Új elvi lehetőségek a földrengés PSA bizonytalanságának kezelésében

Dr. Katona Tamás János

Paksi Atomerőmű Zrt., Paks, Pf. 71 H-7031 Tel: +3620 942 22 25

A földrengés hatására bekövetkező zónasérülés valószínűségi módszerrel történő értékelésénél a rendszerek, rendszerelemek nagy száma, a sérülési módok sokfélesége miatt a modellezésnél mind a rendszer hiba- és eseményfái tekintetében, mind pedig a veszélyeztetettségi és a sérülési görbe realizációi tekintetében - egyszerűsítéseket alkalmaznak, amelyek lényegében szűrési eljárások, vagy a veszélyeztetettség és a sérülékenység szakaszosan állandó függvénnyel történő leírását jelentik. Ez koncepcionálisan hasonló a valószínűség intervallumos, illetve p-doboz reprezentációjához. Jelen dolgozatban ezen elméletek földrengés PSA területén való alkalmazásának lehetőségére hívjuk fel a figyelmet, valamint a sérülékenység kumulatív abszolút sebesség függvényeként való kezelésének lehetőségére.

Bevezetés

Az atomerőművek földrengés-biztonságának értékelése a determinisztikus és valószínűségi módszerek alkalmazása esetén egyaránt rendkívül bonyolult. A biztonságot a passzív komponensek és kihorgonyzások tekintetében a tervezés-méretezés, illetve az aktív komponensek esetében a tesztelés-minősítés igazolja, ami a jellemző műszaki és biztonsági tartalékok miatt konzervatív a tervezés alapját képező biztonsági földrengés (SSE) terhei tekintetében. Egy bonyolult rendszer biztonsága azonban ilyen módon nem értékelhető, hiszen egy földrengés esetén, a determinisztikus felfogásban tökéletesen biztonságosra tervezett rendszerelemek halmazában is véletlenszerűen előfordulhatnak meghibásodások, amelyek a meghibásodott rendszerelemek funkciójától függően, illetve a közös okú, s más egyidejű hibák együttállásával akár zónasérüléshez is vezethetnek. Másfelől, a tervezésnél alkalmazott megfelelőségi kritériumok lényeges tartalékok beépítéséhez vezetnek, amelyek miatt a rendszerelemek sérülése, funkcióvesztése biztosan csak a tervezés során figyelembe vett megrázottságnál jóval nagyobb igénybevételek esetén következik be.

A valószínűségi biztonsági elemzés földrengés (PSA) módszertana rendszerszemléletű, számításba veszi a földrengés-veszély, a földrengés által okozott igénybevétel, a sérülés és a funkcióvesztés véletlen természetét épp úgy, mint a tárgyra vonatkozó ismeretek bizonytalanságát. Az eljárás részleteit itt nem mutatjuk be, erre vonatkozóan lásd például az [1] és [2] hivatkozást. A lényeget tekintve a zónasérülés gyakoriságának kiszámításához a $\{\langle p_{ij}, f_{ij}\rangle\}$ számpár-halmazt kell kiszámítani, ahol f_{ij} a földrengés által okozott tönkremeneteli állapot gyakorisága,

$$f_{ij} = -\int_0^\infty f(a')_i \frac{dH_j}{da} da' \qquad (1)$$

a p_{ij} az adott f_{ij} gyakoriság diszkrét valószínűsége $p_{ij} = q_i\, p_j$. Az $f(a)_i$ az i-ik reprezentációja a sérülés feltételes valószínűségének (sérülékenység) az a maximális szabadfelszíni vízszintes talajgyorsulás függvényében. A q_i az $f(a)_i$ sérülési görbe (sérülékenység) valószínűsége, p_j pedig a H_j veszélyeztetettségi görbéé. A dH_j/da az a maximális vízszintes gyorsulásértékkel meghatározott földrengés-igénybevétel valószínűségi sűrűség függvénye a j-ik veszélyeztetettségi görbe szerint.

A gyakorlati példák azt mutatják, hogy ahol földrengés PSA-t készítettek, ott – a legtöbb esetben – a földrengés lett a zónasérülés meghatározó oka; hozzájárulása a zónasérüléshez domináns [3]. Másfelől tapasztalati tény, hogy az atomerőműveket ért nagy földrengések nem okoztak károkat a nukleáris előírások és szabványok szerint tervezett szerkezetekben és komponensekben (lásd az Onagawa atomerőmű esetét 2005-ben, a Shika és a Kashiwazaki-Kariwa atomerőmű esetét 2007-ben és a Hamaoka atomerőműét 2009-ben). Általános tapasztalat az is, hogy a maximális vízszintes szabadfelszíni gyorsulás értéke (PGA) nem jól korrelál a kár mértékével.

A fentiekben exponált ellentmondás sérülési valószínűséggel összefüggő aspektusait tekintve elmondhatjuk, hogy a sérülési görbe (a sérülés feltételes valószínűsége) meghatározásánál a szerkezet valódi robosztusságát alábecsüljük a bizonytalanságok miatt. Az (1) egyenletben az erőmű sérülékenységének bizonytalanságát a különböző valószínűséggel előforduló sérülési szekvenciákhoz és végállapotokhoz tartozó sérülési görbék halmazával reprezentáljuk. Ennek gyökerénél – a hiba- és eseményfákkal való modellezés kiindulási pontjánál – a komponens egyedi sérülékenysége, sérülési módjai vannak. A sérülékenység meghatározása a tervezési információ és a berendezés-minősítés alapján, tapasztalati úton történik [1], [2]. A sérülékenységet véletlen tényezők szorzataként modellezve lognormális eloszlással írják le. A lognormális eloszlás annak következménye, hogy a komponens C teherviselő képességét, kapacitását a medián kapacitás C_m, és/vagy a biztonsági

Kontakt: katonat@npp.hu

Beérkezett: 2010. március 18.
Közlésre elfogadva: 2010. április 27.

földrengésre betervezett kapacitás, C_{SSE}, illetve a bizonytalanságot jellemző tényezők X_i szorzataként képzeljük el:

$$C = C_m \prod_{i=1}^{n} X_i = kC_{SSE} \prod_{i=1}^{n} X_i \qquad (2)$$

ahol $k = C_m/C_{SSE}$. A centrális határeloszlás-tétel szerint a szorzat eloszlásfüggvénye lognormális, függetlenül attól, milyen az egyes tényezők eloszlása. Végeredményben a kapacitás így leírható, mint a medián kapacitás és két véletlen változó szorzata:

$$C = C_m \ \varepsilon_R \ \varepsilon_U \qquad (3)$$

ahol ε_R egy β_R szórású, egységnyi várható értékű lognormális eloszlású véletlen változó, amely a véletlenszerűséget, az ε_U pedig egy β_U szórású, egységnyi várható értékű lognormális eloszlású véletlen változó, amely az ismereteink hiányos voltát jellemzi.

A földrengés PSA gyakorlatában generikus sérülési görbéket, szűrési eljárásokat és célszerű egyszerűsítéseket kell alkalmazni a rendszerek, rendszerelemek és a sérülési módok sokasága miatt, ami egyaránt igényel komoly rendszer-technikai ismereteket, mérnök szeizmológiai, szerkezet-elemzési tapasztalatot. A módszertan validálásának lehetősége korlátozott, erőmű-szintű empirikus evidenciákat csak a nagy földrengések szolgáltatnak, de itt is a rengés csak egy realizációja egy véletlen esemény-halmaznak.

Az új, harmadik generációs atomerőművek esetében a zónasérülés gyakorisága igen alacsony ($10^{-5} \div 10^{-6}$/év). Ebben a környezetben a földrengés PSA eredményei még inkább dominálnak, ha a földrengés PSA módszertana és empirikus megalapozása a jelenlegi szinten marad. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség keretében mind a veszélyeztetettség, mind pedig a sérülékenység területén új kutatási tevékenység folyik, amit épp az Onagawa és a Kashiwazaki-Kariwa erőművek esete és a probléma általános jellegének felismerése inspirál.

Jelen dolgozatban a földrengés-teher által kiváltott sérülés valószínűségi leírásának lehetőségeivel foglalkozunk. Két kérdést vizsgálunk:

1.) Hogyan lehetne a kumulatív abszolút sebesség függvényében meghatározni a sérülés feltételes valószínűségét?

2.) Hogyan lehetne alkalmazni a bizonytalanságok leírására az intervallum valószínűség-elmélet, a p-doboz elmélet technikáit?

A dolgozatban nem vállalkozunk arra, hogy a földrengés PSA teljes metodikáját kidolgozzuk a fenti két opció felhasználásával, csak annak lehetőségét demonstráljuk, hogy a fenti megközelítések a földrengés PSA logikájába beilleszthetők.

A sérülékenység a kumulatív abszolút sebesség függvényében

A C_{SSE}, a maximális vízszintes szabadfelszíni gyorsulás (PGA) függvényében kifejezett kapacitás – a tervezés természeténél fogva – azt a bizonyosságot nyújtja, hogy nagy megbízhatósággal állíthatjuk, a tervezési alapba tartozó földrengés-teher esetén a sérülés valószínűsége igen kicsi. A működő atomerőművek földrengésállósának értékelésére bevezetett HCLPF (high confidence of low probability of failure) kapacitás pedig kifejezetten így értelmezhető. A szerkezetek, rendszerelemek sérülése, funkcióvesztése egy valós földrengés esetén függ egyfelől az igénybevételtől, azaz a PGA-tól, az erős rengések időtartamától, a talajgyorsulás spektrumától, másfelől pedig a szerkezet teherviselő képességétől, dinamikus válaszától. Az EPRI (Electric Power Research Institute, USA) által elvégzett vizsgálatok azt igazolták, hogy a kumulatív abszolút sebesség (CAV) jobban korreláltatható a sérüléssel, mint a PGA [4]. A kumulatív abszolút sebesség a talajmozgás (vízszintes összetevő) gyorsulás időfüggvénye abszolút értékének integrálja a rengés időtartamára. A szabványosított CAV kiszámítása során a numerikus integrálásnál ±0.025g amplitúdóval való zajszűrést alkalmaznak, ami az integrálási időtartományt is korlátozza. Az említett EPRI vizsgálatból határozták meg a folyamatos üzem fenntartásának feltételét, azaz a sérülésmentesség határát jelentő CAV értéket [4].

A jelenlegi kutatások tárgya a nukleáris szabványok szerint tervezett szerkezetek sérülését jelző kárindikátor (CAV, empirikus skálák) meghatározása. Az egyik fő problémát az okozza, hogy a CAV változékonysága egy adott PGA érték mellett igen nagy lehet, ami függ a PGA-tól magától, az erős rengés időtartamától (T), a talajmozgás spektrális összetételétől. A tervezés alapját képező válaszspektrumhoz hozzárendelhetők CAV értékek mesterséges gyorsulás-időfüggvények szokásos módon történő generálásával, majd azok abszolút értékének integrálásával. Belátható, hogy rögzített válaszspektrum mellett is a CAV tág tartományban mozoghat, hiszen az integrálási időt a válaszspektrummal nem rögzítjük, sőt a jelteljesítményt sem. A PGA és a CAV közötti bonyolult kapcsolat épp azt mutatja, hogy miért nem lehet pontos ítéletet mondani a konkrét földrengés hatására bekövetkező szerkezeti válaszról, igénybevételekről és sérülésről a PGA-ra és adott válaszspektrumra történő tervezési információ alapján.

Fentiek ellenére célszerű megvizsgálni, hogyan vezethető be egy olyan integrális kárjellemző, mint a CAV a földrengés PSA módszertanába.

A triviális módja ennek az, hogy meghatározzuk a CAV és a PGA közötti $a = g^{-1}(CAV)$ korrelációt és a továbbiakban ezt a konverziót használnánk a megszokott eljárásban. Ettől azonban a sérülékenység modellezésének bizonytalansága nem csökkenne.

A CAV, mint kárindikátor bonyolult függése a rengés jellemzőitől azt jelzi, hogy a sérülés/funkcióvesztés valószínűsége P_{fail} egy $\overline{X} = (x_1, x_2, ...)$ random terhelési vektortól, mintsem egyetlen paramétertől függ, azaz

$$P_{fail} = \int_R h(x_1, x_2, ...) P(x_1, x_2, ...) dx_1 dx_2 ... \qquad (4)$$

ahol az $\overline{X} = (x_1, x_2, ...)$ teher x_i véletlen jellemzőkkel írható le, úgymint maximális vízszintes szabadfelszíni gyorsulás, az erős talajmozgások időtartama, a gyorsulás frekvencia-tartalma, stb. Összességében az x_i azonosít minden, a talajmozgásra jellemző és a tönkremenetelt befolyásoló tényezőt. A $h(x_1, x_2, ...)$ a veszélyeztetettséget írja le, azaz

$h(x_1, x_2,...)$ az $\overline{X} = (x_1, x_2,...)$ teher valószínűségi sűrűségfüggvénye, a $P(x_1, x_2,...)$ pedig a sérülés feltételes valószínűsége. Ez a felírás elméletileg korrekt, azonban a terhelést jellemző random vektor, illetve a sérülés (figyelembe véve annak variabilitását is) és e random vektor közötti korreláció meghatározása nem egyszerű. Jó lenne, ha az $\overline{X} = (x_1, x_2,...)$ random vektort helyettesíthetnénk CAV-val, mint egy $x \geq 0$ terhelési paraméterrel, s így a (4) egyenletet egyszerűbben felírhatnánk, mint

$$P_{fail} = \int_0^\infty h(x)P(x)dx \qquad (5)$$

Feltesszük, ha a tönkremenetel bekövetkezik CAV=x esetén, akkor bekövetkezik minden esetben, ha CAV>x. Ebben az esetben a feltételes valószínűség eloszlási függvény $P(x)$ megegyezik a sérülési paraméter λ kumulatív eloszlási függvényével, ahol λ az a legkisebb teher, ami a szerkezet sérülését okozza [5], tehát

$$P(x) = \mathrm{Prob}(\lambda \leq x) \qquad (6)$$

A (6) egyenletből kiszámíthatjuk az átlagos sérülési paramétert, azaz a sérülést jelző átlagos CAV értéket:

$$\overline{\lambda} = \int_0^\infty x' \frac{dP(x)}{dx} dx' \qquad (7)$$

amit kárindikátorként értelmezhetünk. Másképpen, a CAV akkor és úgy használható fel a sérülési valószínűség leírására, ha empirikusan meghatározzuk $\overline{\lambda}$ értékét földrengés-károk kiértékelése és tesztek alapján minden szerkezet típusra és sérülési módra.

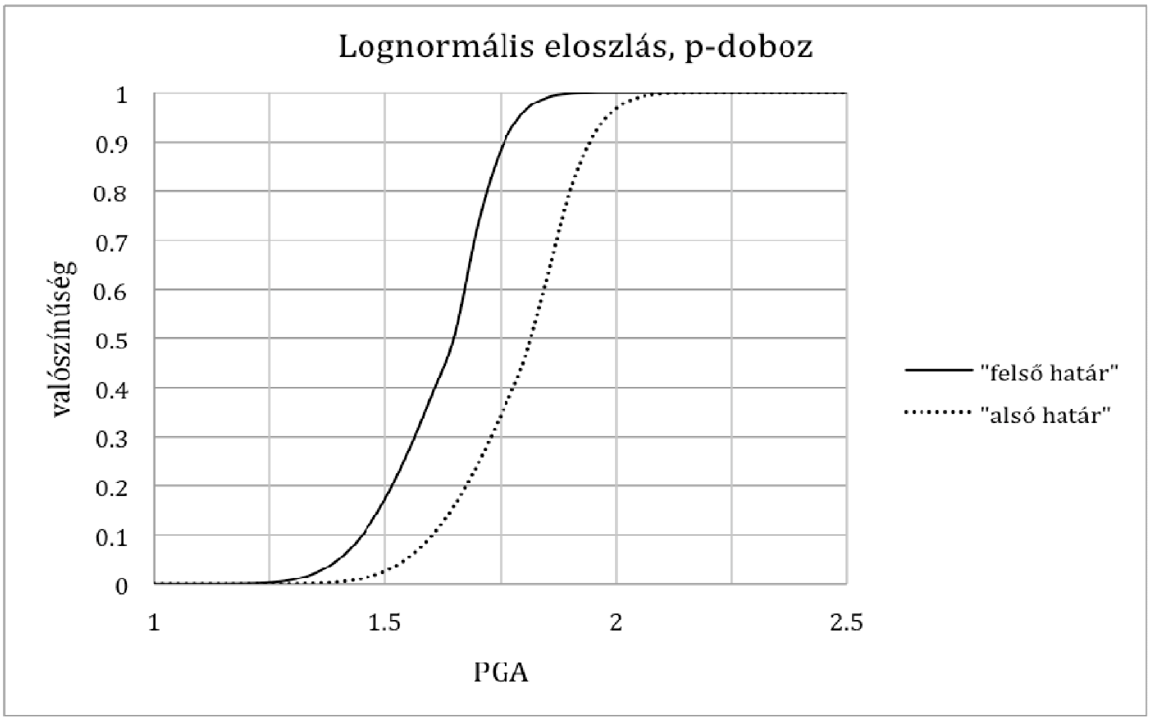
Összefoglalva: Az, hogy a sérülékenységet a CAV, mint egyetlen független változó függvényeként adjuk meg, javíthatja a sérülékenység meghatározásának egyértelműségét a PGA-ra alapozott leírással szemben, de nem csökkenti az empirikus igazolás munkaigényét. A fenti vázolt elvi alapokon van esély az egyparaméteres sérülési görbék előállítására, ahol a földrengés-teher komplexitását egy kárindikátor/paraméter írja le.

Lehetőségek a sérülékenység leírására és bizonytalanságának kezelésére

A gyakorlatban az (1) egyenletben szereplő, $\{\langle p_j, H_j\rangle\}$ és $\{\langle q_i, f_i\rangle\}$ véletlen sokaságok helyett egy-egy veszélyeztetettségi, illetve sérülési görbe reprezentánssal számolnak. Ezt a számítást a bizonytalanságok értékelésével egészítik ki. További gyakorlati egyszerűsítést jelent a veszélyeztetettség szakaszosan állandó függvénnyel való leírása [6], ami maga után vonja a sérülékenység ilyen leképzését is. Így az (1) egyenlet az alábbiak szerint alakul:

$$f = -\int_0^\infty f(a) \frac{dH}{da'} da \approx \sum_{k=1}^{n} \left\{ \tilde{f}_k \left(\frac{d\tilde{H}}{da} \right)_k \right\} \Delta a_k \qquad (8)$$

ahol $f(a)$ és dH/da' a reprezentáns sérülési- és veszélyeztetettségi függvény. Minden sérülési frakció $\tilde{f}_k$ annak a földrengés okozta meghibásodásnak az átlagos feltételes valószínűségét adja, ami az $[a_k, a_{k+1}]$ gyorsulás intervallumban bekövetkezhet.



1. ábra: Lognormális eloszlás p-doboza $\alpha \in \{(\mu, \sigma) | \mu \in [\mu_1, \mu_2], \sigma \in [\sigma_1, \sigma_2]\}$

A fentiek helyett, de épp a fentiek által inspirálva a $\{\langle p_j, H_j\rangle\}$ és $\{\langle q_i, f_i\rangle\}$ sokaságokat az intervallum vagy a p-doboz elmélet alapján is lehet kezelni (lásd például a [7] és [8] hivatkozást). Helyettesítsük például a sérülési görbe sokaságot jobb és baloldali eloszlásfüggvényekkel az alábbiak szerint:

$$\{\langle q_i, f_i\rangle\} \rightarrow \left[\overline{F}(x), \underline{F}(x)\right] \tag{9}$$

ahol $\left[\overline{F}(x), \underline{F}(x)\right]$ egy bal $\overline{F}(x)$ és egy $\underline{F}(x)$ jobboldali eloszlásfüggvénnyel meghatározott doboz, ahol $\underline{F}(x) \le \overline{F}(x)$. Az $\left[\overline{F}(x), \underline{F}(x)\right]$ az x véletlen változó $F(x)$ eloszlását meghatározó p-doboz, amely eloszlásról csak annyit tudunk, hogy a dobozon belül van, $\underline{F}(x) \le F(x) \le \overline{F}(x)$.

A p-doboz alkalmazásának legkézenfekvőbb esete a szerkezetek robosztussága szerinti szűrés, miután az azonos típusú és sérülékenységű rendszerelemeket a modellben egy csoportként kezelhetjük. A robosztus rendszerelemek sérülékenységét is leírhatjuk egy p-dobozzal, amelynek alsó határa $\underline{x}$, ennél kisebb értéknél nincs sérülés, a felső pedig $\overline{x}$, amely fölött azonban a sérülés bizonyos (az x lehet PGA vagy más kárindikátor). Ebben az esetben az egyetlen információ, amire szükség van az alábbi:

$$\underline{P}_{fail} = \begin{cases} 0, & ha \;\; x \le \overline{x}, \\ 1, & egyébként, \end{cases} \tag{10}$$
$$\overline{P}_{fail} = \begin{cases} 0, & ha \;\; x \le \overline{x}, \\ 1, & egyébként, \end{cases}$$

ahol a *p*-doboz már meghatározott, ha sérülékenységre vonatkozó alsó vagy felső becslés, a medián vagy akármely percentilis ismert.

A valószínűségi határokat ki tudjuk számolni, ha van valamilyen feltételezésünk az eloszlásra. Ebben az esetben az eloszlás paramétereire kell alsó és felső becslést tenni. Legyen az eloszlásunk L lognormális, μ várható értékkel és σ szórással. Az L eloszlás alsó és felső határai:

$$d(p) = \max_{\alpha} L_{\alpha}^{-1}(p),$$
$$u(p) = \min_{\alpha} L_{\alpha}^{-1}(p), \tag{11}$$

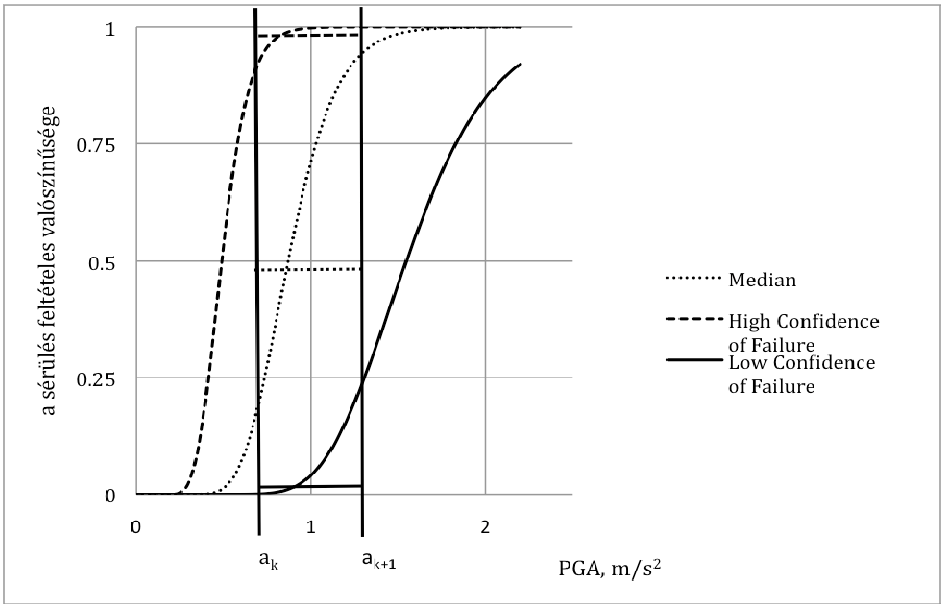
ahol $\alpha \in \{(\mu,\sigma) | \mu \in [\mu_1, \mu_2], \sigma \in [\sigma_1, \sigma_2]\}$, ahogy azt az 1. ábrán szemléltetjük.

Egy sérülékenység ilyen reprezentációjának akkor van előnye, ha egy rendszerelem adott sérülési módjáról kevés információ áll rendelkezésre, vagy ha a rendszerelem lehetséges meghibásodási formáit illetően sem lehetünk bizonyosak. Ugyanez a módszer alkalmazható a veszélyeztetettség leírásánál is.

Az intervallum reprezentáció alkalmazható az (1) egyenletre, különösen, ha annak a (8) egyenlettel megadott közelítését vesszük alapul:

$$\sum_{k=1}^{n} \left\{ \widetilde{f}_k \left(\frac{d\widetilde{H}}{da} \right)_k \right\} \longrightarrow \sum_{k=1}^{n} \left\{ \left[\overline{f}_k, \underline{f}_k\right], \left[\overline{h}_k, \underline{h}_k\right] \right\} \tag{12}$$

ahol $\left[\overline{f}_k, \underline{f}_k\right]$ és $\left[\overline{h}_k, \underline{h}_k\right]$ szakaszosan állandó közelítései a $h(a) = dH(a)/da$ veszélyeztetettségi és a $f(a)$ sérülési görbének. Vegyük a lognormális eloszlást és képezzük az 5, illetve 95 százalékos megbízhatóságú dobozt az $[a_k, a_{k+1}]$ gyorsulás-intervallumban. Az $[a_k, a_{k+1}]$, $\left[\overline{f}_k, \underline{f}_k\right]$ pár kiszámolható, ahogy azt a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: Határoló eloszlások a $[a_k, a_{k+1}]$, $\left[\overline{f}_k, \underline{f}_k\right]$ *párokra (lásd a (12) egyenletet)*

A módszer lehetővé teszi több meghibásodási mód konvolúcióját a hibafában. A sérülékenység adott $[a_k, a_{k+1}]$ terhelési intervallumban történő kiszámítása bizonyos szabadságot biztosít akkor, ha a rendszer modellezése függ a földrengés méretétől, történetesen azáltal, hogy egy radikális, globális meghibásodási módot generáló, új jelenség, mint például a talajfolyósodás fellép.

A fenti eljárásokra kész algoritmusok vannak, lásd például a [7] és [8] hivatkozásokat.

Következtetések

Napjainkban mind az atomerőműveket ért nagy földrengések, mind pedig az új atomerőmű építési projektek miatt a földrengés-biztonság értékelése fontos szerepet kapott. A működő erőművek esetében a földrengés-biztonság adekvát értékelésével lerövidíthető az események utáni kényszerű üzemszünet. Az új atomerőművek tervezésénél pedig a földrengés-biztonság helyes értékelésének figyelembevételével a kezdeti eseményekre kiegyenlített konstrukció alakítható ki. A földrengés PSA - amely hatékony eszköze az atomerőmű földrengéssel szembeni biztonsága értékelésének - több, módszertani szempontból kritikus elemet tartalmaz. Ilyen kritikus elem a sérülékenység leírása szerkezet, rendszerelem szinten, ami kihatással van a rendszer egészének megfelelő modellezésére.

A dolgozatban megmutattam annak lehetőségét, hogy a sérülékenységet a CAV, mint egyetlen független változó függvényeként adjuk meg. Ez javíthatja a sérülékenység meghatározásának egyértelműségét a PGA-ra alapozott leírással szemben, de nem csökkenti az empirikus igazolás munkaigényét. A vázolt elvi alapokon van esély az egyparaméteres sérülési görbék előállítására, ahol a földrengés-teher komplexitását egy paraméter írja le.

A dolgozatban, ha nem is a teljesség igényével, hanem gondolatébresztő példákkal és szemléltetéssel, rámutattam arra, hogy a földrengés PSA gyakorlati végrehajtásában ma is meglévő számos praktikus elem implikálja a sérülékenységnek az intervallumos vagy p-dobozos reprezentációját. Ennek különösen akkor lehet előnye, ha a sérülésre vonatkozó empirikus információ elégtelen a sérülékenység leírására és a sérülékenység alsó és felső határát lehet becsülni, igénybe véve a szakértői becslések értékelésére vonatkozó korszerű eljárásokat.

Irodalomjegyzék

[1] *Kennedy R. P. and Ravindra M. K. Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies. Nuclear Engineering and Design, 79, 47-68, 1984.*

[2] *ANSI/ANS-58.21-2003, External Events PRA Methodology, March 2003.*

[3] *Martin Richner, Sener Tinic, Mayasandra Ravindra, Comparison of PEGASOS Results with Other Modern PSHA Studies, OECD/CSNI-Workshop, "Recent Findings and Developments in PSHA Methodologies and Applications" Lyon, April 7 – 9, 2008*

[4] *Criterion for determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake, EPRI NP-5930, July 1988*

[5] *Giuliano Augusti, Some observations on the calculation of structural failure probability, Meccanica, Volume 10, Number 1, pp. 61-63, March, 1975*

[6] *Elter J. Insights from the seismic probabilistic safety analysis of Paks Nuclear Power Plant, International Conference on Reliability, Safety and Hazard, Mumbai 2005 (ICRESH05), in Reliability, Safety and Hazard: Advances in Risk-informed Technology, Editor: P.V. Varde, 2006, pp. 381–387.*

[7] *W. Troy Tucker and Scott Ferson, Probability bounds analysis in environmental risk assessments, 2003, Applied Biomathematics, 100 North Country Road, Setauket, New York 11733*

[8] *Scott Ferson, Vladik Kreinovich, Lev Ginzburg, Davis S. Myers, Kari Sentz, Constructing probability boxes and Dempster-Shafer structures, Unabridged version, SAND2002-4015, Unlimited Release, Printed January 2003*

