

Egy modern üzem működése technikai berendezések hierarchiájának együttműködését kívánja meg. A berendezések együttműködését modellezni lehet. Az atomreaktorok biztonságos működését is modellek biztosítják. Ezek a modellek tartalmazznak paramétereket, összefüggéseket és van egy érvényességi tartományuk. A biztonsági elemzés során az észszerűen még elképzelhető kezdeti események következtében előálló vagy lehetséges események hatásait kell elemezni. Ezzel foglalkozunk a *Biztonsági modellek alapjai* fejezetben.

A biztonságelemzés egy másik kérdése: létezik-e egy adott effektus? Például egy új gyógyszernek van-e gyógyító vagy káros hatása? Számos olyan megoldatlan probléma létezik, amelynek megoldása fontos. Ilyen többek között a Darwin-detektor, amelynek segítségével megállapítható lenne egy földrengés után van-e élőlény a romok alatt.

A megoldást keresők gyakran nem tudják megmondani, milyen elven működik eszközük, ezért az ellenőrző kísérleteket gondosan kell megtervezni és kiértékelni. A *varázssvessző működése* című fejezetben egy közismert probléma tesztjét mutatom be. A varázssvessző egy sokoldalú eszköz, aminek működése ismeretlen elvekre épül. Használói szerint kimutatható vele földalatti vízér, de az ügyes alkalmazó egy sor egyéb kérdésre is választ tud adni, akkor is, ha ő maga nem ismeri a választ. E fejezetben egy kísérletsorozat eredményeit mutatom be, amelynek célja annak ellenőrzése volt, igazolható-e a varázssvessző néven ismert „kutatási módszer”, amellyel többek között vizet lehet kutatni.

Biztonsági modellek alapjai

Vizsgálatunk tárgya egy bonyolult technológia (egy atomerőmű) biztonságának vizsgálata egy adott szempontból. Feltesszük, hogy az erőmű működik, minden üzemi paramétere a megengedett tartományon belül van. Ekkor váratlanul történik valami, ami jelentősen befolyásolja az erőmű működését. A váratlan eseménnyel egy változás veszi kezdetét, az elemzés célja annak megállapítása, hogy a következmények veszélyeztetik-e az erőmű működését.



Makai Mihály az MTA doktora, fizikus diplomáját az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerezte 1970-ben. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetének professzor emeritusa. Két angol és két magyar nyelvű monográfia, illetve könyv és további több mint 130 tudományos publikáció szerzője.

A kezdeti események sokfélék, ezek mindegyikét fel kell sorolni, és a következményeket meg kell vizsgálni: meg kell becsülni a kezdeti esemény valószínűségét és a lehetséges következményeket. Ebben valószínűségi módszereket szokás használni, a vizsgálati módszert PRA-nak (az angol Probability Risk Assessment rövidítése, ami valószínűségi kockázatelemzést jelent) hívjuk. Ilyen kezdeti esemény egy természeti csapás (például földrengés, árvíz) vagy technikai hiba (például áramkimaradás, a technológia működési zavarai).

Az elemzés első lépésében tehát meg kell becsülni a kezdeti események valószínűségét. Mivel ritka eseményekről van szó, a frekventista megközelítés, amely szerint egy véletlen esemény valószínűsége nagyszámú megfigyelés alapján az esemény relatív gyakoriságával becsülhető, nem alkalmazható [1]. Egy valószínűségi modellt szokás kidolgozni, amelynek alkalmazhatóságát ellenőrizni kell, a benne szereplő paraméterek becsülésére eljárást kell kidolgozni. Az alkalmazott modelleket az alábbi kategóriákba lehet sorolni.

Kezdeti események

A kezdeti események technológiához kapcsolható részéhez (lásd a következő pontokat) valószínűségi modellt lehet kidolgozni, és megbecsülni a modellben szereplő paramétereket. Ugyanakkor a természeti csapások előfordulásának valószínűségét is lehet becsülni. A két leggyakoribb valószínűségi modell a Poisson- és a binomiális eloszlás. A véletlen események gyakorisága Poisson-eloszlást követ, ha az alábbi feltételek teljesülnek:

- Az esemény bekövetkezésének valószínűsége adott dt idő alatt λdt , azaz arányos dt -vel.
- Egzaktul egyidejű események előfordulása kizárható.
- Át nem fedő intervallumokban előforduló események száma statisztikailag független.

A véletlen események ξ számának eloszlása ekkor

$$P(\xi = x) = \frac{\exp(-\lambda t)}{(\lambda t)^x}$$

Hiba indításkor vagy állapotváltozáskor

A berendezések egy részének az a funkciója, hogy adott jelre be (vagy ki) kell kapcsolnia. Ha ez p valószínűséggel sikerül, akkor a valószínűségi modell binomiális eloszlás lehet, amennyiben fennállnak az alábbi feltételek:

- a kísérletek száma legalább egy és előre ismert;
- minden kísérlet kimenete siker vagy kudarc lehet csak;
- a kísérletek eredménye statisztikailag független;
- a hiba bekövetkezésének p valószínűsége állandó.

Ekkor az n próbálkozásban bekövetkező hibák ξ száma binomiális eloszlást követ. Az eloszlás két paramétere n és p .

Működési hiba

A mérések (például hőmérő, nyomásmérő) folyamatosan működnek, hiba esetén javítani kell, ha lehet.

Működési idő

Egyszerű eszközök is, amelyen egy izzólámpa, véges idő után elromlanak.

Kiesés a rendelkezésre-állásból

Egyes berendezések (például tartalék energiaforrás) csak ritkán működnek, de előfordul, hogy szükség esetén nem indulnak el.

A fenti modellek alkalmazhatósága a feltételezések igazolásán múlik. Természetesen az analízisben több valószínűségi modell is szóba jöhet, ezek között a feltételek vizsgálata alapján kell dönteni.

A valószínűségi modell

Bemutatunk egy példát, amelyben megvizsgáljuk a Poisson-modell alkalmazhatóságát egy adott kezdeti eseményre, a nem tervezett reaktorleállásra. Az erőművek begyűjtik egy adott időszak alatt a reaktorleállások statisztikáját. Kérdés, alkalmazható-e a Poisson-modell.

Az a . feltevés szerint λ meghibásodás valószínűségének a vizsgált időintervallumban állandónak kell lennie. Ha az intervallum hosszú, például több éves, akkor az események száma nagy, de nem valószínű, hogy λ állandó lenne a műszaki tapasztalatok bővülése miatt. Valóban, az elemzések szerint λ értéke például 1987 és 1995 között jelentősen csökkent. Ekkor egy itt nem részletezett, jóval bonyolultabb modellre kell áttérni [2].

A b . feltevés szerint egzaktnál egyidejű események nem fordulhatnak elő. Ez nyilván több erőművi blokk adatainak elemzése során nem áll fenn. A c . feltevessel is baj van, hiszen az azonos blokkon vizsgált eseményekben szerepet játszik a személyzet tapasztalata, ami növekszik az idővel. A Poisson-modellt tehát el kell vetni.

Tegyük fel, találtunk olyan valószínűségi modellt, amely alkalmazható a statisztikai adatokra. A következő lépésben meg kell becsülni a megfigyelések figyelembe vehető n számát és a meghibásodás p valószínűségét. Amennyiben a statisztikai adatok eltérő műszaki állapokra (például időközben fejlesztés történt), eltérő kezdeti eseményekre vonatkoznak, a megfelelő statisztikai adatokat nem szabad együtt vizsgálni.

Az alábbi példa a feszültségkiesést vizsgálja öt amerikai erőműben, a feszültségkiesés leállás közben történt 1980 és 1996 között. Először vizsgáljuk meg, alkalmazható-e a Poisson-modell. Az elemzések nem utalnak trend jelenlétére a vizsgált időintervallumban. Szimultán esemény nem lehetséges, noha egy erőművön belül a blokkok között az események lehetnek korreláltak. Az 1. táblázat 116 erőmű adataiból készült, összesen 8 eseményt dolgoztak fel, két alkalom-

Erőmű	Esetszám	Vizsgált idő (év)
CR-3	5	5,224
SL-1	0	3,871
SL-2	0	2,064
TP3	2	5,763
TP4	1	5,586
összesen	8	22,508

mal találtak korrelációt. Korreláció nem zárható ki, de ritka esemény. Az események függetlenségére vonatkozó feltevés sérülhet a személyzet tanulása miatt, de a trendek elemzése szerint a hatás marginális.

Tegyük fel, hogy a Poisson-modell alkalmazható. Ekkor egyetlen λ érték leírja a leállási időket. Jelölje az esetszámot x_j , a vizsgált időtartamot t_j , és az alábbi hipotézist kell vizsgálnunk: $H_0: \lambda$ értéke azonos a kiválasztott erőművekre. Ennek eldöntésére alkalmas a χ^2 -próba ([1] 757. oldal). Kiszámítjuk az $e_j = \lambda t_j$ értékeket, $j = 1, \dots, 5$; az öt erőműnek megfelelően, λ becslésére pedig a $\lambda = x/t = 0,355$ értéket használjuk. Ebből pedig az

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^5 \frac{(x_j - e_j)^2}{e_j} = 7,92$$

érték adódik, ami a 90,6%-os kvantilise a χ^2 -eloszlásnak. A hipotézist, vagyis azt, hogy egyetlen λ érték használható az öt erőműre, ezen a szinten el kell fogadni.

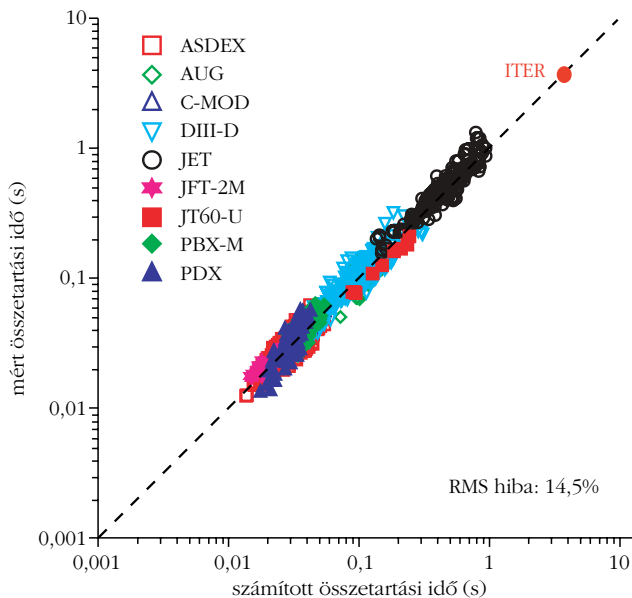
Megjegyzem, gyakran szükségtelen a statisztikai vizsgálat, a hipotézist gyakran el lehet bírálni egyszerű grafikon alapján is. Ebben az esetben elegendő a maximum likelihood becslésből adódó λ érték és a megfelelő szórás meghatározása.

A példa tanulsága: egy ipari alkalmazásban is lehet a statisztikai eszközök alapján megbízható döntést hozni. Ehhez egy világosan megfogalmazott modellre és megbízható matematikai eszközökre van szükség.

A következő részben ismertetett modell meglehetősen hiányos, az eszköz működési elve nem ismert, ezért elfogadási kritériumokat nem lehet megfogalmazni. Részletes statisztikai elemzés helyett beérjük azzal, hogy az eredmények grafikus ábrázolása alapján is elbírállhatók. A teszt kivitelezésében arra a momentumra hívom fel a figyelmet, hogy a vizsgált jelenség hívei és ellenzői is részt vettek a kísérlet megtervezésében és kiértékelésében.

A varázsvessző működése

A varázsvessző egy meghatározatlan eszköz, ami kizárólag a használó kezében működik. Van, aki egy ingát használ, más egy Y alakú ágat. Az inga vagy a



1. ábra. Termikusenergia-összetartás számított és mért idejének összehasonlítása 10 fúziós kísérleti berendezésben.

„bot” anyaga, geometriája, változatos lehet. Valószínű, hogy maga az ember a „detektor”, de nem ismert a mechanizmus, amivel észlelését – feltehetően akaratlanul – közvetíti a mérőeszközhöz.

Meg kell említeni a varázssvessző egy másik tulajdonságát is: érzékeny egy azonosítatlan „földsugárzás”-ra. Ennek megnyilvánulása: a varázssvessző „jelez”, noha nincs a közelében detektálható anyag. Maga a földsugárzás is bizonytalan fogalom, különböző személyek szerint a földsugárzás megjelenési helye eltérő.

1986-ban az NSzK-kormány mintegy 400 000 DM keretű projektet indított a Münchener Egyetemen. A kutatást biztosító NSzK-kormány egy olyan vizsgálatot finanszírozott, amely hitelt érdemlően tisztázza, létezik-e valami gyenge effektus a varázssvesszősök működésében. Egy ilyen vizsgálatba fontos bevonnak a varázssvesszősöket is, hiszen ők tudják megmondani, mire képesek eljárásuk. Ennek megfelelően a kísérlet megtervezésére a kezdetektől bevonták a varázssvesszősöket. Hangsúlyozni kell, hogy a kísérleti projekt arra a feltételre épült, hogy a varázssvessző működik.

A kísérlet megtervezése

A kísérlet méréseihez a varázssvesszősök hirdetések útján toboroztak résztvevőket. Az előzetes teszteken 500 jelentkező vett részt. Képességeiket a varázssvesszősök tesztelték, a tesztek alapján kiválasztották a 43 legsikeresebb varázssvesszőst.

A következő lépés annak megfogalmazása, mit képes jelezni a varázssvessző. A varázssvesszősök szerint áramló vizet képesek jelezni, a természetben egy 3 m átmérőjű, 100 m mélyen futó vízáram kimutatása gyakori. Ennek megfelelően a következő elrendezést alakították ki. Egy kétszintes csűr földszintjén elhelyeztek egy csövet, amelyben víz áramlott. A csűr felső szintjén elhelyeztek egy 10 m hosszú egyenest,

amelyen 10 cm-es osztások voltak. A varázssvesszős feladata az volt, hogy megbecsülje a csűr alsó szintjén elhelyezett cső pozícióját.

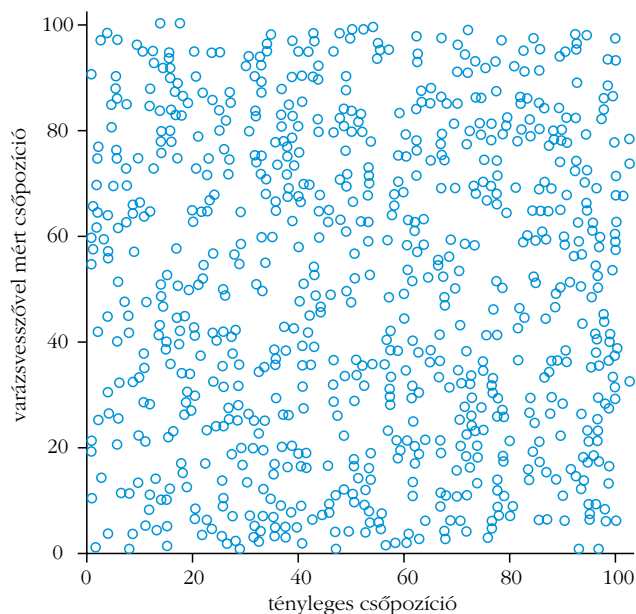
Az áramló víz többféle lehetett: lamináris vagy turbulens áramlás, a víz lehetett tiszta, sós vagy homokkal kevert. Minden varázssvesszősnek olyan feltételeket biztosítottak, amelyben a legsikeresebbek voltak az előzetes tesztekben. Ha valaki panaszkodott, hogy bizonyos csőpozícióban nem érzékeli a vízáramot, azt a pozíciót az ő esetében kihagyták a tesztek közül. Ha valaki fáradtságra panaszkodott, akkor a tesztet megszakították. A tesztsorozat két évig tartott.

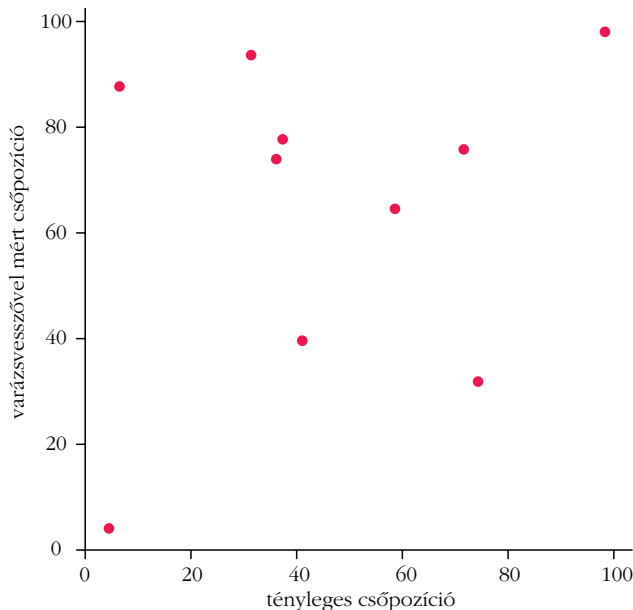
A cső valódi és vélt helyét ábrázolhatjuk az x , illetve az y tengelyen. Ekkor a tökéletes mérés egy 45° -os egyenes lesz. Ha a vélt hely hibás, például a megfigyelést zaj terheli, az egyenest a „zaj” eltorzítja. A jó „mérés” várhatóan a 45° -os egyenes körüli eredményeket ad, az eltérés jelzi a mérés hibáját.

Bemutatunk egy bonyolult fizikai jelenség megfigyeléséből készült hasonló grafikont (1. ábra). Az ábra vízszintes tengelyén az ITER berendezésre kidolgozott, törktitevős hatványok szorzatait tartalmazó, gyakorlati megfontolásokból kapott közelítő összefüggés által jósolt, a függőlegesen pedig a mért összetartási idő látható [3]. A 10 berendezés – bár több lényeges paraméterben különbözik – összetartási idejét közelítő összefüggés (amelyet mérnöki intuíció segítségével becsültek) az ábra tanúsága szerint kielégítő, az RMS hiba mintegy 15%-os. Bár az illesztés intuíción alapul, de nem tagadható, hogy a jelenség lényegét sikerült megragadni: a termikus energia és az összetartás ideje közötti sokváltozós, azokban is tört hatványok szorzatait tartalmazó összefüggés eredménye – három nagyságrenden keresztül – közelítőleg a kísérletileg kapott értéket adja.

Összehasonlításként a 2. ábrán bemutatjuk a 843 varázssvessző-kísérlet eredményeit. Egy varázssvesszős

2. ábra. A varázssvesszővel mért csőpozíció (függőleges tengely) és a tényleges csőpozíció (vízszintes tengely) 843 megfigyelés alapján, lásd Enright cikkét [4].

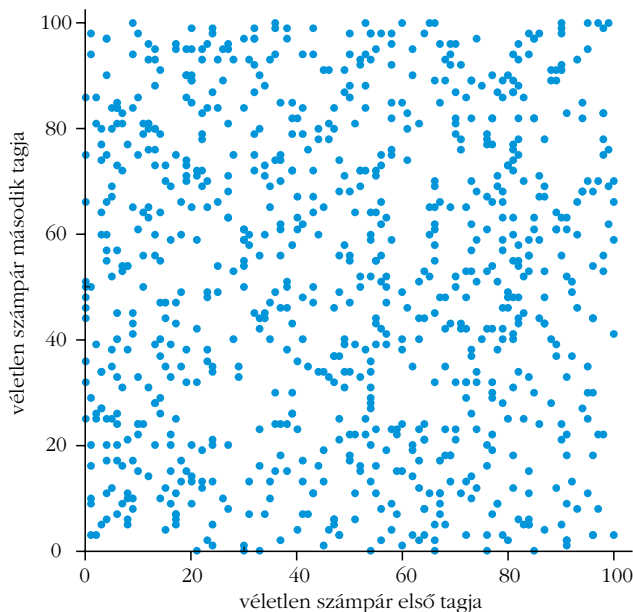




3. ábra. A 99., az egyik legsikeresebb varázsvesszős eredménye.

10-15 mérésben vett részt. A 2. ábra láttán az jut az eszünkbe, itt valamit elrontottak! Amennyiben oksági összefüggés van a függőleges és vízszintes tengelyen ábrázolt mennyiségek között, azok képeinek valamilyen alakzat mentén kellene csoportosulni. Az 1. ábrán lévő eltéréseket lehet vizsgálni példának okáért a berendezés geometriai méretének függvényében és amennyiben a berendezések geometriai mérete valamint az egyenestől vett távolsága között korreláció van, a közelítő összefüggés hibájára gyanakodhatunk. A 2. ábrán azonban nehéz hasonló következtetést levonni. A „mérés” elvi alapjait nem ismerjük, így nincs mód részletes elemzésre. Megjegyzem, hogy a 2. ábra felel meg a valószínűségi kockázatelemzés legegyszerűbb grafikus ábrázolásának, amihez nincs matematikai modell, nincs hibaelemzés.

4. ábra. Egyenletes eloszlású véletlen számpárok.



Kézenfekvő arra gondolni, hogy a megfigyelésekben nem megfelelően különítették el a sikeres és sikertelen varázsvesszősök eredményét. Az egyik legsikeresebb varázsvesszős eredménye látható a 3. ábrán. 10 becslésből öt nagyon közel van a pontos eredményhez, de öt másik adat nagyon kiszór. Az adatokat statisztikai eszközökkel részletesen lehet elemezni.

A statisztikai elemzés helyett álljon itt egy egyenletes eloszlásból kapott 843 elemű minta eredménye (4. ábra). Feltűnő a hasonlatosság a 2. és a 4. ábra között.

Egy modellel alá nem támasztható hipotézis vizsgálatában fontos, hogy az ellenőrző kísérletek megszervezésében a hipotézist támogatók is részt vegyenek. A varázsvessző vizsgálatában a jelentkezők kiválogatásában, eredményességük megítélésében a varázsvesszősöké volt a vezető szerep. Ők fogalmazták meg azt is, milyen célok teljesítése várható a varázsvesszőtől. A kísérletek kiértékelése a tudományos és műszaki kísérletek során általában alkalmazott statisztikai módszerekkel történt. Ebben nincs helye kompromisszumnak.

A varázsvessző működését a kísérlet eredményei nem támasztották alá. Tény, hogy egyes esetekben a varázsvesszővel meglepően jó eredményeket sikerült elérni, azonban ezen esetek gyakorisága nem tér el a véletlen találgatások gyakoriságától. A kísérlet konklúziója: nem érdemes a varázsvessző további vizsgálatára pénzt és energiát fordítani.

Következtetések

A racionális megfontolások alapján létrehozott berendezések biztonságának vizsgálata során statisztikus módszereket kell alkalmazni, ezért a következtetések is csak statisztikus jellegűek. Egy adott berendezés csak nagy valószínűséggel lehet biztonságos. Olyan berendezést nem lehet építeni, ami stabil lenne minden lehetséges ráhatással vagy változással szemben. A veszélyes berendezéseket nem kötelezőn döntése egy adott technika alkalmazása vagy elvetése. Ebben a szakemberek szerepe arra korlátozódik, hogy a tényeket megismertessék a közvéleménnyel és a döntéshozókkal.

Meg lehet fontolni, a fentiekől eltérő alapokon álló eszközök alkalmazását is. Ha egyszer lesz egy Darwin-detektor, akkor azt használni kell emberi életek mentésére. Ehhez azonban a néhány esetben megfigyelhető véletlen egybeesésnél többre van szükség. Ezt láttuk a varázsvessző vizsgálata kapcsán. Egy ilyen eszköz használata megalapozatlan reményeket kelt, és felveti a tudatos félrevezetés gyanúját is.

Irodalom

1. Pál L.: *A valószínűség számítás és a statisztika alapjai*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1995, I. kötet, Bevezetés.
2. *Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment*, NUREG/CR-6823. US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington DC, 2003.
3. ITER-FEAT Outline Design Report. *ITER EDA Documentation Series no. 18*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.
4. J. T. Enright: Testing Dowsing: The Failure of the Munich Experiments. *Skeptical Inquirer* 23/1 (1999) January/February.