Gazdasági érdek fűződik ahhoz, hogy biztosítsuk e stratégiai fontosságú létesítmény üzemeltethetőségét a gyakoribb, de a biztonságra nem ható rengések után.

¹ A nukleáris biztonsági követelmények szigorát jellemzi, hogy – míg az EUROCODE8 által előírt, a tervezésnél figyelembe veendő földrengés visszatérési ideje 475 év – az atomerőmű esetében a biztonsági földrengés visszatérési ideje minimum 10000 év.

A földrengésre történő tervezés témakörének áttekintését lásd (Bús, Győri, Katona, 2006) a telephely-vizsgálati aspektusokat pedig (Katona, 2006a) munkákban.

3.2. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁGI PROJEKT

A földrengés-biztonság megvalósításáért a jogi és a műszaki-gazdasági felelősséget a Paksi Atomerőmű Rt. viselte². A Paksi Atomerőmű Rt. – konkrétan jelen sorok írója – dolgozta ki a földrengés-biztonság megvalósításának koncepcióját és a projekt tervét, amelyet a nukleáris biztonsági hatóság 1993-ban az RE-1103 számú határozatával jóváhagyott. A projekt az alábbi fő feladatokat ölelte fel:

- (1) a paksi telephelyre a földrengés-veszély újraértékelését, a biztonsági földrengés jellemzőinek meghatározását, a telephely geotechnikai vizsgálatát, a talajfolyósodás elemzését;
- (2) a földrengés-biztonság koncepciójának meghatározását;
- (3) a biztonságos leállítási és hőelvonási technológiájának kidolgozását, valamint a földrengés-biztonsági szempontból létfontosságú szerkezetek, rendszerek és berendezések jegyzékének elkészítését;
- (4) földrengés esetén követendő üzemeltetési eljárások kidolgozását és bevezetését, szeizmikus műszerezés telepítését;
- (5) a megkövetelt biztonsági funkciók megvalósításához szükséges szerkezetek, rendszerek és komponensek földrengésállóságának értékelése;
- (6) a földrengésállóság növelését szolgáló megerősítések és minősítések megtervezését és megvalósítását,
- (7) a projekt eredményeként elért földrengésbiztonságot a valószínűségi biztonsági elemzés módszerével értékelni kellett, s az ebből eredő intézkedéseket is meg kellett tenni.

A projekt-terv biztosította a projekt-feladatok adekvát voltát, teljességét, nemzetközi auditálhatóságát, ezek végrehajtható, vállalkozásba adható részfeladatokra bontását, ütemezését, s a vállalkozásba adott feladatok tartalmi és módszertani illeszkedését (IBJ, 1996; IBJ, 1999; Katona, 1997a).

Történetileg több fázisa volt a projektnek:

² A földrengés-biztonsági projektnek nem volt fővállalkozója. A projekt komplexitása és előzmény nélkülsége, műszaki újdonsága ellenére a műszaki irányítást a Paksi Atomerőmű Rt. végezte, jóllehet igen sok nagynevű cég közreműködött a projekt megvalósításában.

1986 – 1993	a probléma felismerésének és a felkészülés időszaka, mialatt zajlottak a telephely szeizmicitása körüli tudományos viták, s elkezdődött a földrengés-állóságának előzetes vizsgálata;
1993-1995	a biztonsági földrengés telephely-specifikus jellemzőinek meghatározása, előtanulmányok a megerősíthetőségre, dinamikai kísérletek, a gyorsan megvalósítható megerősítések végrehajtása;
1995-1997	a telephely vizsgálat befejezése, a biztonsági funkciók megvalósítására szolgáló technológia kidolgozása a biztonsági földrengésre, a vizsgálat terjedelmének, a minősítések, megerősítések módszertanának végleges meghatározása;
1997 – 2002	dinamikai számítások, szilárdsági ellenőrzés a végleges, 0,25 g PGA inputra, a megerősítések koncepciójának kiválasztása, a megerősítések tervezése és kivitelezése, a minősítések végrehajtása;
2002	a biztonság valószínűségi módszerrel történő értékelése (földrengés PSA), s az ebből eredő intézkedések végrehajtása;
2007	az Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat végrehajtása, a további vizsgálatokat igénylő területek (talajfolyósodás) meghatározása;
2011-napjainkig	a CBF a tervezési alapon túli helyzetek vizsgálata és a kezelésükhöz szükséges intézkedések meghatározása.

A projekt megvalósításának több mint másfél évtizede alatt négy alkalommal kellett értékelni az atomerőmű földrengés-biztonságát: 1993-1995-ben az AGNES projekt keretében, 1996-1999 között, majd 2007-ben újból az atomerőmű időszakos biztonsági felülvizsgálat keretében (IBJ, 1996; IBJ, 1999; IBJ, 2007), majd legutóbb a CBF keretében (OAH, 2011).

3.3. A TELEPHELY SZEIZMICITÁSA, A BIZTONSÁGI FÖLDRENGÉS JELLEMZŐI

A projekt alapvető feladata – a vezetésem alatt folyó projekt keretében – telephelyi földrengés-veszély vizsgálata volt, ez képezte minden későbbi vizsgálat inputját. A munkának több szakasza volt:

- a nyolcvanas években szovjet szakemberek determinisztikus módszerrel 0,17 g értéket becsültek a biztonsági földrengésre;
- a kilencvenes évek elején végzett első valószínűségi földrengés veszély-

elemzés, amely eredményeként 1993-ban a 10-4/év meghaladási valószínűségű rengéshez 0,35 g maximális vízszintes gyorsulást rendeltek;

- 1993-1996 közötti szakasz, amikor részletes geológiai, geofizikai, szeizmológiai és geotechnikai vizsgálatokkal kiegészítettük a telephelyre vonatkozó ismereteket és az ekkor elvégzett veszély-elemzés a 10-4/év meghaladási valószínűségű rengéshez 0,25 g maximális vízszintes gyorsulást rendelt;
- az 1999 utáni időszak, amikor a teljes veszélyeztetettségi görbét – beleértve a talajfolyósodás veszélyének görbéjét is – meghatározták a földrengés-biztonság valószínűségi értékeléséhez, a földrengés PSA-hoz.

A telephely szeizmicitásának értékelése igen összetett s csaknem tízéves program volt. A geológiai, geofizikai, szeizmológiai vizsgálatokat hazai kutatók és intézmények végezték (Marosi, Meskó, 1997). A földrengés-veszély értékelése az Európai Unió egy PHARE projektjének és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökségnek (NAÜ) támogatásával, jeles külföldi szakemberek bevonásával történt (Arup, 1995). Az értékelés valószínűségi módszerrel történt a Pannon-medence szeizmotektonikai jellegzetességei miatt, a módszer leírását lásd például a (Tóth, Győri, Katona, 2008) közleményben.

A biztonsági földrengés maximális szabadfelszíni gyorsulására 0,25 g adódott. A maximális függőleges gyorsulás értéke 0,2g. A telephelyi szeizmicitás újraértékelése, a maximális méretezési földrengés jellemzőinek és a talajfolyósodás lehetőségének értékelése, valamint a talaj-épület kölcsönhatás számítás miatt, szükség volt a talajmechanikai vizsgálatok újbóli elvégzésére. A talajfolyósodás valószínűségi alapú értékelése szerint a 10-20 m mélység közötti réteg hajlamos folyósodásra, de ennek visszatérési periódusa 10000 évnél kisebb, így ez tervezésen túli eseménynek számít, lásd például (Tóth, Győri, Katona, 2002).

A telephely mikrozeizmikus monitorozása jelenleg is folyik, s a telephely földrengés-veszélyeztetettsége rendszeres felülvizsgálat tárgya, amit legutóbb a 2007 évi időszakos biztonsági felülvizsgálat keretében végeztünk el. Ennek, illetve a Célzott Biztonsági Felülvizsgálat egyik fontos következtetése volt, hogy a talajfolyósodás veszélyét tovább kell vizsgálni, amelyre közreműködéssel korszerű metodika készült (Győri et al, 2012). Az erről szóló publikációt a Magyar Geofizikusok Egyesülete 2012-ben Meskó Attila díjjal ismert el.

3.4. MEGALAPOZÓ VIZSGÁLATOK A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG UTÓLAGOS MEGVALÓSÍTÁSÁHOZ

A paksi atomerőmű földrengés-biztonságát illetően két koncepcionális kérdés volt, amelyek helyes megválaszolása a biztonsági cél elérését és a megvalósíthatóságot egyaránt biztosította:

1. Meg kellett határozni az alapvető biztonsági funkciók megvalósításának – azaz a reaktor leállításának, lehűtésének, hűtve tartásának, s az aktivitás visszatartásának – módját a tervezés alapjába tartozó, s biztonsági határeseménynek számító földrengés esetére;
2. Meg kellett határozni a felülvizsgálat, a minősítés és a megerősítések módszertanát.

A technológia kiválasztása kijelölte a projekt terjedelmét, azaz azokat a rendszereket és az őket befogadó épületeket, amelyek működőképességét, illetve épségét biztosítani kell a 10^{-4} /év gyakoriságú földrengés esetére. A két koncepcionális kérdés megválaszolása egyben a lehetséges műszaki megoldási koncepciók közötti választást, döntéseket igényelt, melyek alapját vezetéssel és részvételemmel folyó széleskörű kutató munka képezték, így:

- 1) Kísérleteket végeztünk az üzemi háttér-rezgést, mint gerjesztést kihasználva, illetve az üzembe helyezés során végzett rezgésdiagnosztikai méréseket feldolgozva elvégeztük a reaktor és primerkör kísérleti modál-analízisét (Katona, Rátkai, Turi, 1989).
- 2) Az egész erőművet gerjesztő, a szakmai gyakorlatban meglehetősen egyedülálló robbantásos gerjesztéssel kísérleti modál-analízist végeztünk a főépület és egyes komponensek rezonancia frekvenciái és a lengésalakjai meghatározására (Katona et al, 1992).
- 3) Megállapítottuk, hogy a primerkör jelentős gerjesztést fog kapni a főépület mozgása által, amelyet viszkózus lengéscsillapítókkal korlátozva a megerősítés megoldható. A megállapításokat messzemenően megerősítették a robbantásos gerjesztéssel végzett mérések és a részletes számítások, mint (Halbritter et al, 1993a; Halbritter et al, 1993b; Katona et al, 1993; Katona et al, 1997).
- 4) A kísérleti eredményeket összehasonlítottuk az előzetes dinamikai számítások eredményével (Katona et al, 1992; Halbritter et al, 1993a és Halbritter et al, 1993b, Katona et al, 1993). A kísérletekkel validáltuk a főépület és a primerkör

dinamikai válaszána számítására kidolgozott számítási modellt és módszert. A módszertani és modellezési változatokra próbaszámításokat végeztünk, például a földalatti csővezetékekre (Krutzik et al, 1998), s a talaj-épület kölcsönhatás számításának módszereire is (Halbritter et al, 1998).

- 5) Valószínűségi és determinisztikus módszerekkel megbecsültük a különböző technológiai és módszertani verziók műszaki-gazdasági következményeit (IBJ, 1996; IBJ, 1999);
- 6) A leginkább megfelelő megerősítési megoldás kiválasztásához numerikus kísérleteket végeztünk (Katona et al, 1995);
- 7) Számításos elemzési módszer célszerűségét igazoltuk az irányítástechnikai keretek esetében (Katona, Kennerknecht, Henkel, 1995).
- 8) Kísérletileg megvizsgáltuk az analitikusan nehezen kezelhető kisnyomású üzemmzavari zónahűtő rendszer (ZÜHR) tartályát. Ezt a munkát japán ösztöndíjjal Tsukubában, a National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention rázóasztalán vizsgáltam meg (Katona, 1997b).
- 9) Megvizsgáltuk és igazoltuk a működő atomerőművek felülvizsgálatára kifejlesztett módszerek alkalmazhatóságát, illetve az alkalmazás korlátait a paksi atomerőmű földrengés-állóságának minősítése terén.
- 10) Feltártuk és értékeltük a szinergiákat a földrengésállóság növelése és más biztonságnövelő intézkedések között, mint például az üzemi rezgés csökkentés (Katona et al, 1994b; Katona et al, 1994c), melynek tapasztalatait is felhasználva döntöttünk a viszkózus csillapítók alkalmazásáról.

A fent felsorolt kutatásokat illetve eredményeik hasznosulását az alábbiakban, a két koncepcionális kérdést megválaszolva, bemutatom.

3.5. A BIZTONSÁGI FUNKCIÓK MEGVALÓSÍTÁSÁNAK TECHNOLOGIÁJA

Az első koncepcionális kérdés középpontjában az állt, milyen technológiával valósítjuk meg a reaktor lehűtését és a leállított reaktorból a remanens hő folyamatos elvitelét. Biztosítani kellett ezáltal, hogy a biztonsági földrengés következtében a dolgozók sugárterhelése ne haladja meg a magyar szabályozásban meghatározott dóziskorlátokat, és hogy a lakosság legveszélyeztetettebb csoportjának sugárterhelésének nagysága ne tegye szükségessé a magyar szabályozás által előírt védelmi intézkedéseket.

A koncepcionális kérdés megválaszolásával tulajdonképpen kijelöltük azokat a

rendszereket, amelyeket kötelezően meg kell erősíteni, illetve működőképességüket igazolni kell a biztonsági földrengésre. A technológia meghatározása, kiválasztása komplex, rendszerszintű döntést igényelt, amelyet több oldalról is kutatási munka, tudományos eredmények támasztottak alá (Katona, Rátkai, Turi, 1989; Katona et al, 1992, Katona et al, 1993, Katona et al, 1994a).

Az alapvető biztonsági funkciók megvalósítására két konkurens technológiai változat létezett. A külső szakértők a Skoda és a VVER főkonstruktor, az OKB Hidropressz által javasolt megoldás szerint a reaktor hosszú távú hűtését az átalakított kisnyomású zóna üzemzavari hűtőrendszer hőcserélőivel kellett volna megvalósítani. Ez és a blokkonként száznál több gyors működésű, gyorsulás-szint túllépésre automatikusan záró hátrányosan hatottak volna a zónasérülés gyakoriságára minden egyéb, nem földrengés alatti állapotban.

Az általam javasolt s megvalósított koncepció lényege az volt, hogy a lehűtés és a tartós hőelvitel történjen a normál lehűtő rendszer segítségével. Ezt lehetővé tette a főépületi megerősítések műszaki megoldásainak vizsgálata és optimalizálása (Katona, Hajmási, 1999; Hajmási, Katona, Kovács, 2000; Katona Hajmási, 2000a; Katona, Hajmási, 2000b), miáltal a turbinacsarnokban lévő rendszerek használhatóvá váltak a földrengés utáni hőelvonáshoz. Bebizonyítottam azt is, hogy ez nem jár plusz ráfordítással, mivel a technológiai rendszer elemek, különösen a gépészműszaki rendszerek nagy része relatíve jelentős beépített kapacitással rendelkeznek, így azok megerősítése várhatóan mérsékelt ráfordításokkal megoldható (IBJ, 1996; IBJ, 1999; Katona 1995b; Katona, 1997a). A komponensek sérülékenységének eloszlását később elméletileg is elemeztem és értelmeztem (Katona, 2010b).

Az alapvető biztonsági funkciók biztosítása mellett a földrengés-biztonság másik, fontos kérdése az üzemeltetői teendők és biztonságos továbbüzemelés feltételeinek meghatározása földrengés esetén és azt követően. Az eredeti elképzelések szerint földrengés esetén egy, igen alacsony gyorsulás-szint meghaladására beállított automatikus védelem leállította volna a reaktort. A nemzetközi gyakorlat azt mutatta, hogy – eltekintve a kifejezetten földrengés-veszélyes területektől, mint Kalifornia, vagy Japán – az automatikus reaktor leállítás hátrányos, mivel a rendszer nem kívánt / hibás működése kockázat-növekedéssel jár, illetve hátrányos a kis földrengések esetén is, amikor a biztonság szempontjából a folyamatos működésnek nem lenne akadálya, s mégis kiiktatjuk ezt a stratégiai kapacitást. E kérdéskört a NAÜ RER/9/035 Project keretében

vizsgáltuk meg. A paksi atomerőműre javasoltam, hogy a kármentesség kritériumául a kumulált abszolút sebességre és válaszspektrum-amplitúdóra vonatkozó határértékeket (EPRI, 1988) adaptáljuk. Ennek módszertanát kidolgoztam (Katona, 1995b).

A koncepciót az RE-1728 határozattal a hatóság jóváhagyta. A koncepció alapján kidolgozott technológiát, Földrengés-biztonsági Technológiai Átalakítások néven Paksi Atomerőmű Zrt. 2570-1089/99 sz. beadványában nyújtotta be a hatóságnak, amire az OAH RE-2384 határozatában adta meg az elvi átalakítási engedélyt. A technológia alkalmasságának próbáját a hatóság a földrengés-biztonsági projektet véglegesen lezáró a RE-3647. sz. határozatban ismerte el.

Az automatikus leállítás előnyeit-hátrányait a fukushimai katasztrófa tapasztalatai alapján felülvizsgáltuk, illetve további elemzését előirányoztuk. A nemzetközi reakciók alapján ma az látható, hogy a moderált vagy alacsony szeizmicitású telephelyeken működő erőművek esetében nem térnek át az automatikus reaktor leállításra.

3.6. A FELÜLVIZSGÁLAT, MINŐSÍTÉS MÓDSZERTANÁNAK MEGHATÁROZÁSA

Az alapvető biztonsági funkciók megvalósításának igazolásául szolgáló felülvizsgálat és minősítés módszertanát – a megvalósíthatóság érdekében – a biztonsági relevanciának megfelelően differenciáltan dolgoztam ki, mely szerint:

- 1) szabványos módszert alkalmaztunk
 - a) az összes osztályba sorolt épület esetében,
 - b) az 1. és 2. biztonsági osztályba sorolt, illetve a 2. földrengés-biztonsági osztályba sorolt gépészeti rendszerelemek esetében;
- 2) szeizmikus határterhelhetőség elemzést (EPRI, 1991) végeztük az összes 3. földrengés-biztonsági osztályba sorolt gépészeti rendszerelem esetében.

A működőképesség minősítését az alábbiak szerint végeztük:

- empirikus minősítő módszert (EPRI, 1992) alkalmaztunk minden esetben, amikor ezt igazoltan megtehettük,
- szabványos tesztelési módszert alkalmaztunk, ha az empirikus módszer nem volt alkalmazható, illetve az új berendezések esetében.

A differenciált metodikát például az épületek modellezése és vizsgálati tekintetében (Katona et al, 1995a) közlemény és (Katona, 2006c) könyvfejezet ismerteti.

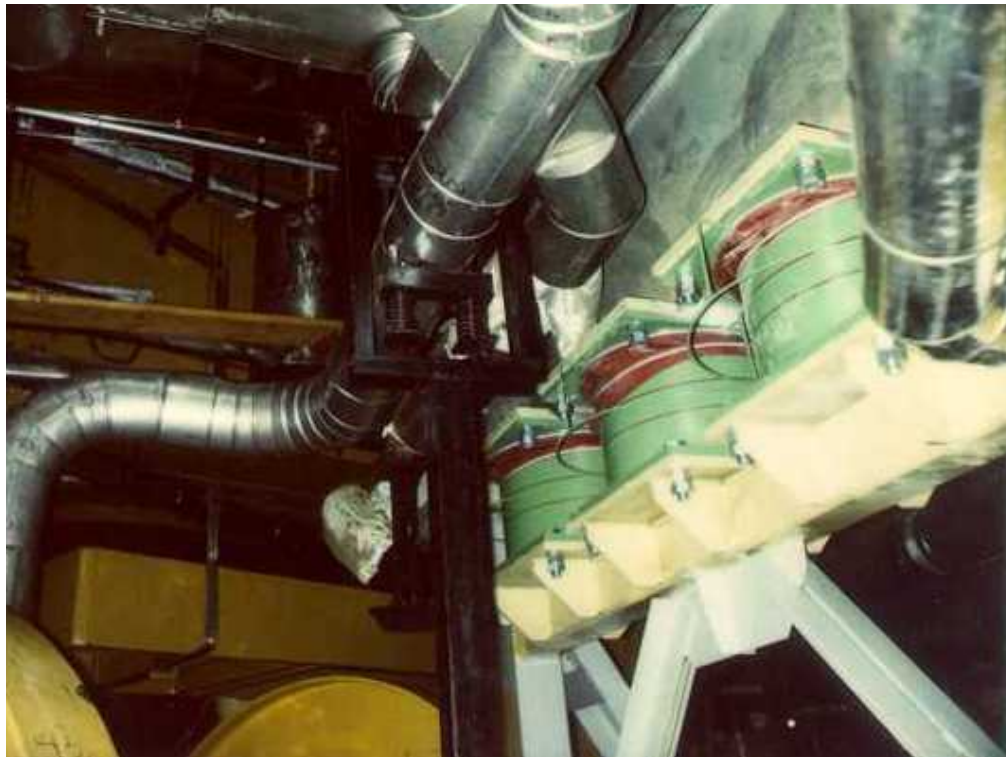
4. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁGI MEGERŐSÍTÉSEK

A könnyen megvalósítható, legsürgősebb megerősítések még egy előzetes felülbecsült földrengés inputra 1994-1995-ben megtörténtek. A megerősítések mennyiségi jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A gyorsan megvalósítható megerősítések mennyiségi jellemzői

a tételek száma összesen, ebből	5507
gépészeti berendezés	202
villamos berendezés	465
kábelcsatorna	2498
irányítástechnikai szekrények, állványok	2061
téglafalak	281
beépített acélszerkezet mennyisége	445 t
akkumulátorok cseréje	teljes körű

A megerősítések kiegészítő tartókkal és/vagy viszkózus lengéscsillapítókkal (lásd az 1. ábrát) történtek.



1. ábra. Viszkózus lengéscsillapítók a gőzfejlesztők alatt

A primerkör megerősítésének koncepciójának kiválasztásának alapját a már említett dinamikai kísérletek és (Halbritter et al, 1993b; Katona et al, 1994a; Katona et al, 1999) elemzések képezték.

Az üzemi épületek, különösen a főépület vizsgálatáról és megerősítéséről több, részletes beszámoló készült (Katona, Hajmási, 1999; Katona Hajmási, 2000a; Katona, Hajmási, 2000b; Hajmási, Katona, Kovács, 2000; Györgyi, Katona Lenkei, 2002; Katona, 2006). A csarnokok hosszirányú tengelyeiben a megerősítés az ott meglévő függőleges síkú rácsos hosszkötések és féktartók jelentős kiegészítéseként, többlet rácsos merevítések beépítésével történt. Keresztirányban a gépház azon szakaszán, ahol a gépház a hosszirányú villamos galéria épületrészéhez, majd azon keresztül a reaktortömbhöz kapcsolódik a keresztirányú, vízszintes erők felvétele a lokalizációs toronyhoz, illetve a lokalizációs tornyok között utólag elhelyezett külső acél rácsos hídszerkezethez való kikötéssel történik, amelyet a 2. ábrán láthatunk.



2. ábra. Hídszerkezet a lokalizációs tornyok között

A technológia és az épületek megerősítésének kivitelezése 1998-ban kezdődött, s 2002 végéig befejeződött. A munkavégzés döntően üzem közben történt. Jelenleg, a 2007. évi Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat által kijelölt feladatok, az egyes rendszerek, mint a földrengés-jelző műszerezés felújítása, illetve a CBF-ben elhatározott

feladatok folynak, jelezve, hogy a biztonság örök figyelmet igénylő kérdés.

A 2. táblázat tartalmazza a megerősítések fő mennyiségi jellemzőit, amelyből megítélhető a projekt rendkívüli volumene.

2. táblázat. A földrengés-biztonsági megerősítések főbb mennyiségi jellemzői

Minősítés és megerősítés	A beépített mennyiség
A primerkör nagyenergiájú csővezetékei és berendezései	250 megerősítés
A főépületi csarnokok (reaktor, turbina) megerősítése	1360 t acélszerkezet
Tartószerkezetek a reaktorépületben, a lokalizációs toronyban	300 t acélszerkezet
A primerkör más csővezetékei és berendezései	760 megerősítés
Biztonsági osztályba sorolt csővezetékek és berendezések a szekunder körben, megerősítések és turbina csarnoki acél tartószerkezetek megerősítése	160 t acélszerkezet
Biztonsági osztályba sorolt csővezetékek a primerkörön kívül	1500 megerősítés
Egyéb osztályba sorolt csővezeték és berendezés	80 megerősítés
A valószínűségi biztonsági elemzés (földrengés PSA) eredményeként meghatározott intézkedések	például a csomópontok megerősítése

5. A FÖLDRENGÉS-BIZTONSÁG ÉRTÉKELÉSE

A megerősítések által elért biztonságot értékelni, számszerűsíteni kell. Ennek eszköze a földrengés valószínűségi biztonsági elemzés, a földrengés PSA. A paksi atomerőműben a 2002-ben befejezett biztonságnövelő program eredményeként a zónaolvadási gyakoriság 10^{-5} /év nagyságrendűre csökkent, s a biztonság szintje ma az azonos korú nyugati blokkoknak megfelel. A földrengés okozta zónaolvadási gyakoriság is 5×10^{-5} /év nagyságrendű, a földrengés PSA nyomán meghatározott kiegészítő megerősítések figyelembevételére esetén. A földrengés PSA alkalmazását a Paksi Atomerőmű földrengés-biztonságának értékelésére a (Katona, Bareith, 1999) és (Elter J, 2006) munkák mutatják be. A földrengés-biztonsági program keretében megerősített, s az alapvető biztonsági funkciókat teljesítő rendszerek elegendő biztonsági tartalékokkal rendelkeznek arra az esetre is, ha a tervezési alapot némileg meghaladó esemény következne be.

Az elért biztonság szintjének megfelelő voltát a tervezési alapra vonatkozó követelmények tekintetében a NAÜ felülvizsgálati missziói, az Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat és legutóbb a Célzott Biztonsági Felülvizsgálat (OAH, 2011) és az azt követő nemzetközi ellenőrzés megfelelőnek találta, elismerte.

Teendőket a CBF keretében a tervezési alapon túli esetekre, a tervezési alapon túli hibamódok következményeinek vizsgálata terén, és a balesetkezelés logisztikai eszközeinek vizsgálata és esetleges megerősítése terén határoztunk meg. A technológiát tekintve ilyen a talajfolyósodás veszélyének és következményeinek további vizsgálata, amelyre közreműködéssel már elkészült egy korszerű metodika (Győri et al, 2012), továbbá a turbina hűtővíz vezeték (nem biztonsági rendszer) törésének vizsgálata arra a tervezési alapon túli esetre, ha a hűtővíz szivattyú földrengés után még üzemben maradna, valamint az egészségügyi épület károsodásának kezelése, ha az nem a várt módon következne be. A baleset-elhárítás logisztikai eszközeit tekintve pedig folyik a védett vezetési pont, a tűzoltóság épülete és az egészségügyi épület földrengés-állóságának felülvizsgálata.

6. AZ EREDMÉNYEK NEMZETKÖZI HASZNOSULÁSA

A NAÜ, a VVER típusú atomerőművek földrengés-biztonsága tárgyában, tizenöt ország részvételével folyó, koordinált kutatási programjának alapjaként kezelte a paksi atomerőműben folyó vizsgálatokat (NAÜ, 2000). A paksi atomerőmű példája adta a VVER-440/213 típus referencia-adatait a többi, mint például a Bohunicei V2, felülvizsgálatához (IAEA, 1999, p. 82). A hazai tudományos program részét képezte az OECD Nuclear Energy Agency tárgyi programjainak is, (Katona, 2001b) és a (Tóth, Györgyi, Katona, 2008). A paksi atomerőmű földrengés-biztonsági projektjének tudományos eredményei és tapasztalatai hasznosultak a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség tárgyra vonatkozó előírásainak kidolgozásánál lásd például az IAEA-TECDOC-724, IAEA-TECDOC-1176, IAEA Safety Reports Series No. 28 dokumentumokat (NAÜ, 1993; 2000; 2003b).

7. A KUTATÓ MUNKA ÚJ TERÜLETEI A CBF UTÁN

Jelenleg, világszerte a fukushimai katasztrófát követő felülvizsgálatok rövidtávú feladatai vannak előtérben, de ezekkel együtt megindultak a fundamentális kutatások is a természeti veszélyek elemzése terén épp úgy, mint a biztonság értékelése, a védelem és a következmény kezelés fejlesztése terén.

A földrengés-biztonsági elemzések eredményét jelentős bizonytalanságok terhelik, amelyek elméleti aspektusainak vizsgálva javaslatot tettem a bizonytalanságok kezelésére a korszerű valószínűség elméletek alkalmazásával, illetve a sérülékenység kumulált

abszolút sebesség függvényében történő leírásával (Katona, 2010b; 2010c, 2011, 2012a, 2012b). Ez a kutatások, illetve ezek folytatása kapcsolódik a NAÜ által szervezett nemzetközi kutatási kooperációhoz (International Seismic Safety Center - ISSC) is.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

Kidolgoztam a paksi atomerőmű földrengés-biztonsága felülvizsgálatának és megvalósításának koncepcióját, a biztonságnövelő projekt tervét. Meghatároztam az alapvető biztonsági funkciók megvalósításához szükséges technológia koncepcióját, s az üzemzavar elhárítási eljárás, a földrengés-jelzés, illetve műszerezésnek alapjait.

Meghatároztam a felülvizsgálat, a minősítés és a megerősítések módszertanának rendszerét. Igazoltam a módszertan kiválasztásának megfelelőségét az irányításom alatt, illetve a részvételemmel folyó, robbantásos kísérletekkel, tesztekkel, próbaszámításokkal és numerikus kísérletekkel.

A fentiek alapján a földrengés-biztonsági projekt keretében megvalósult a paksi atomerőmű megerősítése és minősítése a tervezés alapját képező biztonsági földrengésre, amelyet a nemzetközi felülvizsgálatok, az időszakos biztonsági felülvizsgálatok és a Célzott Biztonsági Felülvizsgálat is megfelelőnek minősített. Ugyanakkor a CBF kijelölte azokat a vizsgálati területeket, amelyeken a tervezési alapot meghaladó hibamódokat, illetve a baleset-elhárítás feltételeit javítani kell. Ezeken a területeken is már értékelhető eredményeim születtek.

A földrengés-biztonság elméleti aspektusait tekintve, a valószínűségi biztonsági elemzésekkel összefüggésben a szerkezetek sérülékenységének új módszerekkel történő leírására tettem javaslatot és megadtam a kumulált abszolút sebesség mint kár-indikátor értelmezését. Hozzájárultam a nemzetközi nukleáris biztonsági követelmények kifejlesztéséhez.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom vezetőimnek és kollégáimnak a Paksi Atomerőmű Zrt.-nél azért, hogy tudományos tevékenységemet jóindulattal és támogatólag kezelték, sőt több kollégám igen hasznos személyes hozzájárulással is segítette. Köszönettel tartozom azoknak a szakértőknek, vállalkozóknak, kül- és belföldieknek egyaránt, akik végrehajtóként részt vettek a földrengés-biztonsági és az üzemidő hosszabbítási projektek munkáiban azért, hogy engem együtt alkotó kollégaként kezeltek.

10. HIVATKOZÁSOK

- AGNES Jelentés (1994), A Paksi Atomerőmű biztonságának újraértékelésére szolgáló AGNES projekt fő következtetései. KFKI AEKI, 1994. október.
- Arup (1995), VVER 440-213 Seismic Hazard Re-evaluation, PHARE Project No.:4.2.1, Ove Arup, Contract No 94-06000
- Bajsz J, Katona T (2002) Achievements and challenges of Paks NPP, International Conference Nuclear Energy for New Europe, Kranjska Gora, Slovenia, September 9-12, 2002
- Bus Z, Győri E, Katona T I (2006) Nukleáris létesítmények földrengésbiztonsága. A földrengéssel kapcsolatos nemzetközi szakirodalom feldolgozása és javaslatlattertel az NBSZ kötetek átdolgozására és a kiadandó útmutatókra, Georisk Kft, 2006
- Elter J. (2006), Insights from the seismic probabilistic safety analysis of Paks Nuclear Power Plant, in Reliability, Safety and Hazard: Advances in Risk-informed Technology, Editor: P.V. Varde, 2006, pp. 381–387.
- EPRI (1991) A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1) report NP-6041-M, Rev.1 EPRI, Palo Alto, 1991
- EPRI (1992) Generic Implementation Procedure for Seismic Verification of Nuclear Power Plant Equipment, Rev. 2, SQUG, 1992.
- EPRI (1988) Criterion for determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake, EPRI NP-5930, July 1988
- Györgyi J, Katona T, Lenkei P (2002) Szerkezeti és modellezési problémák a Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága értékelése és megerősítése során. Magyarország földrengésbiztonsága. Tudományos konferencia. , Győr, 2002. november 05.
- Győri E., Tóth L., Gráczer Z., Katona T. (2012), Liquefaction and Post-Liquefaction Settlement Assessment — A Probabilistic Approach, Acta Geod. Geoph. Hung., Vol. 46(3), pp. 347–369 (2011), DOI: 10.1556/AGeod.46.2011.3.6
- Hajmási P, Katona T, Kovács P (2000), A Paksi Atomerőmű főépületének földrengésállósági megerősítése. In: Tartók 2000: VI. Magyar Tartószerkezeti Konferencia. Budapest, pp. 196-213.(ISBN:963-420-640-9)
- Halbritter A, Katona T, Krutzik NJ, Turi L (1993a) Dynamic Response of VVER-440/213 PAKS Nuclear Power Plant to Seismic Loading Conditions and Verification of Results by Natural Scale Experiments. In: Proceedings of the SMiRT-12 Conference Seminar No. 16 on Upgrading of Existing NPPs with 440 and 1000 MW VVER type Pressurized Water Reactors for Severe External Loading Conditions. Vienna, Austria, 1993.08.23-08.25. Vienna: IAEA, pp. 534-568.
- Halbritter A, Katona T, Krutzik NJ, Ratkai S (1993b) Structural Dynamic Response of the Primary System of the VVER-440/213 PAKS NPP due to Seismic Loading Conditions. In: Proceedings of the SMiRT-12 Conference Seminar No. 16 on Upgrading of Existing NPPs with 440 and 1000 MW VVER type Pressurized Water Reactors for Severe External Loading Conditions. Vienna, Ausztria, 1993.08.23-08.25. Vienna: IAEA, pp. 569-582.
- Halbritter AL, Krutzik NJ, Boyadjiev Z, Katona T (1998), Dynamic analysis of VVER type nuclear power plants using different procedures for consideration of soil-structure interaction effects. NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN 182:(1) pp. 73-92. (1998)

- IBJ (1996), Paksi Atomerőmű 1-2. blokk Időszakos Biztonsági Jelentés, Paksi Atomerőmű Zrt Paks, 1995-1996. Katona T által írt 1.1.5. és 3.4.6. fejezetek
- IBJ (1999), Paksi Atomerőmű 3-4. blokk Időszakos Biztonsági Jelentés, Paksi Atomerőmű Zrt Paks, 1998-1999, Katona T által írt 1.1.5., 2.2.4. és 3.3.6 fejezetek, illetve 2-3. melléklet
- IBJ (2007), Paksi Atomerőmű 1-4. blokk Időszakos Biztonsági Jelentés, Paksi Atomerőmű Zrt Paks, 2007; ebben Burján T, Katona T, Papp S, 3.3.6.V számú vizsgálati jelentés, A földrengés-tűrés minősítésének felülvizsgálata
- ISSC (2010) International Atomic Energy Agency, International Seismic Safety Center, <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/seismic-safety/>
- Katona T, Turi L, Ratkai S (1989), Predvaritelnie issledovaniya seismostoykosti na AES Paks, ENERGIAGAZDÁLKODÁS 8: (Avgust, 1989) pp. 35-36., Moskva, UDK 699.841.002.5
- Katona T, Bajszy J (1992) Plex at paks - making a virtue out of necessity. NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL 37:(455) pp. 27-31.
- Katona T, Turi L, Halbritter A, Krutzik NJ (1992), Experimental and Analytical Investigation of PAKS NPP Buildings Structures. In: Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Madrid, Spanyolország, 1992.07.19-1992.07.24. Rotterdam: A.A.Balkema, pp. 1609-1618.
- Katona T, Ratkai S, Turi L, Halbritter AL, Krutzik NJ (1993), Dynamic Analysis of VVER-440 Nuclear Power Plant for Seismic Loading Conditions at PAKS. In: 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-12). Stuttgart, Németország, 1993.08.15-1993.08.20. Elsevier - North-Holland, pp. 229-234. Paper K08/4.
- Katona T, Ratkai S, Halbritter AL, Krutzik NJ, Schütz W (1994a), Requalification of the dynamic behavior of the primary system of the VVER-440/213 at PAKS. In: Proceedings 10th European Conference on Earthquake Engineering. Vienna, Austria, 1994.08.28-1994.09.02. Rotterdam: Balkema, pp. 2839-2845.(ISBN:90-5410-528-3
- Katona T, Ratkai S, Delinic K, Zeitner W (1994b), Reduction of operational vibration and seismic design of the feed-water piping system of the VVER-440/213 at Paks. In: 10th European Conference on Earthquake Engineering. Vienna, Ausztria, 1994.08.28-1994.09.02. Rotterdam: A.A.Balkema, pp. 2847-2852.
- Katona T, Ratkai S, Zeitner W, Richter G, Delinic K, Reinsch KH (1994c), Reduktion der Betriebsschwingungen der Speisewasserleitung des KKW Paks. In: 20th MPA Seminar: Vol. 1-2. Stuttgart, Németország, 1994.10.06-1994.10.07.
- Katona T (1995a), A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága. ENERGIAGAZDÁLKODÁS XXXVI:(2) pp. 43-46. (1995)
- Katona T (1995b), Description of the ASTS at NPP Paks. In: Advisability of an Automatic Seismic Trip System (ASTS) in Nuclear Power Plants, : RER/9/035, IAEA, Vienna, Austria, (1995), pp. 64-78.
- Katona T, Kennerknecht H, Henkel F.O. (1995), Earthquake design of switchgear cabinets of the VVER-440/213 at Paks. In: Riera J D (szerk.), Transactions of the 13th international conference on structural mechanics in reactor technology (SMiRT-13). Porto Alegre, Brazília, 1995.08.13-1995.08.18. pp. 435-440. Paper K073.
- Katona T, Ratkai S, Halbritter A, Krutzik NJ, Schütz W. (1995a), Time versus frequency domain calculation of the main building complex of the VVER 440/213 NPP PAKS.

- In: Riera JD (szerk.), Transactions of the 13th international conference on structural mechanics in reactor technology (SMiRT-13). Porto Alegre, Brazilia, 1995.08.13-1995.08.18., pp. 187-192. Paper K032.
- Katona T, Szepes K (1997), Seismic assessment and upgrading of the Paks nuclear power plant. SCIENCE AND TECHNOLOGY IN HUNGARY HU ISSN1215-489X: pp. 32-36.
- Katona T (1997a), Seismic assessment and upgrading of PAKS nuclear power plant. SMiRT-14 Post Conference Seminar No. 16, Vienna, Ausztria, 1997.08.25-1997.08.27. In: Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities: IAEA-TECDOC-1202, Vienna. 2001, ISSN 1011-4289, pp. 9-17
- Katona T (1997b), Analysis of the Dynamic Behaviour of the Low-Pressure Emergency Core Cooling System Tank at Paks NPP. SMiRT-14 Post Conference Seminar No. 16, Vienna, Ausztria, 1997.08.25-1997.08.27. In: Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities: IAEA-TECDOC-1202, Vienna. 2001, ISSN 1011-4289, pp. 305-321
- Katona T, Ratkai S, Halbritter A, Krutzik NJ, Schütz W (1997) Verification of dynamic characteristics and response results of the VVER-440/213 main building complex Paks based on latest blast experiments. In: Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14). Lyon, Franciaország, 1997.08.17-1997.08.22. pp. 583-590. Paper KW2/8.
- Katona T, Papp S, Ratkai S, Halbritter A, Krutzik NJ, Schütz W (1999) Dynamic Analysis and Seismic Upgradings of the Reactor Cooling Systems of the VVER-440/213 PAKS 1-4. In: 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14). Seoul, Dél-Korea, 1999.08.15-08.20. Paper K11/3.
- Katona T, Hajmási P (1999) A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsági programja és a reaktor (üzemi) főépület földrengésállósági megerősítése : I. rész., MAGYAR ÉPÍTŐIPAR 11-12: pp. 346-350.
- Katona T, Bareith A, (1999), Seismic Safety Evaluation and Enhancement, at The Paks Nuclear Power Plant. In: Proceedings of the OECD/NEA Workshop on Seismic Risk: NEA/CSNI/R(99)28. Tokyo, Japán, 1999.08.10-08.12. Paris: Nuclear Energy Agency, Paper III-3.
- Katona T, Hajmási P (2000a) A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsági programja és a reaktor (üzemi) főépületének földrengésállósági megerősítése : II. rész. MAGYAR ÉPÍTŐIPAR 1-2: pp. 39-43.
- Katona T, Hajmási P (2000b) A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsági programja és a reaktor (üzemi) főépület földrengésállósági megerősítése : III. rész. MAGYAR ÉPÍTŐIPAR 3-4: pp. 106-113.
- Katona T (2001) Seismic Safety Evaluation and Enhancement at the Paks Nuclear Power Plant. In: Workshop on the seismic re-evaluation of all nuclear facilities: workshop proceedings. Ispra, Olaszország, 2001.03.26-2001.03.27.
- Katona T J (2003) Seismic upgrading of Paks NPP, International Symposium on Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities, IAEA, Vienna, 2003. Paper IAEA-CN-106/51.
- Katona T (2006a) Nukleáris létesítmények telephely kiválasztására és vizsgálatára vonatkozó differenciált követelmények. SOM SYSTEM KFT. (2006)
- Katona T J (2006b) A Paksi Atomerőmű biztonságának szerkezet-dinamikai aspektusai. In: Györgyi J (szerk.) Szerkezetek dinamikája. Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2006. pp. 375-392. (ISBN:963-420-868-1)

- Katona T J (2008) A nukleáris energia szerepe a fenntartható fejlődésben, *Nukleon* 17: 1-11
- Katona T J (2010a) Nuclear power generation as a reasonable option for energy strategies (Chapter 1). In: Tsvetkov P (szerk.) *Nuclear Power*. Rijeka: SCIYO, 2010. pp. 1-15. (ISBN:978-953-307-110-7)
- Katona T J (2010b) Options for the treatment of uncertainty in seismic probabilistic safety assessment of nuclear power plants. *POLLACK PERIODICA* 5:(1) pp. 121-136.
- Katona T J (2010c), Új elvi lehetőségek a földrengés PSA bizonytalanságának kezelésében. *NUKLEON* május:(3. évf.) Paper 63.
- Katona T J (2011), Interpretation of the physical meaning of the cumulative absolute velocity. *POLLACK PERIODICA* Volume 6, Number 1/April 2011, pp 99-106.
- Katona T.J. (2012a) Modeling of fatigue-type seismic damage for nuclear power plants, Elsevier, *Computational Materials Science* 64 (2012) 22–24,
- Katona T.J. (2012b) Modelling of Fatigue-Type Seismic Damage for Nuclear Power Plants, *Open Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 2, 41-46, doi:10.4236/ojsst.2012.22006 Published Online June 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/ojsst>)
- Krutzik NJ, Schutz W, Boyadjiev Z, Katona T (1998) Dynamic analysis of VVER type nuclear power plants using different procedures for consideration of soil-structure interaction effects. *NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN* 182:(1) pp. 73-92.
- Marosi S, Meskó A (1997) *A Paksi Atomerőmű Földrengésbiztonsága, szerkesztette: Marosi Sándor és Meskó Attila, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1997.*
- NAÜ (1993) Probabilistic Safety Assessment for Seismic Events. IAEA, Vienna, 1993. IAEA-TECDOC-724. ISSN 1011-4289. Printed by the IAEA in Austria. October 1993, Katona T. a szerzői kollektíva tagja
- NAÜ (2000) Benchmark Study for the Seismic Analysis and Testing of WWER Type NPPs. IAEA-TECDOC-1176, 31 October 2000, Katona T. a szerzői kollektíva tagja
- NAÜ (2003a) Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No NS-G-1.6 IAEA, Vienna, 2003
- NAÜ (2003b) Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plants, IAEA Safety Reports Series No. 28, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003, Katona T. a szerzői kollektíva tagja
- NAÜ (2009a) Safety Standards Series No NS-G-2.13, Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations, IAEA, Vienna, 2009
- OAH (2011), Nemzeti Jelentés a Paksi Atomerőmű Célzott Biztonsági Felülvizsgálatáról, OAH, Budapest, 2011. december 29.
- Tóth L, Győri E, Katona T (2002) A felszíni laza rétegsor hatása a földrengés okozta gyorsulásokra, Magyarország Földrengéskockázata, Győr
- Tóth L, Győri E, Katona T J (2008) Current Hungarian Practice of Seismic Hazard Assessment. In: OECD NEA CSNI Workshop on Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis (PSHA) Methodologies and Applications. Lyon, Franciaország, 2008.04.07-2008.04.09. OECD NEA, pp. 313-344. Paper NEA/CSNI/R(2009)1.