

KIHÍVÁSOK ÉS VÁLASZOK: A KÜLSŐ VESZÉLYEK KEZELÉSE A KORSZERŰ NUKLEÁRIS TERVEZÉSI GYAKORLATBAN

CHALLENGES AND RESPONSES: DEALING WITH EXTERNAL HAZARDS IN THE STATE-OF-THE-ART NUCLEAR DESIGN PRACTICE

Katona Tamás János

az MTA doktora, professor emeritus, Pécsi Tudományegyetem, Pécs
katona.tamas@mik.pte.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Az atomerőművek külső veszélyekkel szembeni biztonságát a telephelyre jellemző veszélyek komplex vizsgálata, adekvát jellemzése és a veszélyek hatásaival szemben védelmet biztosító műszaki megoldások rendelkezésre állása határozza meg. A dolgozatban azt kívánjuk bemutatni, hogy vannak kipróbált műszaki megoldások a veszélyek hatásaival szemben. Olyan példákat mutatunk be, amelyekben az atomerőműveket ért hatások hasonlóak vagy még súlyosabbak voltak azokhoz képest, amelyeket a paksi telephelyen is lehetségesnek tartunk, s amelyeket az atomerőművek biztonságosan elviseltek. A pozitív tapasztalatok és a külső veszélyekkel szembeni védelem megvalósítására rendelkezésre álló műszaki módszerek bemutatása a külső veszélyekkel szembeni biztonság jobb megértését kívánja szolgálni a probléma súlyosságának alábecslése nélkül.

ABSTRACT

Safety of nuclear power plants with respect to external hazards is defined by the adequacy of the site investigation and characterisation and availability of proven engineering solutions for protection against effects of hazards. In the paper, cases are presented where the effects of external hazards affecting the nuclear power plants have been similar or even more severe as those hazards that are identified at the Paks site, and the plants sustained these events safely. Presentation of the positive experiences and available design methods for protection against external hazards should provide a better understanding of the external hazard safety of existing and new nuclear power plants without underestimating of the seriousness of the issue.

Kulcsszavak: nukleáris biztonság, tervezési alap, tervezési követelmények, külső veszélyek, földrengések, tornádók, extrém időjárás, árvíz, térbeli szétválasztás, redundancia, biztonsági tartalék

Keywords: nuclear safety, design basis, design requirements, external hazards, earthquakes, tornados, extreme weather, flooding, spatial separation, redundancy, safety margins

BEVEZETÉS

A 2001. szeptember 11-i terrortámadás, valamint a fukusimai atomerőmű 2011-es balesete drámai módon ráirányította a szakmai és a laikus közönség figyelmét az atomerőművek külső veszélyekkel szembeni védettségére. Úgy tűnt, az ártó szándékkal és a kiszámíthatatlan természeti csapásokkal szemben nem lehet megvédeni az olyan potenciálisan veszélyes létesítményeket, mint az atomerőművek. Emellett bebizonyosodott, hogy a csernobili katasztrófához hasonlóan a fukusimai baleset hátterében is mulasztás, a felismert hiányosság késedelmes kezelése rejlik. A csernobili katasztrófa után harmincöt évvel és a fukusimai baleset után tíz évvel – a paksi új blokkok létesítésének engedélyezése idején – aktuális a külső veszélyekkel szembeni műszaki védelem lehetőségéről szólni, és bemutatni, hogy kellő gondossággal és a korszerű ismeretek alkalmazásával a külső veszélyekkel szemben biztonságos atomerőműveket lehet tervezni és üzemeltetni.

A külső veszélyekkel szembeni védelem alapvető biztonsági követelmény volt az első atomerőművek tervezésénél is, s ez a követelmény egyre szigorúbbá vált a veszélyekre és azok konzekvenciáira vonatkozó ismeretek gyarapodásával és a növekvő fenyegetettséggel. A kockázat csökkentése érdekében az atomerőműveket igen kis valószínűséggel előforduló, s hatásaikban rendkívüli veszélyekre kell tervezni. Ez azt jelenti, hogy például az atomerőművek tervezési alapját általában a 10^{-4} /év vagy ennél még kisebb gyakorisággal előforduló természeti hatások képezik, szemben a szokványos ipari, s közöttük sokszor potenciálisan nagy kockázatú létesítmények tervezésével, ahol mintegy százszor gyakoribb s hatásokban sokkal kevésbé súlyos eseményekkel számolnak. Konkrétan az új paksi blokk esetében a 10^{-5} /év gyakoriságú (ritkaságú!) természeti hatásokra kell tervezni. E jelentős különbség mellett a nukleáris reaktorok, az atomerőművek fejlesztése, tervezése empirikusan ellenőrzött ismeretek alapján, igazolt módszerekkel történik, még akkor is, ha az empirikus ellenőrzés nem triviális, hiszen kísérleti céllal természeti katasztrófák komplex hatásait előidézni nem egyszerű feladat.

A tervezési eljárások, a műszaki megoldások fejlődése az elmúlt negyven év alatt jelentősen javították, gyakorlatilag megoldhatóvá tették a külső veszélyek hatásaival szembeni védelmet. Ennek elsődleges feltétele, hogy az atomerőmű tervezési alapját helyesen határozzák meg, azaz a telephelyre jellemző veszélyeket megfelelően jellemezzék. A szakszerű tervezésen túl a tervezőnek elegendően nagy műszaki – rendszertechnikai és szilárdsági – tartalékokat kell biztosítania a nem várt, a tervezés alapját meghaladó hatásokkal szemben. A külső veszélyek tudományos alapokon nyugvó jellemzése mellett, amelyről a *Magyar Tudomány* jelen számában lévő cikkek is szólnak, a biztonság garanciája a rendkívüli gondosság a tervezés, a gyártás, az építés és az üzemeltetés során. A nukleáris energetikát két nagy baleset, a csernobili és a fukusimai atomerőmű balesete stigmatizálja, ezek közül a fukusimai természeti csapás következménye. A biztonság

gyakorlati megvalósíthatóságának igazolását nem a vélekedés, hanem – 2020 végéig számolva – 18 740 reaktorév biztonságos működés adja, miközben mindkét baleset ősokei között nem annyira a tudáshiányból eredő elkerülhetetlenséget, hanem emberi mulasztást fedezhetünk fel.

Atomerőművet szinte bárhol lehet építeni. A lehetőséget mindenekelőtt az határozza meg, hogy léteznek-e olyan műszaki eszközök, amelyek alkalmazásával a telephely és a tágabb környezet veszélyei ellenére az atomerőmű felépíthető és biztonságosan üzemeltethető. Egy konkrét telephely kiválasztásának észszerűségét egyéb szempontok, mint például a hűtővíz rendelkezésre állása, a regionális gazdaságfejlesztési igények, logisztikai szempontok, az adott telephelyen a biztonsági követelmények teljesítéséhez szükséges ráfordítások határozzák meg. Jelen dolgozatban azt kívánjuk bemutatni, hogy vannak kipróbált műszaki megoldások a veszélyek hatásaival szemben. Olyan példákat mutatunk be, amelyekben a hatások hasonlóak voltak azokhoz, amelyeket a paksi telephelyen is lehetségesnek tartunk. Az, hogy a külső veszélyek hatásait ténylegesen kiállt műszaki megoldásokról szólunk, nem relativizálja a veszélyekkel szembeni biztonság kérdését, de mindenképp teljessé és realiztikusabbá kívánja tenni azt a képet, amelyet ma, jó okkal, a fukusimai katasztrófaélmény ural.

A KIHÍVÁSOK ÉS VÁLASZOK

Mi a veszély, s miként kezeljük?

A veszély a kár kialakulásának lehetősége valamilyen természeti vagy technogén okból kifolyólag. Így van földrengésveszély, árvízveszély, tornádóveszély, robbanásveszély, de amikor bekövetkezik, akkor már nem veszélyről beszélünk, hanem természeti vagy emberi tevékenységből eredő eseményről, jelenségről, azaz árvízről, földrengésről, robbanásról stb. A jelenséget fizikai paraméterekkel lehet jellemezni, amelyek meghatározzák a természetes és épített környezetre gyakorolt hatást. A telephely jellemzése során megállapítjuk, milyen valószínűséggel fordulhat elő egy adott paraméterrel jellemezhető esemény, vagy pontosabban, mi az éves valószínűsége egy adott paraméterérték meghaladásának. Ezt a függvényt veszélyeztetettségi görbének nevezzük. A kockázat számszerűsítve nem más, mint a veszélyeztetettségi görbe és a következményt jellemző függvény szorzata. Ez utóbbi kifejezi, hogy az adott hatás esetén milyen mértékű kár fordulhat elő emberéletben, anyagi javakban. A nukleáris biztonsági elemzésekben a kár közvetett mértéke az adott veszély hozzájárulása a reaktor aktív zónájának sérülési gyakoriságához vagy a nagy korai radioaktív kibocsátás gyakoriságához. A magyar nukleáris biztonsági szabályozás szerint az aktív zóna sérülésének éves gyakorisága 10^{-5} /év, míg a nagy és korai kibocsátásé 10^{-6} /év minden lehetséges forgatókönyvre összegezve.

A veszélyek létét, a veszélyeztetettség mértékét nem a félelmeink, hanem fizikai törvények határozzák meg. Fizikai feltételek hiányában ne várjuk, hogy valamilyen veszély bekövetkezik csak azért, mert igen kis valószínűségű eseményeket is figyelembe kell venni a tervezésnél. Magyarán, a „kapanyél nem sül el”. Így az oklahomaihoz hasonló tornádógyakorissággal és -méretekkel, pusztító hurrikánokkal nem kell számolni Magyarországon még akkor sem, ha tornádó vagy pusztító erejű, extrém sebességű szellőkések előfordulhatnak nálunk is.

A veszélyeket elkerülhetjük a telephely megfelelő kiválasztásával (pl. a karsztüreg beomlásának veszélyét elkerülhetjük, ha a telephely alatt nincs karsztüreg). A veszéllyel szemben védekezhetünk megfelelő tervezéssel, felkészüléssel, amihez a telephelyre jellemző veszélyeket jól kell ismerni. Következésképpen a veszélyekkel szembeni védelem megvalósításának első és alapvető lépése a telephelyvizsgálat és -értékelés, amely lehetővé teszi, hogy meghatározzuk a veszélyek tervezésnél figyelembe veendő hatását.

A megfelelő tervezés biztosítja a szabványok szerinti szerkezeti integritást és a működést a tervezési alapan meghatározott hatásokra. A műszaki megoldások mellett lehet adminisztratív intézkedéseket is kidolgozni és foganatosítani. Ilyen adminisztratív intézkedés például a berepülési tilalom elrendelése a telephely légterébe.

A veszélyek bekövetkezésének előjelezhetőségétől, a kárt okozó hatás kialakulásának sebességétől függően kell és lehet dönteni az előre megtervezendő, beépítendő védelmekről, intézkedésekről vagy a veszélyre való felkészülésről és az adminisztratív intézkedésekről. Ez utóbbira példa a jégtörő hajók bevetése vagy az extrém hó eltakarítása.

A megfelelő tervezés azt is biztosítja, hogy a betervezett, beépített műszaki tartalomnak köszönhetően nem következik be hirtelen funkció- vagy integritásvesztés, ha a hatás esetleg meghaladja a tervezés során figyelembe vett értéket. Az ilyen hirtelen tönkremenetelt szakadékszél-jelenségnek nevezzük, amelynek lehetőségét tervezési megoldásokkal ki kell zárni.

A biztonság feltétele még, hogy legyenek a veszélyek sajátosságainak megfelelő üzemzavar- és baleset-elhárítási utasítások, a személyzet képzett, felkészült legyen, és szükség esetén speciális műszerezés segítse a kezelők vagy a baleset-elhárításban részt vevők tevékenységét. A külső veszélyekkel szembeni biztonság fontos eleme a műszaki készség üzem közbeni fenntartása.

A biztonsági elemzések a tervezés szakaszában már minősítik a műszaki megoldásokat, és módot adnak a terv korrekciójára. A külső veszélyekkel szembeni biztonság szempontjából rendkívül fontos szerepe van az időszakos biztonsági felülvizsgálatok rendszerének, tekintettel a természeti veszélyek tudományos megismerésének fejlődésére.

A műszaki létesítmények tervezésének vannak általános, az atomerőművek tervezésénél is alkalmazott elvei, mint a mélységben tagolt védelem elve, a dolgok természetéből adódó és az ismereteink korlátos voltából származó bizonytalan-

ságok konzervatív feltevésekkel való kezelése, a redundancia, azaz az alapvető biztonsági funkciók megvalósítására szolgáló rendszerek többszörözése, a diverzitás, azaz az alapvető biztonsági funkciók különböző konstrukciókkal történő megvalósítása, az egy rendszer egy funkció elvének alkalmazása és a biztonsági rendszerek térbeli szétválasztása. A mélységben tagolt védelem elvének alkalmazása azt jelenti, hogy többlépcsős tervezési megoldások és eljárások állnak rendelkezésre az üzem közbeni kis anomáliák, a tervezés alapjában figyelembe vett üzemzavarok és a legsúlyosabb balesetek kezelésére egyaránt. A tervezés lényegében a „készülj az elképzelhetetlenre is” elven történik.

A biztonságot szolgáló műszaki megoldások lehetnek rendszertechnikaiak, mint a többszörözött/redundáns aktív és passzív biztonsági rendszerek alkalmazása. Ez utóbbiakat előnyben részesítjük, mert mint gravitációs elven működők, nem igényelnek külső energiaforrást.

A védelmi megoldások lehetnek szerkezetiek, mint a kettős konténment, a nagy nyomásra tervezett belső feszített vasbeton, és az extrém teherbírású külső konténment vasbeton héjjal. Vannak diszpozíciós megoldások, azaz a biztonsági rendszerek térbeli szétválasztásával megvalósítható, hogy egy adott hatás, például a repülőgép rázuhanása vagy tűz ne paralizálhassa egyszerre a biztonsági rendszerek minden redundáns ágát. Különös gonddal kell tervezni az olyan hatásokra, mint a földrengés, amely az erőmű egészére hat, s közös okú meghibásodásokat okozhat.

A rendelkezésre álló megoldások közül azt kell választani, amelyik a veszély jellegének (előjelezhetőség, a hatás megjelenésének gyorsasága) legjobban megfelelvén a maximális védelmet nyújtja.

Mire kell tervezni?

A Nukleáris Biztonsági Szabályzatok (NBSZ) szerint az atomerőmű tervezésénél meg kell határozni az összes lehetséges külső és belső veszélyt. Így vizsgálni, jellemezni kell:

- a meteorológiai szélsőségeket (extrém szél, tornádó, hőmérsékletek, csapadék),
- árvizeket, valamint az alacsony vízszintet, amibe beleértjük a fel- és alvízi létesítmények sérülése által okozott vízszint-/vízhozamváltozásokat,
- szél által mozgatott repülő tárgyak veszélyét,
- szélsőséges hűtővíz-hőmérsékletek és a jegesedés veszélyét,
- tektonikus mozgásokat, földrengéseket és az ezek által kiváltott másodlagos veszélyeket,
- katonai és polgári repülőgép becsapódását,
- telephelyhez közeli szállítási és ipari tevékenységek által okozott veszélyeket,

- a külső távvezeték-hálózat zavarait, beleértve annak tartós és teljes üzemi képtelenségét,
- a telephelyen vagy annak szomszédságában lévő létesítmények által okozott veszélyeket, amelyek tüzet, robbanást okozhatnak, vagy egyéb veszélyt jelenthetnek az atomerőműre,
- biológiai veszélyeket.

Egyszerűbben fogalmazva, minden veszélyre tervezni kell, amely az atomerőmű telephelyén előfordulhat, és az atomerőmű biztonságát befolyásolhatja. A tervezés alapját a 10^{-5} /év gyakoriságú természeti hatás és a 10^{-7} /év gyakoriságú emberi tevékenységből eredő veszély hatása képezi. A külső veszélyek tudományos alapokon nyugvó jellemzése, amelyről a *Magyar Tudomány* jelen számában lévő cikkek szólnak, ezen rendkívül kis szűrési szint miatt jelentenek komoly tudományos kihívást. Egy külső veszélyt, például a nagy polgári szállító légitársaság és vadászgép rázuhanását minden különösebb vizsgálat nélkül és nem valószínűségük alapján kell a tervezésnél figyelembe venni, hanem attól függetlenül posztulálni kell.

Vannak olyan veszélyek, amelyek hatásával szemben nincsenek kipróbált, bevált műszaki megoldások, vagy már vannak ugyan, de a nukleáris biztonsági szabályozás konzervatívizmusa miatt ezen megoldások alkalmazhatóságát a hatóságok még nem emelték be a szabályozásba. Azokat a telephelyeket, ahol ilyen veszélyek azonosíthatók, alkalmatlannak kell minősíteni. Így nem telepíthető atomerőmű például karsztos területen. A jelenlegi magyar szabályozás igen konzervatív a földrengések következtében kialakuló az atomerőmű biztonsága szempontjából szignifikáns felszíni elmozdulás tekintetében, jóllehet a nemzetközi szabályozási gyakorlatban ez a hatás a tervezési alapon figyelembe vehető.

A TERVEZÉSI ELVEK ALKALMAZÁSA

Konzervatív tervezés, avagy mi történik, ha a vártnál súlyosabb a hatás?

Az atomerőműveket – a nukleáris ipar konzervatív szabványait alkalmazva – a természeti veszélyek 10^{-5} /év gyakorisággal előforduló hatásaira kell tervezni¹, mégis számolni kell a tervezési alapot meghaladó külső veszélyekkel, ami a tervezés részét képezi.

A leggondosabb telephelyvizsgálat és veszélyjellemezés esetén is előfordulhat, hogy a tervezési alapot meghaladó hatású külső esemény történik. Ilyen

¹ Ez a magyar szabályozás szigorát is mutatja, mert legtöbb országban 10^{-4} /év gyakoriság a mértékadó.

esetben el kell kerülni a biztonsági funkciók hirtelen elvesztését, a szakadékszél-jelenséget és a súlyos baleset kialakulását. A tervezésnél számításba vett hatásnál nagyobb hatás esetén akkor lehet a biztonsági funkciók hirtelen elvesztése kiküszöbölhető a nukleáris szabványok által és tudatos tervezéssel biztosított műszaki tartalékokkal. Megállapítható, s ez a paksi telephelyre jellemző veszélyek mindegyikénél igaz, hogy a veszély romboló hatására jellemző paraméter (szélesség, a talajmozgás maximális vízszintes gyorsulása stb.) progresszíven csökken az éves valószínűség csökkenésével, azaz fizikai határa van a veszély hatásának. Ezek a fizikai határok teszik értelmetlenné az olyan kérdéseket, hogy mi történik, ha még annál is nagyobb szél vagy földrengés következik be, mint amellyel a tervezésnél és a tartalékok értékelésénél számoltunk. S ha mégis? A mélységben tagolt védelem elvének megfelelően az ilyen események következményeit korlátozó intézkedések tervezésével és szisztematikus baleseti felkészüléssel kell kezelni.

A tartalékok szerepére és a tervezési eljárások konzervatívizmusára – számos eset közül – legyen példa a 2007. évi Niigata-Csúecu földrengés és a Kasivazaki-Kariva atomerőmű esete. A kárelemzés résztvevőjeként állíthatjuk, hogy bár a tervezési alap maximális vízszintes gyorsulási értékét az aktuális rengés gyorsulása kétszeresen meghaladta, néhány, a nukleáris biztonságot nem befolyásoló káron és egy látványos háziüzemi transzformátortűzön kívül más kár nem keletkezett a konzervatív tervezési módszerek hatására. Lényegében ugyanezt tapasztalták a földrengés által kiváltott talajmozgást tekintve még a Fukushima Daiicsi erőműben is, vagy a North Anna Atomerőműben 2011 augusztusában. Mondhatjuk, a szökőár mégis katasztrófát okozott. Valójában az epicentrumhoz jóval közelebb lévő Onagava erőmű a talajmozgás és a szökőár hatását is elviselte a gondos tervezésnek köszönhetően. Ott a történelmi adatok alapján a szökőár magasság 3 méterre adódott. A kellő biztonság érdekében a telephely szintjét 14,7 méterrel a tengerszint felett alakították ki. Ezzel szemben a Fukushima Daiicsi telephely szintjét, amely eredetileg a tenger szintjénél 35 méterrel magasabban volt, 25 méterrel levítették költségcsökkentés okán. (A 2004. évi karácsonyi indiai-óceáni szökőár és a 2010. évi chilei földrengés után ugyan fölülvizsgálták a szökőárral szembeni biztonságot, de az intézkedés elmaradt.) Más pozitív példa is van: a 2004. évi borzalmas szökőárat túlélte az indiai Madراسi Atomerőmű.

A fukusimai baleset után nemcsak a működő atomerőművekre, hanem az új, még épülő erőművekre a fejlesztő-gyártó országok elvégezték a stressztesztet, ellenőrizték a veszélyekre vonatkozó ismereteket és ezek figyelembevételét a tervezés alapján, és bizonyították, hogy a tervek jelentős tartalékokkal bírnak a külső veszélyek hatásaival szemben, s valószínűségi biztonsági elemzésekkel igazolták, hogy a zónasérülés éves gyakorisága a nukleáris biztonsági követelmények által előírt értékek alatt van.

A tervezési alap és a változó körülmények

A tervezésnél figyelembe vett veszélyjellemzés és a tervezés alapjaként meghatározott külső hatások nem örökérvényűek. A földtani, tektonikai veszélyek az atomerőmű üzemeltetése alatt aligha változnak, de változnak, gyarapodnak a rájuk vonatkozó ismereteink. Az új ismereteket az időszakos biztonsági felülvizsgálatok során kell figyelembe venni, és ezek alapján szükség esetén intézkedni kell a biztonság növelésére.

Vannak azonban olyan külső körülmények, veszélyek, amelyek az atomerőmű üzemének hatvan éve alatt is nyilvánvalón változni fognak, mint a klímaváltozással összefüggő veszélyek és körülmények. A klímaváltozás hatását robusztus prognózissal és konzervatív tervezéssel lehet kezelni. Ez belátható egyszerű gondolkíséreltet alapján. Amennyiben nem változna a klíma, akkor a ma megállapított, a tervezés alapját képező szélsőséges időjárási jellemzők meghaladási valószínűsége hatvan év üzemidő alatt hat tizedre. Tegyük föl, hogy a mai prognózisunk csak az üzemidő első húsz évében áll meg, a második húsz év alatt kétszeresére, s a harmadik húsz év alatt újból a kétszeresére növekszik a szélsőségek gyakorisága, ami igen drasztikus alakulása lenne a klímaváltozásnak. Ekkor végeredményben egy ezrelék lesz a valószínűsége annak, hogy a teljes hatvan év alatt a tervezési értéknél extrémebb paraméter előfordul. Úgy véljük, ezzel a bizonyossággal lehet vállalni a dolgot. Nyilvánvaló, hogy nemcsak a szélsőségek gyakorisága, hanem a mértéke is változhat, de ez az adekvát tartalékkal történő tervezéssel kezelhető.

A burkolóelv

A tervezés egyik gyakorlati alapelve a burkolóelv, amely azt jelenti, hogy a különböző okú, de fizikailag azonos hatások esetén elegendő a legnagyobbat figyelembe venni a tervezésnél, hacsak azokra valamilyen megkülönböztető követelmény nem vonatkozik. A tervezés és a biztonság szempontjából érdektelen, hogy mi az adott hatás forrása, az azonos hatások közül a legnagyobbat kell figyelembe venni. Ez persze nem azt jelenti, hogy nem vizsgálunk meg minden hatást, hiszen lehetnek specifikumok.

A tornádó nagy sebességgel sodorhat akár személyautó méretű tárgyakat. A konténmentet és a biztonsági épületet tekintve a jégesőnek, bár a „világrekord” jégdarab 17,8 cm átmérőjű, nyilvánvalóan kisebb hatása van, mint a tornádó által sodort tárgyaknak vagy az elszabadult turbinalapátnak, s még kisebb, mint az atomerőműre rázuhanó nagy repülőgépnek. Belátható, hogy a repülőgép-rázuhanás hatásai uralják a tervezést. Megjegyezzük, a repülőgép-rázuhanás veszélyével szembeni védelem követelménye sem új keletű. A hidegháborús idők Nyugat-Németországában igen gyakran lezuhantak az F-104-es Starfighter vadászgépek. Ezért kezdtek erre a durva hatásra tervezni a német atomerőműveket elsők között a világon.

Térbeli szétválasztás

A korszerű 3+ generációs atomerőművek esetében valójában nemcsak a kettős falú konténment külső héjának rendkívüli szilárdsága adja a védelmet a külső hatásokkal szemben, hanem a bevezetőben már említett térbeli szeparáció, azaz a redundáns biztonsági rendszerek olyan szétválasztása, amelynek köszönhetően egyszerre nem sérülhet egynél több biztonsági rendszer, még akkor sem, ha a legnagyobb utasszállító repülőgép ütközésével és üzemanyagtüzével számolunk. A korszerű atomerőművek négy, fizikailag egymástól teljesen független, redundáns biztonsági rendszerrel vannak ellátva, amelyek egyenként képesek teljes mértékben ellátni a biztonsági funkciókat. A nagyfokú izolációt biztosítja, hogy az ágakhoz tartozó rendszerek különböző helyiségekben vannak elhelyezve. A térbeli szeparációról tűzzáró betonfalak gondoskodnak. A különböző ágak között nincs direkt összeköttetés.

A veszélyek kombinációi, egybeesése

A tervezés során figyelembe kell venni a hatások valószínű kombinációit, beleértve egy véletlen technológiai meghibásodás és a külső hatás együttesét is. Például a szélsőséges meteorológiai hatások, mint a tornádó, a hurrikán vagy a földrengések nemcsak az atomerőműre magára hatnak, hanem a villamos hálózat tartós kiesését is okozzák, miközben történhetnek az erőműben magában is ezekről független belső meghibásodások.

A módszerek ellenőrzése

A módszerek és megoldások kísérleti ellenőrzése, validációja a biztonság alapvető feltétele. Például a konténmentek földrengésállóságát nagy léptékű modellek rázóasztalos teszthez lehet validálni, és validáltak is. Hazai vonatkozású példa, hogy a Paksi Atomerőmű üzemzavari hűtőrendszere tartályának nagy léptékű modelljét tesztelték a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által szervezett program keretében Japánban. Féltonnás robbantások által gerjesztett talajmozgásokkal kísérletileg vizsgálták a Paksi Atomerőmű főépületének dinamikai válaszát.

A módszerfejlesztéseket és a tervezést jól megalapozzák a közvetlen kísérletek, de nagy polgári repülőgép atomerőműre történő rázuhanását teljes léptékű kísérlettel nem célszerű vizsgálni. Erre szolgál a káresetek igen részletes elemzése, mint például az 1992. október 4-ei amszterdami Bijlmermeer-katasztrófa² vagy akár a Pentagon 2001-es terrortámadásának kivizsgálása. A káresetek szimuláció-

² Az El Al légitársaság Boeing 747-es teherszállító gépe műszaki hiba miatt az amszterdami Bijlmermeer lakópark tízemeletes panelházába csapódott.

jával a számítási eljárásokat, modelleket és feltevéseket ellenőrizni lehet. Pilóta nélkül, Phantom vadászgéppel végeztek kísérleteket az ütközés terhelési diagramjának meghatározására.

TAPASZTALATOK

Az alábbiakban az egyes veszélyekkel szembeni védeettségre mutatunk be példákat, demonstrálva a műszaki megoldások hatékonyságát.

Földrendések

A *Magyar Tudomány* jelen számában olvashatunk a paksi telephely földrengés-veszélyeztetettségéről. Az új blokkok esetében a földrengésre történő tervezés alapja 0,34g maximális vízszintes gyorsulás, amelynek meghaladási gyakorisága 10^{-5} /év. Ez négyszerese annak a hatásnak, amelyre minden más létesítményt az adott régióban tervezni kell a hatályos jogszabályok és szabványok szerint.

Itt el kell oszlatni még egy aggályt: Lehet-e ilyen nagy rengésre tervezni?

Az elmúlt jó tíz év alatt számos atomerőművet ért földrengés, sőt nagyobb földrengés, mint amekkorát a tervezésnél figyelembe vettek. Tény, hogy még a tervezési alapot meghaladó földrengés hatására sem következett be biztonságot befolyásoló kár ezekben az erőművekben, azaz a konzervatív nukleáris szabványok alapján megtervezett létesítmények valóban földrengésállóak. Ezt igazolják az Onagava (2005), Sika (2007), Kasivazaki-Kariva (2007), North Anna (2011) atomerőműveket ért földrengések tapasztalatai. Még a 2011. évi tóhokui nagy földrengés tapasztalatai is ezt bizonyítják, melynek hatása tizenegy Honsú szigeten lévő blokkot és a Rokkasú reprocesszálót is elérte, s a legtöbb helyen a tervezési alapot lényegesen meghaladó talajmozgást okozott. Általános az a szakmai álláspont, hogy a nukleáris szabványok alkalmazásával megtervezett létesítmények igen nagy tartalékokkal rendelkeznek a földrengés vibrációs hatásával szemben. Ez még a Fukushima Daiicsi atomerőműre is igaz volt, ahol a súlyos balesetet a szökőár okozta, s nem a talajmozgás vibrációs hatása.

Némi malíciával megjegyezhető lenne, hogy ezek jól megtervezett japán és észak-amerikai atomerőművek. Így vegyük a bulgáriai Kozloduj Atomerőmű példáját, amelyet három, a vranceai szeizmotektonikus zónában kipattant rengés ért (1977, 1986 és 1990). Ezenkívül 1985-ben és 1986-ban, továbbá 1987-ben három lokális rengés is volt. Az 1977-es volt a legérdekesebb, mert akkor 0,17g maximális vízszintes gyorsulást mértek a telephelyen, míg a tervezésnél a telephely szeizmicitását MSK-64 szerinti 4–5 intenzitásfokkal jellemezték, ami az akkori orosz normák szerint nem igényelt speciális tervezést, mert a szélteher nagyobb volt. A Kozloduji Atomerőmű, amit nevezhetnénk a Paksi Atomerőmű blokkjai

nagyapjának, s az új blokkok ükapjának, ezeket a rengéseket biztonsági problémák nélkül túlélte. 1977 után újra meghatározták a tervezési alapot MSK-64 szerinti 7 intenzitásfokban (~0,2g-vel), és erre erősítették meg az erőművet.

A fenti tények bizonyítják, hogy a nukleáris szabályok és szabványok szerinti tervezés robusztus eredményre vezet, mivel ezek a szabványok és tervezési eljárások a káresetek sokaságának feldolgozásával és nagy léptékű kísérletekkel alátámasztottak. A példák szerint garantálták a biztonságot a tervezési alapnál nagyobb földrengés esetén is, s annál inkább garantálják, ha azt korrekt telephelyjellemezés alapján és a normák szerint figyelembe veszik.

A nukleáris biztonság, a biztonságra történő tervezés szempontjából a telephelyvizsgálatnak s ezen belül a neotektonikai és szeizmológiai kutatásnak az a célja, hogy a tervezési alapba tartozó földmozgás jellemzőit (veszélyeztetettségi görbe, maximális vízszintes gyorsulás, válaszspektrum) megadja, és jellemezze a felszíni permanens elmozdulás – a nukleáris szakterületen bevezetett megjelölés szerint a „kapabilitás” – veszélyét. A nukleáris biztonság szempontjából, sőt *de jure* a telephely alkalmassága szempontjából kardinális felszíni vető menti permanens elmozdulás veszélyének kérdése a 2016-ban lezárult vizsgálatokig tisztázatlan maradt. A vető menti permanens felszíni elmozdulás mint veszély kezelése az utóbbi évtizedekig értelmezési problémát is okozott. Földtani, tektonikai szempontból trivialis, hogy minden földrengést vető menti elmozdulás okoz, s ennek evidens volta miatt valóban az az elsődleges kérdés, hogy az ismert szerkezet aktív-e. Ugyanakkor annak meghatározása, hogy ez a vető menti elmozdulás manifesztálódik-e a felszínen, s ha igen, milyen mértékben, kitüntetett fontosságú a tervezés és a nukleáris biztonság szempontjából, mivel ez jellegében teljesen más hatást vált ki az atomerőmű létesítményeire, mint a földrengés által okozott talajmozgás, azaz a „föld rengése”. A föld rengése egy alteráló dinamikai hatás, amely a szerkezet dinamikus válaszát, rezgését okozza, és az ebből eredő igénybevételeket kell a szerkezeteknek elviselniük, illetve a szerkezetek dinamikus válasza hat a beépített technológiai rendszerekre. Ezzel szemben a vető menti elmozdulás, amennyiben az a felszínen permanens elmozdulásként megjelenik, az atomerőmű építményei megdőlését, az alapozás és a felépítmény sérülését okozhatja, illetve a szerkezetek közötti kommunikáció (vonalas létesítmények) relatív elmozdulás miatti sérülését válthatja ki. Ennek mechanizmusa merőben eltér a rengés okozta hatás mechanizmusától. Az értelmezési probléma azzal is magyarázható, hogy míg minden földrengést vető menti elmozdulás okoz, korántsem egyértelmű, hogy az a felszínen megjelenik-e, sőt tapasztalati tény, hogy nem minden vető menti elmozdulás, azaz földrengés képes a felszínen permanens elmozdulást okozni. A paksi telephelyen és annak tág környezetében végzett komplex vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a területen százezer éves időskálán bekövetkező szeizmikus események nem képesek a felszín nukleáris biztonság szempontjából szignifikánsnak minősülő elvetésére.

Azt, hogy mi minősül szignifikáns elmozdulásnak, a tervezési szabványok és előírások számszerűen meghatározzák. Megjegyezzük, hogy a tudomány és technika mai színvonalán a felszíni elmozdulás veszélyének jellemzésére és a felszíni elmozdulás hatásának szerkezeti és rendszertechnikai kezelésére vannak megbízható megoldások (Katona, 2020), és a nukleáris biztonság igazolására is vannak példák (URL1). Ezt számos, permanens felszíni elmozdulásra tervezett és ilyen hatást biztonságosan elviselő nem nukleáris létesítmény példája is igazolja, mint az 1995. január 17-i pusztító kobei földrengés okozta felszíni elmozdulást elviselő Akasi Kaikjó híd, amelynek pillérjei egymáshoz képest csaknem egy métert elmozdultak. A tapasztalatok által igazolt műszaki megoldások készítették a legtöbb nemzeti hatóságot és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséget is arra, hogy a felszíni elmozdulás veszélyét a tervezésnél figyelembe vehetőnek minősítsék.

Meteorológiai, klimatikus szélsőségek

A relatíve lassan kifejlődő, jól előjelezhető, s egyben elég jól ismert hatásokra könnyebb tervezni és felkészülni, mint a hirtelen, sorscsapásként bekövetkezőkre. Ilyen, jól előre jelezhető hatások a hőmérsékleti szélsőségek. Igaz, vannak a Földnek olyan területei is, ahol a hőmérséklet-változás sebessége rendkívüli, például 37 °C egy nap alatt (1911. november 11., Oklahoma City, USA) vagy 27 °C két perc alatt (1943. január 22., Spearfish, Dél-Dakota, USA), de ez csak különleges meteorológiai és topográfiai viszonyok között alakulhat ki. A meteorológiai szélsőségekre való tervezés lehetőségét igazolja az oroszországi Bilibinói Atomerőmű példája, amely szubpoláris körülmények között működik 1974 óta. Szélsőséges hidegek vannak a Kolai Atomerőmű telephelyén is, s rekordhidegeket élt meg a világ számos atomerőműve (URL2). A Busheri Atomerőmű Iránban szélsőségesen forró sivatagi klímában, Tamilföldön, Indiában a Kundakulami Atomerőmű a monszun zónában kibírja a szélsőségesen csapadékos és tartósan meleg időjárási körülményeket.

A százezer évenként átlagosan egyszer előforduló mértékadó hőmérsékleti szélsőségek a paksi telephelyen 48,3 °C és a minimum –59,1 °C első látásra meghökkentők, de műszakilag nem kezelhetetlenek. Az extrém hideg és meleg nem annyira biztonsági, hanem inkább termelésbiztonsági kérdés, és kismértékben a hűtővízellátás kérdése. A biztonsági hűtővíz igénye két nagyságrenddel kisebb, mint a teljes teljesítményen történő üzemelés hűtővízigénye. *Ad absurdum*, a paksi atomerőmű tervezett új biztonsági hűtése akkor is megvalósítható, ha a Duna eltűnne. A hűtővízellátás jegesedés hatásától való védelme jégtörők bevetésével vagy a hidegvíz-csatorna karbantartása rutin üzemeltetői feladat, s egyúttal aktív védelem a releváns veszéllyel szemben.

A százezer évenként egyszer bekövetkező gyakoriságú maximális széllelkéshez rendelt átlagérték Pakson 47,7 m/s, azaz 172 km/óra. Ez nem sokkal múlja fölül a

2013. márciusi tél idején a Kab-hegyen mért értéket (165 km/h), de ez sem jelent kezelhetetlen terhet, amit a tapasztalatok is igazolnak, bár a villamos hálózatban komoly károk keletkeztek. Azt, hogy az extrém szél hatásával szemben az atomerőművek megvédhetők, számos példa igazolja: 1992 augusztusában az Andrew hurrikán 230 km/h sebességgel érte el a Turkey Point Atomerőművet (USA), s a széllekek sebessége 280 km/h volt. 2012 októberében a Sandy hurrikán söpört végig az USA keleti partvidékén. A harmincnégy érintett atomerőműből huszonegy zavartalanul üzemelt a hurrikán ideje alatt és után, hét éppen az éves főjavítás alatt volt, s három biztonságosan leállt a hálózat sérülése miatt. Legfrissebb példa pedig a 2017. szeptemberi Irma hurrikán, amely meggyengülve ugyan, de a magyarországi viszonyokhoz mérten mégis szélsőséges sebességekkel érte el a floridai Turkey Point és a St. Lucie atomerőműveket, de károkat nem okozott.

Árvizek

Az árvizek is jól előre jelezhetők, s a tervezett védelem mellett, rendkívüli körülmények között, az atomerőművek még provizórikus megoldásokkal is megvédhetők. A provizórikus árvízvédelemre a Missouri mentén a Fort Calhoun Atomerőmű szolgált példát, amelyet 2011 júniusában 2,4 m magas, AquaDam típusú ideiglenes gáttal védtek. A mai biztonsági filozófia szerint a felkészülés a tervezett-beépített és a tervezett rendelkezésre álló helyszíni és telephelyen kívüli megoldások kombinációja. Az átmeneti intézkedések sem improvizatívák, hanem megtervezettek, legfeljebb az alkalmazásuk szcenáriófüggő.

A paksi telephelyet tekintve még a bős–nagygyarosi vízerőmű gátjának szakadását követő árhullám sem árasztja el a telephelyet, s még ez az árhullám is ad lehetőséget fölkészülésre.

Kétségtelenül nehéz minden szempontból megfelelő telephelyet találni, s vannak messze nem ideális telephelyek akár az árvízveszély szempontjából is. Ilyen például Franciaországban a Tricastin Atomerőmű telephelye, amely 6 méterrel alacsonyabban fekszik, mint a mellette folyó Canal de Donzère-Mondragon árvízszintje, sőt a felvízen található egy technikatörténeti relikvia, a Donzère-Mondragon gát is. A francia nukleáris hatóság elemzése (URL3) szerint földrengés hatására a védgát talajfolyósodás miatt megsérülhet, s mindez olyan veszélyt jelent, hogy a Francia Elektromos Művek 2017 szeptemberében ideiglenesen, a probléma gyors megoldásáig leállította az atomerőművet (URL4), nem zavartatva magát az áramár 2,54%-os növekedésétől. Itt szerepet játszik még egy, az atomerőművek nukleáris biztonsági szabályozásában és az üzemeltetési gyakorlatában fontos tényező: A nukleáris előírások arra kötelezik az atomerőművek engedélyeseit, hogy a saját és mások üzemeltetési tapasztalatait feldolgozzák, és a tanulságok alapján a biztonság növelésére intézkedjenek. 1999-ben a Blayais-i Atomerőművet sújtó árvíz, s nem kevésbé a szökőár által a Fukusima Daiicsi Atomerőműben

okozott baleset után végzett felülvizsgálat tanulságai készítették erre a döntésre az atomerőmű üzemeltetőjét (URL5). Az óvatosság nem túlzó. Franciaország 58 atomerőművel és 75%-os nukleáris villamosenergia-termelési hányaddal Európa „legnukleárisabb” országa. Elemzések azt mutatják, hogy egy kezelhető, a nemzetközi INES-skálán hatos besorolású baleset közvetlen és közvetett kára is igen nagy (URL6, URL7), amelyet semmilyen átmeneti gazdasági érdek miatt sem érdemes megkockáztatni.

Tornádók

Vannak olyan veszélyek, amelyek nem sok időt adnak a felkészülésre, vagy egyáltalán nem jelezhetők előre. Ilyen például a tornádó, a földrengés, a külső emberi tevékenységből származó veszélyek, mint például a repülőgép-rázuhanás. Ezekben az esetekben betervezett, beépített védelemre van szükség.

Hazánk területe mérsékelten tornádóveszélyes. Az új blokkok tervezésénél F3-as intenzitású tornádót kell figyelembe venni. Egy ilyen tornádóban a maximális szélesebbesség 49 m/s, a nyomásesés a tornádó magjában 795 Pa, és ez a szokványos 4 mm vastag ablaktáblákra már nem megengedett terhelést okoz. Ma igen meggyőző tervezési és üzemeltetési tapasztalatok halmozódtak föl, leginkább az USA-ban, és váltak közkinccsé. Száznál több jelentett eset bizonyítja, hogy a tornádók hatásával szemben megbízható megoldások léteznek (URL8).

MIT IGAZOL AZ ÜZEMELTETÉSI TAPASZTALAT TÁRGYILAGOS ÉRTÉKELÉSE?

A külső veszélyeket tekintve az atomerőműveket, létezőket és tervezetteket egyaránt, a fukusimai baleset stigmatizálja. Szándékunk az volt, hogy példákat sorolva a gyakorlat próbáját kiálló tervezési megoldásokra és üzemi tapasztalatokra, a mérleg nyelve a helyes irányba vagy legalábbis semleges pozícióba billenjen.

A fukusimai tragédia ellenére, sőt épp annak tanulságaként is megállapíthatjuk, hogy az üzemeltetési tapasztalat egyértelműen igazolja az atomerőművek külső veszélyekkel szembeni védhetőségét. Egyértelmű válasz adható az alapkérdésekre. Vannak bizonyítottan helyes műszaki-tudományos módszerek arra, hogy a rendkívüli hatásokra is biztonságos atomerőművet tudjunk tervezni. Van közvetlen tapasztalat ennek igazolására. Ellenőrizhetők az ismeretek. Van lehetőség tudományos kísérletekre vagy analóg esetek szimulációs reprodukciója révén az evidenciák megszerzésére. A valós és tartós üzemi tapasztalat meggyőző érveket szolgáltat a tervezési módszerek és megoldások adekvát voltának és a biztonságának az igazolására.

IRODALOM

- Katona T. J. (2020): Safety of Nuclear Power Plants with Respect to the Fault Displacement Hazard. *Applied Sciences*, 10, 3624. DOI: 10.3390/app10103624, www.mdpi.com/journal/applsci.
- URL1: JANSI-FDE-03 rev.1, Assessment Methods for Nuclear Power Plant against Fault Displacement (Provisional Translation of Main Text). September 2013, On-site Fault Assessment Method Review Committee, Japan Nuclear Safety Institute, <http://www.genanshin.jp/archive/sitefault/data/JANSI-FDE-03r1.pdf> (megtekintve 2014. szeptember 29.)
- URL2: *Incident International Reporting System for Operating Experience*, IAEA OECD/NEA, <https://nucleus.iaea.org/Pages/irs1.aspx>
- URL3: <http://www.french-nuclear-safety.fr/content/download/153556/1505212/version/1/file/ASN%20Technical%20Note%20Def.pdf>
- URL4: https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/cp/2017/cp_edf_20170928-tricastin-arret_va.pdf
- URL5: <https://www.nrc.gov/public-involve/conference-symposia/ric/past/2010/slides/th35defraguierepv.pdf>
- URL6: <http://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Pages/20130219-Economical-cost-of-nuclear-accidents.aspx>
- URL7: http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/EN_Eurosafe-2012_Massive-releases-vs-controlled-releases_Cost_IRSN-Momal.pdf
- URL8: <https://www.nei.org/Master-Document-Folder/Backgrounders/Fact-Sheets/Through-the-Decades-History-of-US-Nuclear-Energy-F>