

– a rendszerágak, berendezések többszörözöttségének (redundáns kialakításának) mértékét³,

A paksi atomerőmű biztonsági funkciói, rendszerei és berendezései e szabályok szerint besoroltak (a besorolást, sőt, magukat az NBSZ-beli elveket is a korábbi erőművi hivatalos szóhasználat szerint a legtöbbször ma is ABOS-nak – Atomerőművi Biztonsági Osztályba Sorolás – ismerik). E rövidítés a biztonsági osztályba sorolás ajánlott módszerét leíró hatósági útmutatóban [2] is megjelenik.

A valószínűségi biztonsági elemzés (angolul Probabilistic Safety Assessment, PSA) a létesítmény biztonságát más oldalról közelíti meg, arról számszerű és logikai képet ad, és a fent felsorolt, a determinisztikus elemzésekkel hiányzó szempontok is megjelennek az értékelésében. Az e területen még nem járatos olvasók érdekében a következő fejezetben összefoglaljuk a PSA módszerének lényegét.

Valószínűségi biztonsági elemzés (PSA)

A PSA célja számszerű képet kapni létesítményünk biztonságáról. Ennek érdekében egy eseménylogikai modellt épít fel, az üzemzavar egyes pillanataiban vagy a berendezés egyes hibamódjainál elágazásokkal. Az ágak tartalmát és az eseményláncok végét viszont (értelemszerűen) a fizikai, determinisztikus elemzések adják meg. Az események logikai kapcsolatainak megjelenítése általában ún. eseményszék vagy hibafák segítségével történik.

A PSA legfontosabb bemenő adatai a kezdeti események gyakorisága, az elemi meghibásodások valószínűsége, a berendezések egyéb paraméterei (pl. tesztelési ciklusidő, javítás időtartama) és a hibák közötti függőségek adatai.

A modell kiértékeléséhez definiálni kell a rendszer vagy létesítmény számítandó (általában kedvezőtlen) végállapotát. Meg kell állapítani, melyek azok a minimálisan szükséges és elégséges hibakombinációk, melyek önmagukban a végeseményhez vezetnek. A hibák ilyen együtteseit nevezzük minimálmetszeteknek. Logikailag a végállapot a minimálmetszetek uniója, számszerűen pedig a végállapot valószínűsége a minimálmetszetek valószínűségének összege. Az elemzés végeredménye a végállapot valószínűsége vagy gyakorisága (számadat), és összetétele (halmazlogika).

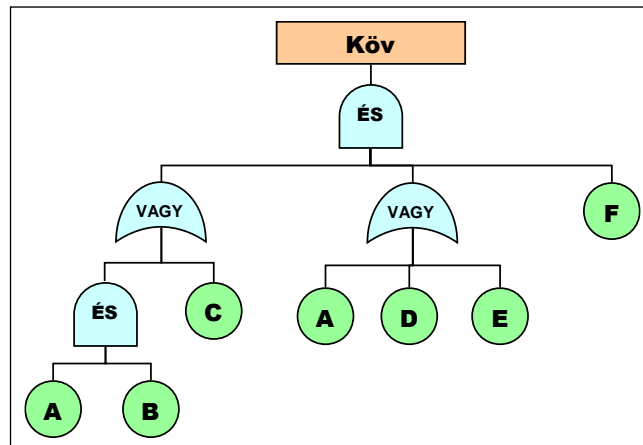
Egyszerűsített mintapélda a PSA módszerére

Az alábbi hibafával egy igen egyszerű rendszert jelképezünk, és elvégezzük kiértékelését.

A fa csúcán levő téglalap (Köv) jelöli a következményt (az elemzett végállapotot). A fa logikai (ÉS, VAGY) kapukból és elemi eseményekből (A, B, C, D, E, F) épül fel.

A rendszerelemző, aki a hibafát készítette, a determinisztikus elemzések alapján arra jutott, hogy a következmény fellépéséhez három feltételnek kell együtt

bekövetkeznie: az F eseménynek, a középső ág három eseménye (A, D, E) közül az egyiknek, és a bal szélső ágból A-nak és B-nek együtt, vagy C-nek. Ezért foglalta a három ágat ÉS-kapuba.



1. ábra: A PSA mintapélda hibafája

Megkeressük, melyek azok az eseménykombinációk, melyek önmagukban a következményt képesek okozni:

- $(A \cap B) \cap A \cap F$ – a zárójel csak az ábrával való érthetőséget szolgálja, tehát A-val értelemszerűen egyszerűsítünk
- $(A \cap B) \cap D \cap F$
- $(A \cap B) \cap E \cap F$
- $C \cap A \cap F$
- $C \cap D \cap F$
- $C \cap E \cap F$

Áttérve a szöveges (ÉS, VAGY) és halmazlogikai (\cap, \cup) helyett az egyszerűbb matematikai („”, „+”) jelölésekre, vegyük észre, hogy ha ABF bekövetkezik, akkor a következményhez már nem szükséges D vagy E bekövetkezése, így a második és harmadik metszet nem minimálmetszet, szintén elhagyhatók.

A maradék halmazok:

$$ABF, ACF, CDF, CEF,$$

azok, amelyek önmagukban a következményt okozzák, vagyis a minimálmetszetek.

$$Köv = ABF + ACF + CDF + CEF \quad (1)$$

és a logikai (halmaz-)egyenletet valószínűségekre vonatkozó egyenletté átírva:

$$P(Köv) = P(ABF) + P(ACF) + P(CDF) + P(CEF) \quad (2)$$

³ A determinisztikus elemzéseket természetesen általában az egyszeres meghibásodási kritérium érvényesítésével végzik, és azt is gyakran feltételezik, hogy maga a kezdeti esemény egy további független rendszerágot működésképtelenné tesz. Azonban ez mindössze a hármas redundancia elméleti megalapozása, a determinisztikus elemzés eredményét továbbra sem befolyásolja a többszörözött berendezések vagy rendszerágak konkrét száma, 3 felett pedig teljesen érzéketlen azokra.

⁴ A minimálmetszetek azonos elemszáma csak e mintapélda jellemzője.

⁵ Mindaz, amit eddig a PSA-ról mondtunk, teljes általánosságban érvényes rá, mint logikai elemző módszerre. Az elemzendő következmény tetszőleges lehet, pl. atomerőművi radioaktív kibocsátás, de egyéb üzemi vagy közlekedési baleset, tűzselei összeomlás, vagy bármilyen végesemény. (Elemmezhetjük akár munkahelyünkről való elkésésünk gyakoriságát is, ha az azt kiváltó tényezőket és kapcsolataikat ilyen pontossággal fel tudjuk mérni.)

Atomerőművi PSA jellemzői

Atomerőműre készített valószínűségi biztonsági elemzésben az elemzett végállapot és a számszerű eredmény általában:

- az ún. **1. szintű PSA**-ban az *aktív zóna sérülése* és annak gyakorisága (Core Damage Frequency, CDF);
- az ún. **2. szintű PSA**-ban, melyben a kiindulás (a kezdeti esemény) az 1. szint végeredménye, a *korai nagy kibocsátás* és annak gyakorisága.

(Léteznek egyéb használatos végállapotok is, melyek pl. a blokk tervszerűen leállított aktív zónájára, vagy a pihentető medencében tárolt üzemanyagra adnak hasznos információt.)

A PSA fontossági számai

A fontossági számok olyan mutatók, amelyek egy eseménynek (elemi eseménynek, vagy ezek csoportjának, pl. egy rendszerágnak) a végeredményben (kockázatban) betöltött teljes szerepéről adnak képet. Ennek különösen akkor van jelentősége, ha az esemény a modellben több különböző helyen is előfordul (példánkban az A esemény volt ilyen). Ily módon megítélhető egy elem fontossága az elemzett rendszerben, létesítményben.

A számunkra most szükséges két fontossági szám, melyeket a CDF végeredményben egy X eseményre mutatunk be:

- **Kockázat-hozzájárulási tényező** (Fractional Contribution, FC): az adott eseményt tartalmazó minimálmetszetekből származó kockázat aránya a teljes kockázatban.

$$FC(X) = \frac{CDF(X)}{CDF} < 1 \tag{3}$$

Szemléletes jelentése szavakkal: „A kockázat mekkora részében van szerepe az X berendezés meghibásodásának?” Például, ha a fenti (2) egyenletben az A esemény kockázat-hozzájárulási tényezőjét akarjuk kiszámolni,

$$FC(A) = \frac{P(Köv)(A)}{P(Köv)} = \frac{P(ABF) + P(ACF)}{P(Köv)} \tag{4}$$

- **Kockázatnövelési tényező** (Risk Increase Factor, RIF): az adott eseményt biztosnak véve számolt kockázat az eredetivel osztva.

$$RIF(X) = \frac{CDF(P(X) = 1)}{CDF} > 1 \tag{5}$$

Szemléletes jelentése szavakkal: „Hányszorosára növeli a kockázatot az X berendezés működésképtelensége?” Például, ha a fenti (2) egyenletben az A esemény kockázatnövelési tényezőjét akarjuk kiszámolni,

⁶ A (6) egyenletben szereplő „CDF” álló betűs szedésével is szeretnénk felhívni a figyelmet, hogy e három esemény logikai szorzatának betűalakja csak véletlenül egyezik a zónasérülési gyakoriság más egyenletekben szereplő, dőlt betűkkel szedett angol CDF rövidítésével.

$$RIF(A) = \frac{P(Köv | P(A) = 1)}{P(Köv)} = \frac{P(I \cdot BF) + P(I \cdot CF) + P(CDF) + P(CEF)}{P(Köv)} \tag{6}$$

ahol a biztos eseményt I-vel jelöltük.⁶

Léteznek egyéb fontossági számok is, melyek más-más oldalról világítják meg az adott eseménynek a végállapotban játszott szerepét.

Berendezések kockázatszempon-tú besorolása

A PSA fontossági számai alkalmasak berendezések (a végállapot szempontjából vett) fontossági sorrendjének felállítására, biztonsági besorolására is. Ki kell jelölni a fontossági szám skáláján egy határt, amely feletti értéknél a berendezést fontosnak, alatta nem fontosnak ítéljük.

A fent definiált két fontossági szám esetében a nemzetközi gyakorlatban általában az alábbi két korlátot használják:

- $FC > 0,005$;
- $RIF > 2$.

(Megjegyezzük, hogy a paksi atomerőműre korábban is készítettünk ilyen jellegű rangsort, ám az - e többszempon-tú módszerrel ellentétben - csak a fontossági számok értékének felsorolásából állt. [3])

Kockázatszempon-tú besorolás lehetősége az Egyesült Államokban

2004 novembere óta az USA nemzeti szabályozása [4] megengedi, hogy az üzemeltetők rendszereik általuk választott körét ne a hagyományos determinisztikus, hanem valamely általuk választott, a PSA eredményeit is figyelembe vevő módszerrel sorolják biztonsági osztályokba. A kockázatalapú skálán való elhelyezés nem felváltja, hanem kiegészíti a hagyományost, így az osztályozás kétdimenzióssá válik, a következőképpen:

1. táblázat Kockázatszempon-tú berendezés-osztályok az Egyesült Államokban

Kockázatalapon	Determinisztikus alapon ⁷	
	Biztonságot érintő	Biztonságot nem érintő
Magas kockázati fontosságú	RISC 1	RISC 2
Alacsony kockázati fontosságú	RISC 3	RISC 4

⁷ Az amerikai determinisztikus osztályozás a magyarországgal ellentétben csak két fokozatú: biztonságot érintő (safety-related) és biztonságot nem érintő (nonsafety-related) berendezéseket különít el.

A RISC rövidítés jelentése *Risk-informed Safety Class*, vagyis kockázatszempontrú berendezésbiztonsági osztály. Megjegyezzük, hogy az amerikai szóhasználatához hasonlóan mi is kockázatalapúnak nevezzük a csupán PSA-fontossági számok alapján végzett, míg kockázatszempontrúnak a determinisztikus, kockázati és egyéb szempontok alapján együttesen végzett, integrált szemléletű besorolást.

A sötétített háttérű 3. osztályba került berendezések kezelési követelményeinek enyhítésére az engedélyes kérelmet nyújthat be a nemzeti hatósághoz. Ha a hatóság ezt elfogadja, az egyrészt az üzemeltető számára komoly költségmegtakarítást jelent, másrészt mind az üzemeltető, mind a hatóság figyelme felszabadul a kockázat szempontjából valóban fontos területek felé.

Az eljárásra a Nuclear Energy Institute iparági szövetség javaslatot dolgozott ki [5], melyet az ottani hatóság 2006 januárjában el is fogadott a jogszabálynak megfelelőként.

A NUBIKI által javasolt hazai besorolási eljárás

A hazai besorolás kockázatszempontrú kiegészítésére tett javaslatban nagyban támaszkodtunk az amerikai jóváhagyott eljárásra, ugyanakkor figyelembe vettük a hazai sajátosságokat is. Részletes leírása [6]-ban olvasható.

Az eljárás tizenkét lépése a következő:

- 1.) Alkalmazás terjedelmének kijelölése
- 2.) Rendszerek, rendszerágak, berendezések határainak megállapítása
- 3.) Rendszerfunkciók meghatározása
- 4.) Berendezések hozzárendelése a funkciókhoz
- 5.) Berendezések kockázati fontosságának elemzése
- 6.) A fontossági osztályozás kiterjesztése a rendszer-funkciókra
- 7.) Az összkockázat követelmények változtatására való érzékenységeinek vizsgálata
- 8.) Szakértői csoport általi felülvizsgálat
- 9.) Kockázatszempontrú biztonsági osztályokba (KSZBO) sorolás
- 10.) Dokumentáció
- 11.) Követelmények változtatása
- 12.) Nyomon követés és időszakos felülvizsgálat

Az 1. lépésben az engedélyes kiválasztja, mely rendszerekre kívánja determinisztikus besorolását kockázati (és egyéb) szempontokkal kiegészíteni. A 2-7. lépéseket, melyekben a rendszerek és berendezések határainak, funkcióinak meghatározása és a tényleges számítások történnek, *előminősítésnek* nevezzük. A 8. lépésben egy nagy tudású, az adott erőműre rálátással rendelkező szakértőkből álló bizottság vizsgál felül minden addig elvégzett műveletet. A 9. lépésben megtörténik az új (kiegészített) szempontok szerinti új osztályokba való besorolás, míg az utolsó három lépés az osztályozás „utóéletéről” szól. Mivel jelen cikk célja egy javasolt besorolásról való általános, tájékoztató szintű beszámoló, e helyen terjedelmi okokból nem kívánjuk az összes lépést részletesen ismertetni, hanem a

legfontosabbakat emeljük ki. A lépések [6] alapján követhetők végig pontosan.

1. lépés: Alkalmazás terjedelmének kijelölése

Javaslatunk szerint az engedélyes hazánkban is maga választhatja meg az erőmű besorolásba bevont rendszereinek körét:

- **önkéntesen**, vagyis a rendszerek köre tetszőleges, akár megmaradhat minden rendszerre a régi besorolás mellett is,
- a **hasznosságot** szem előtt tartva, vagyis azokat a rendszereket kiválasztva, amelyeknél a kockázati eredményekben a determinisztikus besorolástól eltérés várható,
- csak **teljes** rendszerekre választható a kockázatszempontrú besorolás, nem lehet rendszeren belül berendezéseket kiválasztani, másokat kihagyni⁸.

5. lépés: Berendezések kockázati fontosságának elemzése

Ebben a lépésben történik meg a fontossági számok (kockázat-hozzájárulási tényező és kockázatsnövelési tényező) számítása az alkalmazásba bevont rendszerek berendezéseire. A fontossági számok korlátaiként a fent már említett értékeket választottuk, a berendezéseket pedig ebben a lépésben három kockázatalapú csoportba soroljuk, melyben a korlátok szerepe aszimmetrikus:

- **Magas kockázati fontosságú** a berendezés, amelyre $FC > 0,005$
- **Közepes kockázati fontosságú** az a berendezés, amelyre $FC < 0,005$ és $RIF > 2$
- **Alacsony kockázati fontosságú** az a berendezés, amelyre $FC < 0,005$ és $RIF < 2$.

(Mint látható, a kockázat-hozzájárulási tényezőnek a berendezés fontosságának értékelésében nagyobb szerepet tulajdonítottunk.)

8. lépés: Szakértői csoport általi felülvizsgálat

A szakértői csoport szerepe az, hogy a besorolás több legyen a PSA-fontossági számok pusztán mechanisztikus számításánál és alkalmazásánál, mely esetenként félrevezethet akár tapasztalt elemzőt is, ha az adott erőművet és annak PSA-elemzését közelebbről nem ismeri. A csoport minimális létszáma 5 fő, és az alábbi területek mindegyikéről tartalmaznia kell az adott erőművel kapcsolatosan tapasztalattal rendelkező tagokat:

- tervezés
- üzemeltetés
- karbantartás
- műszaki megbízhatóság
- PSA elemzés
- determinisztikus biztonság
- súlyos baleseti elemzés
- engedélyezés.

⁸ Erre a kikötésre a 6. lépés tartalma miatt van szükség, amelyet itt részletesen nem tárgyalunk.

Ez a tudásprofil biztosítja, hogy a csoport figyelmét semmilyen részlet ne kerülje el, így az átsorolás biztosan nem okozza például az üzemelési kockázat rejtett megnövekedését.

A csoport elé terjesztik az előminősítés (2-7. lépés) részletes eredményét, ők felülvizsgálják az elvégzett munkát, hogy minden eredmény megállapítása megalapozottan történt-e, és akár felül is bírálhatják azokat (csak felfelé). Szükség szerint kiegészítik az elemzési eredményt az erőművel kapcsolatos, a PSA-n túlmutató ismereteik segítségével. Hasonlóan kiegészítik az eredményt a PSA-ban nem szereplő berendezések megítélésük szerinti besorolásával. A csoport kérheti akár a felhasznált PSA-modell módosítását is, ha szerintük az nem támogatja eléggé a berendezések fontosságának megállapítását. (Erre a legegyszerűbb példa, ha a PSA valamely rendszeren belül túl sok elemet kezel egyetlen, meghibásodásra egyszerre képes egységként, így az eredménye az adott berendezésekre nagyon általános, konzervatív lesz.)

9. lépés: Kockázatszemponitú berendezésbiztonsági osztályokba (KSZBO) sorolás

A csoport munkájának eredményeként rendelkezésre áll minden berendezésre a kockázati fontosság: magas, közepes vagy alacsony. Ennek és a determinisztikus osztályozásnak az alapján a római számokkal jelölt négy kockázatszemponitú osztályba (KSZBO) sorolás már automatikus, az alábbi táblázat szerint.

Az egyes kockázatszemponitú osztályok (I., II., III., IV.) – értelemszerűen – nagyjából a bal alsó saroktól a jobb felső sarokba húzott átlóval párhuzamosan fekvő területen helyezkednek el. A szürke háttérrel jelölt, ezzel ellenkező átlóba kerülnek azok a berendezések, melyek fontosságát a valószínűségi elemzés körülbelül a determinisztikussal azonosnak ítélte. Ezeknek a kezelési követelményein nem kell változtatni.

2. táblázat Kockázatszemponitú berendezésbiztonsági osztályok a két skála alapján

Fontosság	Biztonsági osztály			
	Első	Második	Harmadik	Negyedik
Magas	I. KSZBO	II. KSZBO	II. KSZBO ▲	II. KSZBO ▲
Közepes	I. KSZBO	II. KSZBO	III. KSZBO	III. KSZBO ▲
Alacsony	II. KSZBO ▼	III. KSZBO ▼	IV. KSZBO ▼	IV. KSZBO

A szürke átló alatt található, lefelé mutató nyíllal jelzett tartományba került berendezések kockázatszemponitú osztálya a determinisztikus osztályánál alacsonyabb. Ezekre a berendezésekre a kezelési követelményeket a felügyelő hatóság engedélyével enyhíteni lehet.

A szürke átló felett található, felfelé mutató nyíllal jelzett tartományba került berendezések kockázatszemponitú osztálya a determinisztikus osztályánál magasabb. Ezekre a berendezésekre a kezelési követelményeket szigorítani kell. (Determinisztikus alapokon konzervatívan megtervezett erőműben ide nagyon kevés berendezés esik, de mivel a PSA esetleg felfedhet olyan szempontokat, melyeket a determinisztikus elemzések nem tudtak, valamennyi előfordulhat.)

Megjegyezzük, hogy intézetünk közreműködésével az eljárás próbaalkalmazása megtörtént a paksi atomerőmű egyik biztonsági rendszerére.

Irodalomjegyzék

- [1] Nukleáris Biztonsági Szabályzatok. Az atomenergiáról szóló 1996/CXVI. Törvény felhatalmazása alapján alkotott 118/2011. (VII. 11.) Korm. kormányrendelet mellékletei
- [2] Atomerőművi rendszerek és rendszerelemek biztonsági osztályba sorolásának alapelvei. 3.1. sz. útmutató. Verzió száma: 3. Országos Atomenergia Hivatal, 2016. március
- [3] Karsa Zoltán, Siklóssy Péter: Az atomerőművi rendszerelemek biztonsági fontosság szerinti csoportosítása valószínűségi biztonsági elemzések felhasználásával. III. Rendszerelemek rangsorolása biztonsági fontosság szerint; VEIKI 22.11-309/3 (OAH/NBI-ABA-15/03) számú jelentés, 2004. november
- [4] Risk-informed categorization and treatment of SSCs for nuclear power reactors; US NRC 10 CFR §50.69 (jogszabály), 2004. november
- [5] 10 CFR 50.69 SSC Categorization Guideline; NEI 00-04, Nuclear Energy Institute, 2005. július
- [6] Karsa Zoltán, Jávors Tamás: Kockázatszemponitú hatósági döntéshozatalhoz szükséges módszertan fejlesztése, rendszerek és rendszerelemek biztonsági fontosság szerinti csoportosítása – Módszertan kidolgozása; NUBIKI 221-015-00 (OAH/NBI-ABA-10/10-M) sz. jelentés, 2010. június