



# **Elektrosztatikus eredetű veszélyek kezelése, értékelése**

**Balog Endre**

**Doktori (Ph.D.) értekezés**

**Konzulens:**

**Dr. Berta István**

egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,

Villamos Energetika Tanszék

Nagyfeszültségű Technika és Berendezések csoportja

**Budapest, 2004**

# 1. Összefoglalás

Az elektrosztatikus feltöltődésből származó problémák és veszélyek sokféleképpen és különféle mértékben befolyásolják életünket és tevékenységeinket. Az elektrosztatikus feltöltődésből származó veszélyek létezéséről, mértékéről általában csak közvetett módon szerezhetünk információt, illetve ezek az információk sokszor bizonytalanok és hiányosak. Ennek okai lehetnek az elektrosztatikus feltöltődési jelenségeknek, illetve az ezeket magukba foglaló ipari rendszereknek az összetett volta, illetve a megfelelő mennyiségű és megbízhatóságú információ hiánya. A komplexitásból, az információ bizonytalanságából illetve hiányosságából eredő nehézségek a fuzzy matematika eszköztárának segítségével kezelhetők. A lehetséges veszélyek vizsgálatával képet kaphatunk az elektrosztatikus feltöltődésből származó veszélyek mértékéről és ezek alapján döntéseket hozhatunk a biztonság növeléséhez szükséges beavatkozásokról.

Az értekezésben az elektrosztatikus veszélyek kezelésének újfajta megközelítési módjára teszek javaslatot, amely egy egyéni, személyre szabott kockázatvállalási stratégia és a vizsgált esetre érvényes lehetséges káresemények jellemzői alapján határozza meg a kockázat mértékét. A különböző védekezési módokat a potenciális károsult által előre beállított kockázati szintet meghaladó kockázatvállalás elkerülésére kell alkalmazni. Ez a megközelítés átfogó képet ad az elektrosztatikus veszélyek kezelésének lehetőségeiről, és a gyakorlat számára is támpontot jelent az optimális védekezési mód meghatározásában.

Részletesen elemzem az ipari elektrosztatikus rendszerek esetében alkalmazott védekezési módot, a hibadiagnosztikai rendszereket. Megvizsgálom az elektrosztatikus rendszerek esetében alkalmazott diagnosztikai feladat tulajdonságait, és összevetve a gyakorlatban sokszor alkalmazott emberi operátor képességeivel, definiálom a komplex elektrosztatikus rendszer fogalmát. A fuzzy matematika eszközeinek segítségével a komplex elektrosztatikus rendszerek esetében bemutatom a diagnosztikai feladat egy lehetséges megvalósítását, mely kielégíti a biztonságos diagnosztikai rendszer kritériumát.

Az elektrosztatikus, és kifejezetten a légköri elektrosztatikus veszélyek vizsgálatánál a káresemények előfordulási gyakoriságának meghatározásakor különböző sztatikus jellemzők gyakorisága jelenti a kulcsot a kockázat megbízható értékeléséhez. Ezeket a jellemzőket

általában különböző mérések alapján határozzák meg. A mérések paraméterei (hely, idő, pontosság, elrendezés, stb.) illetve a vizsgált elrendezés paraméterei közötti eltérés kezelésére bevezettem a mérési adatokra vonatkozó megbízhatóság és relevancia (vizsgált esetre való alkalmazhatóság) fogalmát. Ezek segítségével a kockázat értékelésekor figyelembe vehetjük a vizsgált elrendezésre érvényes sztatikus jellemzőkről rendelkezésre álló információink hiányosságát.

Az értekezésben foglalt tudományos eredményeket nemzetközi tudományos konferenciákon mutattam be. A dolgozat bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karának dékáni hivatalában elérhetők.

## 2. Tartalomjegyzék

<b>1. Összefoglalás</b>	<b>2</b>
<b>2. Tartalomjegyzék</b>	<b>4</b>
<b>3. Köszönetnyilvánítás</b>	<b>6</b>
<b>4. Elektrosztatikus eredetű zavarok</b>	<b>7</b>
4.1. Ipari elektrosztatika	7
4.1.1. Az elektrosztatikus feltöltődések	7
4.1.2. Az elektrosztatikus kisülések	8
4.1.3. Az elektrosztatikus tűz és robbanásveszély	13
4.1.4. A villamos porleválasztók	15
4.1.4.1. A villamos porleválasztók elvi felépítése	15
4.1.4.2. A villamos porleválasztók működésének fizikai háttere	16
4.1.4.3. A leválasztási hatásfokot csökkentő jelenségek	20
4.2. Légköri elektrosztatika / Villámvédelem	24
4.2.1. A zivatarok kialakulása	24
4.2.2. A villám keletkezése	26
4.2.3. A villámcsapás fizikai tulajdonságai	29
4.2.4. A villámcsapásból eredő kockázat meghatározásának klasszikus módszere	32
<b>5. Ipari elektrosztatikus rendszerek hibadiagnosztikai kezelése</b>	<b>33</b>
5.1. A hibadiagnosztika meghatározása	33
5.2. A diagnosztikai rendszerre vonatkozó követelmények	34
5.2.1. A tünetek detektálása	34
5.2.2. A hibák azonosítása	35
5.2.3. A hibák elhárítása	35
5.3. A diagnosztikai rendszer megvalósítása elektrosztatikus rendszerek esetében	35
5.4. Az automatizált fuzzy diagnosztika alkalmazása elektrosztatikus rendszerek esetében	38
5.4.1. Az alkalmazás általános leírása	40
5.4.2. A működés leírása	43
5.4.3. Szigetelő anyagú fólia festése	44
5.4.4. Elektrosztatikus porleválasztás	54
<b>6. Légköri elektrosztatikus eredetű veszélyek vizsgálata</b>	<b>65</b>
6.1. A kockázat megítélése a klasszikus módszerből kiindulva	65
6.1.1. A lehetséges károk meghatározása	67
6.1.2. A károk értékének meghatározása	68
6.1.3. A károk bekövetkezéséhez szükséges feltételek meghatározása	69

6.1.4.	A károk előfordulási gyakoriságának meghatározása _____	70
6.1.5.	A villámmal kapcsolatos előfeltétel gyakoriságának meghatározása _____	72
6.1.5.1.	$N_v$ meghatározása _____	73
6.1.5.1.1.	<i>Az átlagos becsapási sűrűség (<math>N_g</math>) vizsgálata</i> _____	74
6.1.5.1.2.	<i>Az egyenértékű terület vizsgálata</i> _____	82
6.1.5.2.	$D_p$ meghatározása _____	86
6.1.6.	A kockázat mértékének meghatározása _____	87
<b>7.</b>	<b>Tézisek</b> _____	<b>90</b>
<b>8.</b>	<b>Táblázatjegyzék</b> _____	<b>93</b>
<b>9.</b>	<b>Ábrajegyzék</b> _____	<b>94</b>
<b>10.</b>	<b>Irodalomjegyzék</b> _____	<b>95</b>
<b>11.</b>	<b>Függelék</b> _____	<b>99</b>
11.1.A	fuzzy halmazelmélet alapjai _____	99
11.2.L-R	típusú fuzzy számok _____	102
11.3.	Fuzzy relációk és az inverz probléma _____	104
11.3.1.	Definíciók _____	104
11.3.2.	Az inverz probléma megoldása _____	107
11.3.2.1.	A megoldás létezésének szükséges és elégséges feltétele _____	108

### 3. Köszönetnyilvánítás

Elsőként tanáromnak és konzulensemnek, Dr. Berta Istvánnak szeretnék köszönetet mondani, aki bevezetett a tudományos életbe, és ezáltal a világ számomra addig ismeretlen területeit tárta fel előttem. Szakmai és személyes beszélgetéseinken keresztül, valamint kitartó támogatásával mindvégig segítséget nyújtott tudományos munkámban és az értekezés elkészítésében. Hasonlóképpen köszönöm Dr. Horváth Tibor hasznos szakmai tanácsait, valamint a BME Villamos Energetika Tanszék Nagyszültségsű Technika és Berendezések Csoportján dolgozó összes munkatárs támogatását. Köszönettel tartozom Pula László és Kiss István barátaimnak is, akikkel együtt kezdtük el a tudományos munkát és akik nélkül nem jöhetett volna létre ez az alkotás.

Feleségemnek, Zsófinak nagyon köszönöm a támogatását és a kívülálló magabiztosságával megtett kritikus észrevételeit, melyek segítettek abban, hogy a munkám lényege kicsiszolódjon és minél inkább felszínre kerülhessen. Gyermekeimnek, Benedeknek és Mendelnek pedig köszönöm a folyamatos jelenlétet és együttlétet, mely bár rendkívül hatékonyan lassította a munka előrehaladását, de többet jelentett bármely tudományos eredménynél.

OAMDG

.....  
Balog Endre

## 4. Elektrosztatikus eredetű zavarok

### 4.1. Ipari elektrosztatika

#### 4.1.1. Az elektrosztatikus feltöltődések

A környezetünkben lévő anyagok eredeti állapotukban villamos szempontból semlegesek. A pozitív és negatív töltéshordozók a testek teljes térfogatában egyenletesen és egyenlő számban helyezkednek el. Különböző kölcsönhatások következtében azonban ez a semleges állapot a töltéshordozók helyi feldúsulása során megszűnhet. Az egyensúlyi állapot megszűnését elektrosztatikus feltöltődésnek nevezzük. Elektrosztatikus feltöltődés villamosan vezető és szigetelő testeken egyaránt keletkezhet. A vezető testek esetében azonban csak akkor beszélünk elektrosztatikus feltöltődésről, ha a test nem kapcsolódik valamilyen feszültségforráshoz vagy nincs földelve. Az elektrosztatikus feltöltődés két, egymással ellentétes folyamat eredőjeképpen jön létre. A töltőfolyamat hozza létre a feltöltődést, és annak mértékét folyamatosan növeli. Ezzel ellentétesen hat az elvezetés, mely a töltéshordozók egyensúlyának irányába hat. A feltöltődés akkor állandósul, ha a két folyamat egyensúlyba kerül.

A feltöltődési folyamatokat a következőképpen szokás csoportosítani [17]:

#### □ **Töltések szétválasztása**

Az eredetileg egységet alkotó anyag több részre válik szét, ennek során az egyes részek töltéshordozóinak aránya megváltozik az eredeti anyaghoz képest, miközben a teljes rendszer összes töltése állandó marad.

#### □ **Töltésleadás**

A testről eltávozó töltések miatt az adott test felszínén ellenkező polaritású töltések maradnak vissza. A töltésváltozás ezen fajtája esetében a vizsgált rendszer összes töltése változik meg a töltéshordozók leadása révén.

#### □ **Töltésfelvétel**

A testre érkező töltések miatt az adott test felszínén töltések halmozódnak fel. A

töltésváltozás ezen fajtája esetében a vizsgált rendszer összes töltése változik meg a töltéshordozók fogadása révén.

Ezeket a folyamatokat különböző okok és körülmények idézhetik elő. Ilyen lehet pl. az anyagok érintkezése utáni szétválás, a hasítás, darabolás, porlasztás, az elektrosztatikus megosztás, a különböző ionizációs folyamatok, a nagyfeszültségű kisülés, a halmazállapot-változás, a dörzsölés, az ütés vagy nyomás.

#### **4.1.2. Az elektrosztatikus kisülések**

Az elektrosztatikus feltöltődésből származó kisülések általában atmoszferikus levegőben és kis távolságokon jönnek létre, folyamatos energia-utánpótlás nélkül. A következőkben az ilyen jellegű kisüléseket tárgyalom.

A levegőben állandóan keletkező szabad elektronok térerősség hatására felgyorsulnak. Semleges gázmolekulákkal ütközve akkor képesek ún. ütközési ionozást létrehozni, ha az elektron mozgási energiája nagyobb, mint a semleges gázmolekula ionozási energiája. Az elektron mozgási energiája az ütközés nélkül megtett szabad úthossznak és a térerősség hatására fellépő gyorsító erőnek a függvénye. Ha ütközési ionozás jön létre, akkor az így keletkező újabb szabad elektron is gyorsulni kezd és megfelelő nagyságú mozgási energiára szert téve újabb ütközési ionozást hozhat létre. Ezen lavinaszerű folyamat során a szabad töltéshordozók száma gyorsan növekedhet és ha az egységnyi úthosszra eső ütközési ionozások gyakorisága elég nagy, akkor ún. elektronlavina jön létre. Az ütközési ionozást és törvényeit Townsend vizsgálta először [13] és ő foglalkozott az elektronlavina kialakulásának törvényszerűségeivel is. A térerősség növekedésével 30 kV/cm érték körül az elektronok számának növekedése (az elektródtól megtett úthossz függvényében) lényegesen nagyobb értéket mutat, mint akár 25 kV/cm-nél. Elektronlavina kialakulásáról tulajdonképpen csak a 30kV/cm érték fölött beszélhetünk, ez jelenti a kisülések megindulásának határát. Mivel a lavina belsejében az elektronok kissé távolodnak egymástól, ezért egy csepp alakú lavinaforma jön létre. Az elektronok a lavina vastagabb „fej” részében koncentrálnak, mögöttük pedig az ütközési ionozás során visszamaradt pozitív ionok helyezkednek el.

A gerjesztési ionozást követően a gerjesztett molekulák, fotonok minden irányba szétsugározhatják a gerjesztésükhöz szükséges energiát. Ezek a fotonok ionizálhatják a gáz



azon molekuláit, amelyek ionozási energiája kisebb a kisugárzott fotonok energiájánál. Az elektronlavina feje körül tehát minden irányba újabb szekunder lavinák startelektronjai keletkeznek. A primer lavina elektronjai – utolérve a szekunder lavinákat – találkoznak a szekunder lavinák hátramaradt pozitív ionjaival, ami újabb heves ütközéseket, újabb fotonokat és újabb előrevetett startelektronokat eredményez. Végül egy elágazó, csatornaszerű kisülési kép alakul ki, amit streamer-nek neveznek. A streamer esetében az elektronlavinával ellentétben az ütközési ionozás mellett nagyobb szerephez jut a fotoionozás. A streamer csatornában a térerősség csökken a 30kV/cm értékről kb. 5 kV/cm értékre, az áramerőssége viszonylag kicsi ( $10^{-8} - 10^{-4}$  A nagyságrendű), a hőmérséklet pedig néhány száz Celsius fokra emelkedik. A streamer-csatorna hosszának növekedésével az áramerőssége is folyamatosan nő. Ha túllépi a 0,01 A-t, akkor instabillá válik és az áramerőssége ugrásszerűen 0,2-0,5 A-re nő. A nagyobb áramerősség folytán növekszik a csatorna hőmérséklete és egy fényesebb „leader”-csatornává alakul át. Ebben az esetben az ütközési és fotoionozás mellett már a hőionozás is jelentős szerepet játszik a szabad töltéshordozók számának növelésében. A leader-csatorna mentén a térerősség tovább csökken kb. 1 kV/cm átlagos értékre, a nagyobb áramerősség miatt a hőmérséklet 1000 Celsius fok fölé növekszik. A kisülési csatorna eltorzítja az elektródok közötti térerősséget, és a még át nem ütött részen jelentősen megnöveli a térerősséget. Ilyen módon a kisülés önmagát erősíti, és a másik elektródig nem áll meg. Az elektródok áthidalásával létrejött zárlat villamos paramétereit nem maga a kisülés, hanem a külső hálózat villamos tulajdonságai határozzák meg.

Az elektrosztatikus kisülések lehetnek a fémelektródok közötti teret teljesen áthidaló átütések, vagy az elektródok közne egy részét áthidaló részleges átütések. Ha a gázban létrejövő kisülés valamilyen szilárd vagy folyékony szigetelőanyag felülete mentén alakul ki, akkor átívelésnek nevezzük. Az elektrosztatikus kisülésekre az jellemző, hogy a kisülés táplálására rendelkezésre álló töltésmennyiség korlátozott, amit a kisülés árama viszonylag hamar elfogyaszt.

Az olyan elektrosztatikus kisülést nevezzük szikrának, ahol az elektródelrendezés viszonylag kis kapacitása miatt a leader-csatorna árama nem tud tovább növekedni, még a villamos ív kialakulása előtt csökkenni kezd. Az áramerősség gyors változása nyomáshullámokat kelt, ezért éles, csattanó hangot lehet hallani. Ha a nagyobb kapacitás miatt a felhalmozott elektrosztatikus töltés elég nagy, akkor a kisülési csatorna eljuthat a villamos ív állapotába is.

Az ívcsatornában a hőmérséklet 2000 Celsius fok fölött van, és az átmérője nagyobb, mint a szikráé. Mivel itt a hőmérsékleti sugárzás is szerepet játszik, ezért a kisülés színe sárgásabb vagy vörösebb.

A koronakisülés olyan kis görbületi sugarú elektródokon alakul ki, ahol az elektród közelében a térerősség lényegesen nagyobb, mint a távolabbi térrészekben. Elektrosztatikus feltöltődés esetén a koronakisülés ritkán éri el a streamer kialakulásához szükséges feltételeket. Ha azonban a táplálás folyamatos, akkor általában a streamer feltételei létrejönnek. Kis görbületi sugarú csúcelektrodok esetében a koronakisülés lefolyása erősen függ az elektród polaritásától. Pozitív töltésű elektród esetében az elektronlavinák a csúcs felé indulnak el. Mivel az elektródhoz érkező elektronok kilépnek az elektródra, annak közelében pozitív tértöltés alakul ki, ami lecsökkenti a térerősséget ebben a térrészben és megszünteti az elektronlavinák kialakulásához szükséges feltételeket. Kis idő elteltével a pozitív tértöltés széteszik és a folyamat kezdődhet előlről. Ebben az esetben a kisülés tehát impulzusszerű jelenség. Negatív töltésű elektród esetében az elektronlavinák a csúcstól távolodnak, pozitív tértöltést hagyva maguk után. Amikor az elektronlavinák az elektródtól távolabb lévő kisebb térerősségű térrészre jutnak, maguk előtt kissé megnövelve a térerősséget még akkor is lehetővé teszik az ütközési ionozást, amikor az eredeti térerősség már az ehhez szükséges érték alá csökken. Végül mégiscsak megszűnik az ütközési ionozás. Az elektronok a térerősség hatására tovább haladnak, sebességük azonban egyre csökken. Ha a gázban elektronegatív molekulák vannak jelen, akkor lehetőségük nyílik a lelassult elektronok befogására, aminek következtében negatív ionok keletkeznek. Ezek során a csúcshoz közel pozitív, a csúcstól távolabbi térrészben pedig negatív tértöltésű zóna alakul ki. A negatív csúcs és a pozitív tértöltésű zóna között növekszik a térerősség, ami újabb lavinák keletkezéséhez teremti meg a feltételeket. A két tértöltésű zóna között a térerősség erősen csökken, aminek következtében a lavinák fejlődése gyorsan megszakad. A továbbhaladó elektronok egyre növelik a negatív tértöltést. Eközben a pozitív ionok kilépnek a negatív elektródon, a pozitív tértöltés lassan csökken. A negatív tértöltés annyira lecsökkenti az elektród körüli térerősséget, hogy a lavinák keletkezése hosszabb időre leáll. A negatív korona is impulzusszerű folyamat tehát, de csak akkor, ha a gáz alkotóelemei között van negatív ion képzésére alkalmas anyag is [13].

A kúszókisülés a felületi kisülések egy olyan típusa, ami akkor jöhet létre, amikor a két elektródnak a szigetelőanyaggal érintkező felülete jelentősen eltér egymástól. Ilyenkor a kisebb felületű elektród széléről induló, a szigetelőanyag felületén haladó kisülés árama a szigetelőanyagon mint kondenzátoron keresztül záródhat. A kapacitív áram következtében az áram hamarabb éri el a leader kisüléshez szükséges értéket. A kúszókisülés a felületen nagy távolságokra hatolhat, mert a kisülési csatorna végén a térerősség az elektród szélén lévő megközelíti.

Felületi vagy tértöltés esetén a kisülés egyik vége mindig szigetelőanyagban végződik. Ahhoz, hogy a tökéletes (vagy azt megközelítő) semlegesítődés megtörténjék, a kisülésnek el kell jutnia a felületen vagy a térben elhelyezkedő töltés minden részére. A felületi töltések esetében a kisülési kép függ a töltések polaritásától. A negatív felületi töltés kisülési csatornái nem találkoznak, vagy keresztezik egymást, mert a kisülés mindenütt az elektród felé halad, és a már kisült felületrészről nem indul újabb lavina. A csatornák szélesebbek, mint a pozitív felületi töltés esetében. A pozitív felületi kisülés esetében a csatornák találkozhatnak vagy keresztezhetik egymást. A tértöltés semlegesítésére olyan kisülésnek kell indulnia, mely az egész tértöltéses teret átszövi. A kisülés csatornái egy fa lombjának ágaihoz hasonlóan nyúlnak a tértöltéses tér minden részébe. Jellegzetes példa a villám, ahol az áramerősség  $10^4 - 10^5$  A nagyságrendű.

Villamos szilárdságnak a szigetelőanyagok azon tulajdonságát tekintjük, hogy a villamos erőtérből származó igénybevételnek egy bizonyos határig ellenállnak úgy, hogy a szigetelőképességük gyakorlatilag nem változik. Ha az igénybevétel meghaladja ezt a határt, akkor a szigetelőképesség hirtelen jelentősen lecsökken és az anyag megszűnik szigetelőnek lenni. Mivel a szigetelőképesség letörésére többnyire a szigetelőanyagban lévő villamos térerősség a jellemző, ezért a szigetelőképesség megszűnésekor fennálló térerősséget tekintjük villamos szilárdságnak. Ez nem tekinthető anyagállandónak, sok esetben a méretektől és a geometriai viszonyoktól is függ. Az elektrosztatikus kisülések ritkán hoznak létre olyan nagy térerősséget, mely a folyékony vagy szilárd szigetelőanyagok villamos szilárdságát meghaladja. Townsend kutatásai lehetővé tették homogén erőtérben kis elektródtávolság esetén az átütőfeszültség kiszámítását is. A levegőre vonatkozó összefüggést a Paschen-görbe ábrázolja. Az átütőfeszültség az elektródtávolság és a relatív sűrűség szorzatától függ, az átütőfeszültség lineárisan változik ezek függvényében (a  $10^{-5}$  m

elektródtávolság tartomány felett, atmoszferikus levegőben). A Paschen-görbe kis elektródtávolság vagy kis nyomás esetén érvényes. Atmoszferikus levegőben és 20 Celsius fokon az átütőfeszültség minimuma  $10^{-5}$ -m-es elektródtávolság körül van. Ennél kisebb elektródtávolság esetén is növekszik az átütőfeszültség, de fémelektrodok esetén ennek kicsi a jelentősége. Nagyobb elektródtávolság esetén levegőben az átütési térerősség az elektródtávolság növekedésével csökken. Az elektrosztatikus kisülések kisebb elektródtávolságon következnek be, és itt jelentős eltérés lehet a levegő villamos szilárdsága között. Erősen inhomogén erőterben a kis görbületes sugarú elektrodok környezetében a térerősség csak olyan kis térrészen haladja meg az ütközési ionozáshoz szükséges értéket, hogy még az elektronlavinák sem tudnak kialakulni. Ilyenkor nagyobb térerősség kell a kisülés megindulásához, ami a villamos szilárdság növekedését jelenti. A nyomás növekedésével növekszik, a hőmérséklet növekedésével pedig csökken a levegő villamos szilárdsága.

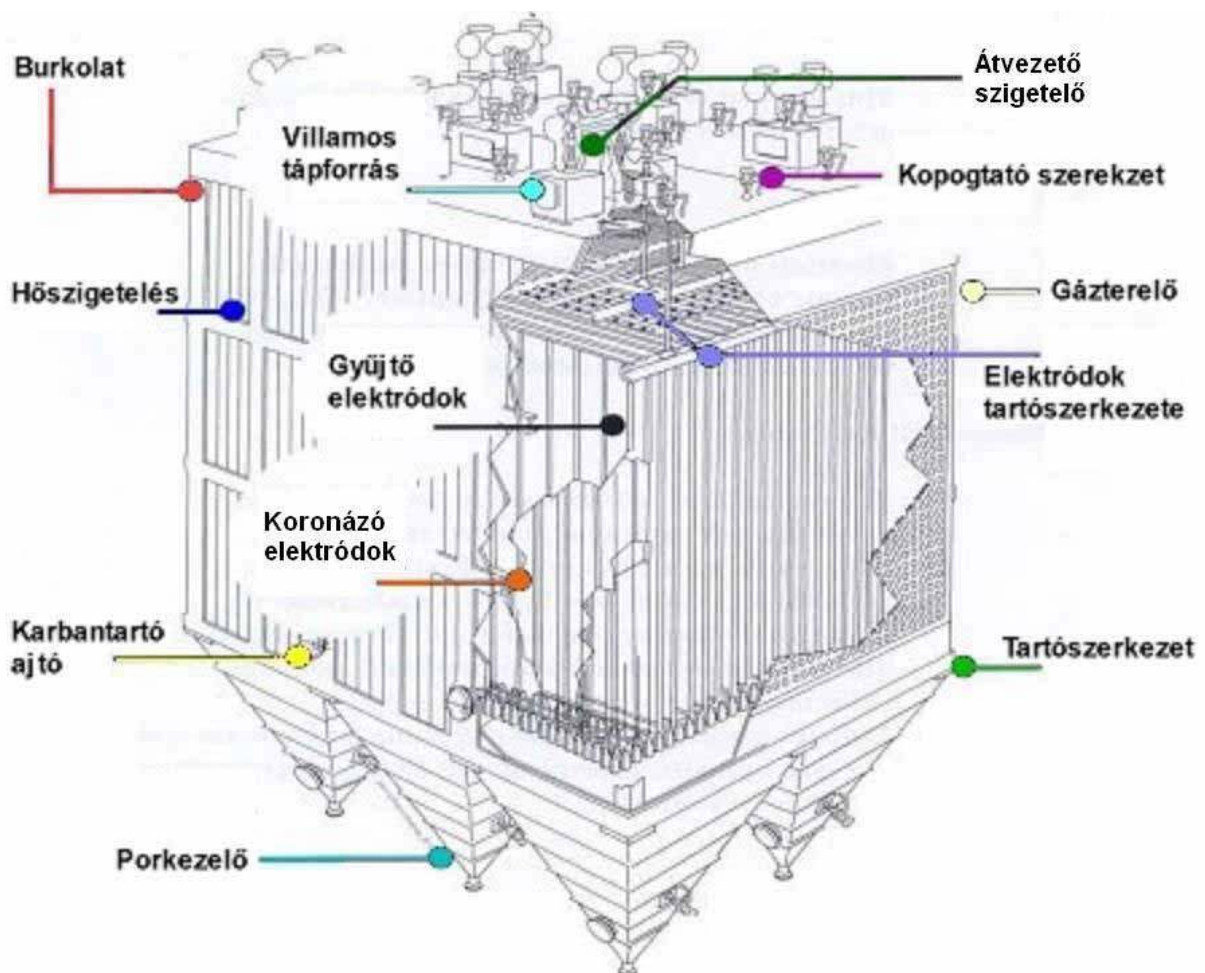
A feltöltött fémelektrod kisülési energiája a feltöltött kondenzátor analógiája alapján az adott elrendezésnek megfelelő helyettesítő áramkör felhasználásával számítható. Az adott elrendezésben felhalmozott összes energia nem minden esetben jellemzi a kisülési csatornát, mert különböző hosszúságon lehet elosztva. Ha a kisülési csatorna fajlagos energiasűrűsége nagy, akkor a hőmérséklete is nagyobb lesz. Rövidebb csatornában, feltéve hogy az összenergia ugyanakkora, az energiasűrűség nagyobb, a kisugárzott elektromágneses energia kisebb. Különböző kisülési csatornák energiaviszonyait csak úgy lehet összehasonlítani, ha az elektrodok elhelyezkedése és az áramkör mindegyik esetben azonos. A szigetelőfelületről induló kisülések energiája jelentősen különbözik a felületen lévő összes töltés energiájától, hiszen egy kisülés alkalmával csak a felület egy részén lévő töltések egyenlítődnek ki. Ebben az esetben a kisülés által érintett felület, valamint a kiegyenlítő töltés meghatározása a cél. A kisülési energia szempontjából két szélső esetet lehet megkülönböztetni. Az egyik esetben a szigetelőanyag vezetőképessége olyan kicsi, hogy a földelt test közeledése közben a felületi töltéeloszlás állandónak tekinthető. A másik esetben a szigetelőanyag vezetőképessége viszonylag nagy, ezért a földelt test közeledése közben folyamatosan változik a töltéeloszlás úgy, hogy a térerősségnek nem lesz felület irányú összetevője. A két esetben említett vezetőképesség megítélése természetesen nem független a földelt test közeledésének sebességétől. Ha a jelenséget egy véges átmérőjű feltöltött szigetelő körlemez és egy földelt fémgömb között vizsgáljuk, akkor a kisülés a gömbnek a síkhoz közelebb eső oldaláról indul.

Ha a kisülés a gömb sugarával összemérhető távolságban indul meg, akkor a felületet is érintő szikra keletkezik. A szikra talppontján megjelenő kvázi földpotenciál hatására nagy felületi térerősség keletkezik, és a talppont felé irányuló felületi kisülés indul meg. Ez a talppont adott környezetében eltünteti az eredeti felületi töltéseket, és a helyükre ellentétes polaritású töltéseket terít szét, ezzel növelve a kisülésben résztvevő töltés mennyiségét. A kisülés energiáját az így adódó töltésmennyiség és a kisülési csatorna két végpontja között az átütést megelőző pillanatban fennálló feszültség felhasználásával lehet kiszámítani [17]. Abban az esetben, ha földelt fémgömbön kívül más fémtárgy nincs a szigetelőanyag közelében, akkor a szigetelőfelületről kiinduló kisülés viszonylag kis felület töltését semlegesíti. A kisülési energia lényegesen nagyobb lehet akkor, ha a szigetelőanyag alatt nagy kiterjedésű földelt fémlemez van. Ebben az esetben hosszú felületi kisülések alakulnak ki és a felület nagy részéről sülnek ki a töltések. Ebben az esetben az energia szempontjából annak a kondenzátornak a kapacitása a mérvadó, melyet a feltöltött felület alkot a földelt fémlemezzel. Mivel ez a kapacitás igen nagy lehet (a nagy felület és a kis elektródköz miatt), ezért a kisülési energia is jelentős lehet.

#### **4.1.3. Az elektrosztatikus tűz és robbanásveszély**

Az elektrosztatikus eredetű tűz vagy robbanás keletkezésének alapfeltételei a gyúlékony vagy robbanó képes közeg, illetve a gyújtóképes elektrosztatikus kisülés. A gyulladási folyamat során szükség van oxigénre és arra, hogy az anyag elérje a gyulladási hőmérsékletet. Folyékony és szilárd halmazállapotú anyagok esetében általában a hővezetés és a hőkapacitás túl nagy ahhoz, hogy egy elektrosztatikus szikra a gyulladási hőmérsékletig hevítse az anyagot. Az elektrosztatikus kisülés gyújtóhatásának ezért csak gázok, gőzök és lebegő folyadék vagy porszemcsék esetén van jelentősége. Gyulladásról akkor beszélünk, ha az elektrosztatikus kisülés környezetében az anyag eléri a gyulladási hőmérsékletét, és az égés folyamán keletkező hő mindig elég ahhoz, hogy az égés továbbterjedjen. A folyamat ekkor önfenntartó, és független már a folyamatot elindító elektrosztatikus kisüléstől. Az elektrosztatikus kisülések által okozott tűz- és robbanásveszély szempontjából a szikragyújtás a legfontosabb. Ezt a minimális gyulladási energiával jellemezzük és szikraérzékenységnek nevezzük.

A gyulladási energia elsősorban az éghető anyag koncentrációjának a függvénye. Mindegyik anyaghoz tartozik egy olyan koncentráció, mely esetén a minimális gyulladási energiának minimuma van. A minimális gyulladási energiához tartozó koncentráció és magának a minimumnak az értéke számos tényezőtől függ. Ilyenek lehetnek a közeg hőmérséklete, nyomása, páratartalma. A gyulladási energia attól is függ, hogy a hő miként jut kapcsolatba az anyaggal, valamint mekkora a hőközlés időtartama. Sok más tényező mellett az is megállapítható, hogy a közeg gyulladásának nincs éles határa, hanem a hőforrás energiájának növelésével folytonosan nő a gyújtás valószínűsége. Általában az 50%-os valószínűséghez tartozó energiát veszik alapul [8].



1. ábra, Egy porleválasztó elvi felépítése

#### 4.1.4. A villamos porleválasztók

A villamos porleválasztók feladata abban áll, hogy egy ipari folyamat eredményeképpen termelődő gázból bizonyos szilárd (por, füst) vagy folyékony (permet) alkotóelemeket elektrosztatikus erők segítségével leválasszon, és azt biztonságos helyen összegyűjtse.

##### 4.1.4.1. A villamos porleválasztók elvi felépítése

Az 1. ábrán látható egy villamos porleválasztó elvi felépítése és főbb alkotóelemei.

A koronázó elektródok töltéseket emittálnak a gáztérbe, melyek feltöltik az ott lévő részecskéket. A koronázó elektród és a földelt gyűjtőelektród között kialakuló, illetve a feltöltött részecskék által létrehozott tértöltés és a gyűjtőelektród között kialakuló térerősség a gyűjtőelektródok felé hajtja a feltöltött részecskéket. Leggyakrabban a következő fajta koronázó elektródokat alkalmazzák: egyenes, kör keresztmetszetű huzal; sodrott huzal pár; tüskés huzal; rögzített oszlopok; rögzített keretek; rögzített tüskés csövek; spirális huzal. A nagyfeszültségű koronázó elektródokat általában fölülről rögzítik egy kerettel, melyen átvezető szigetelővel vezetik át az elektródot. Egyes esetekben a huzal folyamatos feszítését úgy oldják meg, hogy súlyt akasztanak a huzal alsó végére.

A villamos tápforrás egyrészt a gázteret látja el villamos töltésekkel, másrészt ez szolgáltatja a megfelelő feszültséget a töltött részecskék leválasztását segítő térerősség létrehozásához. Mindezt úgy kell megvalósítani, hogy átütés ne alakulhasson ki az elektródok között [13]. A porleválasztók villamos tápforrása alapvetően négy részből áll:

- automatikus feszültség szabályzó
- feszültségnövelő transzformátor
- nagyfeszültségű egyenirányító
- érzékelő

Az automatikus feszültség szabályzó szabályozza a transzformátor-egyenirányító bemeneti feszültségét a porleválasztóban és az egyenirányítóban lévő érzékelőknek megfelelően. Egy ideális feszültség szabályzó úgy működik, hogy minden időpillanatban a lehető legnagyobb feszültséget szolgáltatja az átütés elkerülése mellett. Ezt a valóságban nehéz megvalósítani, mert sok tényezőtől függ ennek a feszültségnek a nagysága valamint időben és térben

változik. Ezért azt a módszert alkalmazzák, hogy a szabályzó folyamatosan növeli a feszültséget mindaddig, amíg egy átütés be nem következik, majd csökkenti a feszültséget, és kezdődik a folyamat előlről.

A felfogó elektródok arra szolgálnak, hogy a feltöltött részecskéket leválasszák, és megtartsák mindaddig, amíg biztonságos módon el nem távolítják onnan a portartályba. Emellett a felfogó elektródok részei a porleválasztó villamos hálózatának. Ennek a két feladatnak a tükrében alakítják ki a felfogó elektródok alakját (p. síma felület a nagy feszültség alkalmazhatósága érdekében).

#### 4.1.4.2. A villamos porleválasztók működésének fizikai háttere

A villamos porleválasztók működését alapvetően a következő részfolyamatokra lehet bontani:

- A részecskék (villamos) feltöltése – ionizáció
- A töltött részecskéknek a gyűjtőelektródokhoz történő szállítása
- A töltött részecskéknek a gyűjtőelektródra történő megkötése
- A töltött részecskék semlegesítése a gyűjtőelektródon
- A részecskék eltávolítása a gyűjtőelektródról és összegyűjtése egy tartályban
- A részecskék elszállítása egy megfelelő gyűjtőhelyre

Ha növeljük a nagyfeszültségű elektródokra kapcsolt  $U$  feszültséget, akkor egyszer elérkezünk ahhoz az  $U_k$  feszültséghez, melynél megkezdődik a koronakisülés kialakulása a nagyfeszültségű elektródokon. A koronakisülés következtében az elektród környezetében lévő térben a gázmolekulák ionizálódnak, és az elektród töltésével megegyező töltésű molekulák az elektródok közötti térben a villamos térerősség hatására a felfogó elektród felé mozdulnak el. Ha a feszültséget tovább növeljük az  $U_k$  feszültség fölé, akkor a koronaáram a következő nem lineáris egyenlet szerint változik:

$$(1) \quad I = AU(U - U_k),$$

ahol  $A$  egy állandó érték, mely az elektród-elrendezéstől, a nyomástól, a hőmérséklettől és a gáz összetételétől függ. Ha az  $U$  feszültség elér egy  $U_a$  értéket, a koronakisülés átütéssé alakul és ez mindaddig fennáll, amíg ki nem kapcsoljuk a feszültséget. Így a porleválasztó működési tartománya az  $U_k$  és az  $U_a$  feszültséghatárok közé korlátozódik. Ez a tartomány általában sokkal szélesebb negatív korona esetében, mint pozitív koronánál. Emellett azonban a pozitív



koronakisülés sokkal kevesebb ózont termel, azért levegőtisztítási célokra előnyösebb az alkalmazása.

A részecskék feltöltésében, azaz a töltéseknek a (elektronok és ionok) részecskék felületére történő szállításában alapvetően két hatás vesz részt. Az egyik a villamos térerősség hatása, a másik pedig a hődiffúzió hatása. Ez a két folyamat mindig együtt jelentkezik és együtt hoz létre egy bizonyos töltésmennyiséget a részecskék felületén.

A villamos térerősség által létrehozott töltésmennyiség nagyobb méretű ( $d > 2 \mu\text{m}$ ) részecskék esetén válik dominánssá, nagyságát a Pauthenier egyenlettel a következőképpen lehet meghatározni:

$$(2) \quad q_t = \frac{q_u(t/\tau_t)}{1+(t/\tau_t)}, \text{ ahol}$$

$$(3) \quad q_u = \frac{12\pi\varepsilon_0\varepsilon_r a^2 E_t}{1+(t/\tau_t)} \text{ és}$$

$$(4) \quad \tau_t = \frac{4\varepsilon_0}{\mu_i \rho_i} = \frac{4\varepsilon_0 E_t}{J_i} \text{ (a töltődés időállandója).}$$

A fenti egyenletekben  $t$  [sec] jelöli az időt,  $\varepsilon_0$  a vákuumbéli permittivitást ( $8,85 \cdot 10^{12}$  [F/m]),  $\varepsilon_r$  a relatív permittivitást,  $a$  [m] a részecske átmérőjét,  $\mu_i$  [ $\text{m}^2/\text{Vs}$ ] az ionok mozgékonyágát,  $\rho_i$  [ $\text{C}/\text{m}^3$ ] az ionok töltéssűrűségét,  $E_t$  [V/m] a villamos térerősséget és  $J_i$  [ $\text{A}/\text{m}^2$ ] az ionáram sűrűségét jelenti. Legtöbb esetben azt feltételezhetjük, hogy az effektív töltési idő megegyezik a térerősségből származó töltési időállandó háromszorosával, azaz

$$(5) \quad T_t = 3 \tau_t$$

A hődiffúzió által létrehozott töltésmennyiség kisebb méretű ( $d < 2 \mu\text{m}$ ) részecskék esetén válik dominánssá, a  $t$  időpontbeli nagyságát a White által 1951-ben felállított egyenlettel lehet meghatározni:

$$(6) \quad q_d = q^* \ln(1+(t/\tau_d)), \text{ ahol}$$

$$(7) \quad q^* = \frac{4\pi\varepsilon_0 a k T}{e} \text{ és}$$

$$(8) \quad \tau_d = \frac{4\pi\varepsilon_0 kT}{aC_i n_i e^2} = \frac{4\pi\varepsilon_0 kT \mu_i E_t}{aC_i J_i e} \text{ (a töltődés időállandója).}$$

A fenti egyenletekben  $k$  jelenti a Boltzmann állandót ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]),  $e$  az elektron töltése ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  [C]),  $C_l$  [m/s] az ionok hőmozgásból adódó sebességének négyzetgyöke,  $n_i$  [ $1/m^3$ ] az ionsűrűség,  $m_i$  [kg] az ionok tömege és  $\mu_i$  [ $m^2/Vs$ ] az ionok mozgékonyasága. Az ilyen jellegű töltődési folyamat egy meglehetősen kis részecskenagyság-tartományban (ahol az a részecskeátmérő az ionok  $\lambda$  szabad úthosszával közel egyező vagy annál kisebb) felgyorsul. Ezért ha a részecskék hődiffúziós töltődését az idő függvényében vizsgáljuk, különböző görbéket kapunk az  $a/\lambda$  függvényében. Gyakorlati becslések esetén a telítettségi töltést és az effektív töltési időt a következőképpen számolhatjuk:

$$(9) \quad q_{dt} = 6,2 q^* \text{ és}$$

$$(10) \quad T_d = 500 \tau_d.$$

Az (5) és a (10) egyenletek alapján a töltési idő általában az 1 sec nagyságrendjébe esik, vagy annál kisebb. Az az idő, ami alatt egy részecske felgyorsul egy állandó sebességre, 1 msec nagyságrendű. A részecskék elméleti vándorlási sebességét a következőképpen lehet megadni:

$$(11) \quad W_e = \frac{qE_l C_m}{6\pi\eta} \text{ [m/s], ahol}$$

$$(12) \quad C_m = 1 + 2,514 \frac{\lambda}{2a} + 0,80 \frac{\lambda}{2a} e^{-0,55 \frac{\lambda}{2a}}$$

a Cunningham-féle korrekciós tényezőt jelenti. A fenti egyenletekben  $q$  az eredő telítettségi töltés ( $q_u + q_{dt}$ ),  $E_l$  a leválasztást végző villamos térerősség nagysága,  $\eta$  a gáz viszkozitása és  $\lambda$  pedig a részecskék közepes szabad úthossza. A részecskék elméleti sodródási sebességét felrajzolva a részecskék átmérőjének a függvényében egy V alakú görbét kapunk. A nagyobb részecskeátmérők ( $a > 1\mu m$ ) tartományában a villamos tér által okozott részecsketöltődés a domináns, és az elméleti sodródási sebesség lineárisan növekszik a részecskék átmérőjének növekedésével. Kisebb részecsketartományokban ( $a < 0,1\mu m$ ) viszont a hődiffúziós töltési folyamat a jelentősebb,  $W_e$  az átmérő csökkenésével növekszik. Gyakorlati alkalmazásoknál

óvatosnak kell lenni a fenti egyenletek alkalmazásával, mert a turbulens áramlási viszonyok jelentősen befolyásolhatják a kialakuló leválasztási sebességeket.

A turbulens áramlást okozhatják egyrészt az áramlásban jelentkező instabilitások, valamint a koronakisülések miatt jelentkező villamos szél. Ennek következtében a töltött részecskék véletlenszerű pályán haladnak a felfogó elektródok felé és a töltött részecskék koncentrációja többé-kevésbé kiegyenlítődik az elektródok közötti térben. Így csak azokat a részecskéket képes a porleválasztó leválasztani, melyek a felfogó elektródhoz közeli rétegbe eljutnak. Ezekből a feltételezésekből kiindulva határozta meg Deutsch a villamos porleválasztók leválasztási hatásfokát megadó egyenletét:

$$(13) \quad \eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} = 1 - e^{-W_e f}$$

A fenti egyenletben  $W_e$  [m/s] az effektív sodródási sebesség,  $m_1$  és  $m_2$  [g/Nm<sup>3</sup>] a porleválasztó bemeneténél és kimeneténél mért átlagos portömeg,  $f$  [s/m] a fajlagos gyűjtőfelület, amit a következőképpen lehet definiálni:

$$(14) \quad f = \frac{S_c}{Q_g}$$

$S_c$  [m<sup>2</sup>] jelöli a teljes gyűjtőfelületet,  $Q_g$  [m<sup>3</sup>/s] pedig az összes portömegterhelést.  $W_e$  értékét valójában csak a hatásfokra vonatkozó mérési eredményekből lehet meghatározni a (13)-as egyenlet felhasználásával. A Deutsch egyenletet több alkalommal is módosították, hogy az általa szolgáltatott eredmények jobban megfeleljenek a mérési eredményeknek. Matts és Ohnfeld (1964) a következőt javasolja:

$$(15) \quad \eta = 1 - e^{(-W_e f)^k}, \text{ ahol}$$

$k$  a leválasztandó por tulajdonságaitól függő faktor [23][35].

#### 4.1.4.3. A leválasztási hatásfokot csökkentő jelenségek

##### A részecskék átmérője

A villamos porleválasztók hatásfokát számos tényező csökkentheti. Ezek közül elsődleges fontosságú a részecskék átmérőjének a hatása. Már korábban is említettük, hogy az elméleti sodródási sebességnek minimuma van a 0,1 és 1  $\mu\text{m}$  közötti tartományban. Ez azt jelenti, hogy az ilyen méretű részecskék nagy hányada csak keresztülhalad a porleválasztón, és távozik a légtérbe. A néhány 10  $\mu\text{m}$ -es nagyságot elérő részecskéket a porleválasztó már könnyen leválasztja, de ezek a felfogó elektródok tisztításakor könnyen visszajutnak az elektródok közötti térbe.

##### A koronakisülés intenzitását csökkentő folyamatok

A másik nagyon jelentős tényező a koronakisülés intenzitását csökkentő folyamatok. A villamos porleválasztóknak az első cellájában, ahol a porterhelés ( $m$  [ $\text{g}/\text{Nm}^3$ ]) a legnagyobb, mindig a legkisebb koronaáram mérhető. A következő cellákban a porterhelés csökkenésével a koronaáram folyamatosan növekszik. Ez a tendencia még szembetűnőbb akkor, ha az elektródok közötti távolság ( $l_e$  [ $\text{m}$ ]) viszonylag nagy. Ezt a folyamatot alapvetően az elektródok közötti térben lévő tértöltés ( $\rho$  [ $\text{Q}/\text{m}^3$ ]), az elektródok közötti tér nagysága és a koronaáram ( $I$  [ $\text{A}$ ]) határozza meg. Minél nagyobb a tértöltés, annál kisebb a koronaáram, ami szélsőértékben 0 is lehet. Ez a folyamat jelentősen csökkentheti a porleválasztó hatásfokát. Az összes tértöltés végeredményben arányos a porszemcsék összfelületével, amit megbecsülhetünk a porszemcse-koncentrációból ( $n_p$  [ $1/\text{m}^3$ ]) és a portömeg-terhelésből ( $m$ ). Finom szemcséjű részecskék esetében, ha  $n_p$  vagy  $m$  nagy, ez az érték igen nagy lehet. Emellett a tértöltés növekedésének következtében a felfogó elektródok közelében megnövekszik a térerősség, ami szintén a hatásfokot csökkentő kisülésekhez vezethet.

##### Az ellen-koronakisülés

A villamos porleválasztók hatásfokát jelentősen csökkentheti az ún. ellen-koronakisülés. A gyűjtőelektródok felületén összegyűlő porréteg tulajdonképpen egy szigetelőréteget alkot. Ha ennek a rétegnek az ellenállása egy bizonyos küszöbérték (a gáztér ellenállásához viszonyítva) fölé növekszik, akkor elég nagy feszültség eshet ezen a szigetelőrétegen ahhoz,

hogy villamos letörések jöjjenek létre. Ezeken az átütési pontokon keresztül ellentétes polaritású ionok kerülnek a gáztérbe, és haladnak a koronázó elektródok felé.

A jelenség pontos lefolyása függ a koronázó elektród polaritásától. Negatív korona esetében ez a jelenség az  $r_d = 5 \cdot 10^{10} - 10^{11} \text{ } \Omega\text{cm}$  ellenállásnál kezdődik. Ebben az esetben a gáztérben lévő télerősség elég nagy ( $> 5 \text{ kV/cm}$ ) ahhoz, hogy a letörési pontokból kiindulva pozitív streamer kisülések jöjjenek létre a koronázó elektród irányába. Ezek a streamer kisülések áthidalhatják az elektródok közötti teret is, ami lehetetlenné teszi a feszültség tartását és a stabil üzemet. A letörési pontok száma ebben az ellenállás-tartományban még limitált. Az ellen-koronakisülés nem csak a gáztérbe hatol be, hanem a felfogó elektródra rakódott porréteg felületén is terjedhet.

Egy magasabb ellenállás-tartományban ( $r_d = 5 \cdot 10^{11} - 10^{12} \text{ } \Omega\text{cm}$ ) a letörési pontok száma erőteljesen megnövekszik, a felfogó elektródok teljes felületén parázsfénykisülés figyelhető meg. A streamer kisülések ezzel együtt eltűnnek. Ez a típusú ellen-koronakisülés nagy mennyiségű pozitív iont juttat a gáztérbe, amelyek a koronázó elektród által emittált negatív ionokkal együtt egy kétszeresen ionizált tértöltést hoznak létre. A koronázó elektród környezetében egy pozitív ionokból álló burok jön létre, ami elősegíti az elektronok emisszióját az elektródból. Ezért, ha a parázsfénykisülés típusú ellenkorona elkezdődik, mindig nagy túláram figyelhető meg.

Az ellenkorona kisülés létrejöttének a feltételét a következő egyenletben foglalhatjuk össze (ez akkor alkalmazható, ha  $r_p < 10^{14} \text{ } \Omega\text{cm}$ ):

$$(16) \quad J_p \times r_d \geq E_{pl}, \text{ ahol}$$

$J_p \text{ [A/cm}^2\text{]}$  a porrétegben mérhető áramsűrűség, és  $E_{pl} \text{ [V/cm]}$  a porréteg villamos szilárdsága. Pautheiner-nek a biionizált tértöltésre vonatkozó egyenlete alapján megbecsülhetjük, hogy az ellenkorona kisülés milyen mértékben rontja a részecskék ionizálhatóságát.

$$(17) \quad \beta = \frac{q'_\infty}{q_\infty} = \delta \frac{1+\gamma}{1-\gamma}, \text{ ahol}$$

$$(18) \quad \delta = \frac{U'}{U} \text{ és } \gamma = \sqrt{\frac{i_+}{i_-}}.$$

A fenti egyenletekben  $q'_{\infty}$  és  $q_{\infty}$  [C] a töltést,  $U$  és  $U'$  [V] a koronafeszültséget jelenti, mely ellenkorona kisülés nélkül és amellet mérhető.  $i_+$  és  $i_-$  a pozitív illetve negatív ionáramot jelenti. Ezek alapján azt láthatjuk, hogy az ellenkorona miatti hatásfok-csökkenést tulajdonképpen két tényező befolyásolja: a  $\delta$ -val jelölt feszültségcsökkenés és az ellenkorona intenzitását jellemző  $\gamma$ .

### A porréteg eltávolítása a felfogó elektródokról

A porleválasztási folyamat utolsó fázisában a felfogó elektródokon összegyűlt porréteget eltávolítják az elektródokról. A száraz porleválasztókban ezt általában a felfogó elektródok mechanikai kopogtatásával végzik, a por szabadeséssel jut a tároló konténerekbe. Minden alkalommal, mikor a porréteget eltávolítják a felfogó elektródokról, a por egy része újra visszakerül a gáztérbe. Ennek mértékét több tényező is befolyásolja.

A pornak a gáztérbe történő visszakerülését alapvetően a porréteg stabilitása (kohéziója), valamint a kopogtatás következtében létrejövő gyorsulás felületre merőleges összetevőjének amplitúdója határozza meg. A porréteg stabilitása a por összetételétől és szemcsenagyságától, a gáz összetételétől és hőmérsékletétől, és a por fajlagos ellenállásától ( $r_p$ ) függ. A por kohézióját nemcsak a porszemcsék érintkezési pontjaiban ható Van der Waals kötések okozzák, hanem az ezekre az érintkezési pontokra rakódó vízmolekulák (kapillárkondenzáció). Ezért növekvő hőmérséklettel a por kohéziója csökken, megfelelő kémiai adalékokkal pedig, melyek elősegítik a víz lecsapódását (pl.  $\text{SO}_3$ ), növekszik. A por szemcsenagyságát vizsgálva azt lehet mondani, hogy inkább a durvább szemcseméretnél jelentkezik a gáztérbe való porvisszakerülés problémája. A villamos porleválasztókban a por kohézióját elektrosztatikus erők is befolyásolják. A lerakódott porrétegben ugyanis az ionáram miatt kialakul egy látszólagos térerősség ( $E_p = J_p \cdot r_p$ ), aminek következtében minden érintkezési pontban elektrosztatikus vonzóerő lép fel. Ez a jelenség inkább az  $r_p > 10^{10} \Omega\text{cm}$  tartományban jelentkezik. Minél nagyobb a  $r_p$  és  $J_p$ , annál nagyobb a por elektrosztatikus kohéziója.

A felfogó elektród felületre merőleges irányú rezgéseit leginkább a megfelelően merev elektród tervezésével, valamint a felülettel párhuzamos irányú (felülről vagy oldalról) kopogtatással tudjuk megakadályozni. A kopogtatás következtében kialakuló rezgés haladó

hullám formájában terjed a felfogó elektródon és annak széleiről többszörösen visszaverődik. Az elektród adott pontjának rezgését ezeknek a hullámoknak az eredőjéből lehet számítani.

Abban az esetben, ha  $r_p (< 10^4 \Omega\text{cm})$  és  $J_p$  nagyon alacsony, nemcsak az elektrosztatikus kohézió szűnik meg teljesen, hanem a felfogó elektródra érkező részecskék is azonnal áttöltődnek ellenkező polaritásúvá. Így a Coulomb-erő hatására újra visszajutnak a gáztérbe. Ez a jelenség a kisebb fajlagos ellenállás tartományban jelentkezik.

A már leválasztott por visszakerülhet a gáztérbe olyan módon is, hogy bizonyos helyeken túl nagy a gáz áramlási sebessége ( $> 1\text{-}2 \text{ m/s}$ ,  $> 100^\circ\text{C}$  mellett). Ezek a problémák általában a turbulens áramlási viszonyokra vezethetők vissza, melyek az átlagoshoz viszonyított lokális sebességnövekedést idézhetnek elő.

### **Rendellenes porlerakódás**

A koronázó elektródra is lerakódhat por abban az esetben, ha a koronázó elektródon vannak olyan szakaszok, ahol a koronakisülés létrejöttét valami (pl. a koronakisülés intenzitását csökkentő folyamatok, vagy a normálisnál alacsonyabb feszültségen való üzemeltetés) megakadályozza. Az elektród korona-mentes szakaszának környezetében lévő részecskéket a Coulomb-erő hiányában a sugárirányú erőhatás az elektród felületéhez vonzza. A porszemcsék lerakódásával az elektród lekerekítési sugara megnő, ami még tovább rontja a koronakisülés kialakulásának feltételeit. A koronamentes szakasz ezen kívül még hosszanti irányban is növekszik a porszemcsék lerakódásával. Szintén elősegíti a rendellenes porlerakódást, ha a koronázó elektródok kopogtatása nem megfelelő intenzitású.

Ez a nemkívánatos jelenség akkor is jelentkezhet, ha a leválasztandó por túlzottan finom szemcséjű, vagy tapadós anyag. Ha a por tartalmaz meszet ( $\text{CaO}$  vagy  $\text{Ca(OH)}_2$ ), és a gáz tartalmaz  $\text{CO}_2$ -t és  $\text{H}_2\text{O}$ -t, akkor kalcit kristályok növekedhetnek a lerakódott porszemcsék közötti hézagokban, ami erősen összeköti a porszemcséket. Így egy nagyon kemény réteg képződhet a lerakódott porrétegből, amit a kopogtatásos módszerrel szinte lehetetlen eltávolítani [23][35].

## 4.2. Léggöri elektrosztatika / Villámvédelem

### 4.2.1. A zivatarok kialakulása

A villám a zivatarok alkalmával a felhő és a föld, vagy két felhő között keletkező nagyfeszültségű villamos kisülés. Zivatarnak nevezik azt a léggöri jelenséget, amely villámok keletkezésével is jár. Zivatar idején többnyire eső vagy szél is lehet, de a villámok nélküli zápor vagy szélvihar (orkán) nem zivatar.

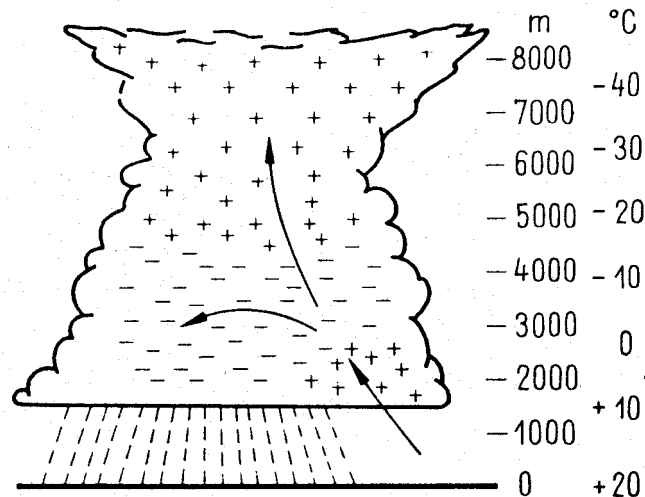
Zivatar esetén meleg, nedves légtömeg emelkedik gyorsan fölfelé, és közben lehül, ami párakicsapódást, felhőképződést és a villamos töltések szétválását idézi elő. Zivatar többféle módon képződhet, kialakulásuk módja szerint megkülönböztetünk hőzivartart, domborzati zivartart és vonulati vagy frontzivartart. Nálunk leggyakrabban vonulati vagy frontzivatar képződik, ha többnyire nyugat felől hidegfront tör be. A front egyetlen nap vagy néhány óra alatt áthalad Magyarországon, általános esőzést és zivatarokat létrehozva mindenütt, míg a hőzivatar elszórta jelenik meg, és közben másutt derült lehet az idő. A hazai hegyek a front hatását erősítik, ezért előfordul, hogy a gyengébb front a síkságon nem jár zivatarral, de a hegyvidéken igen.

A zivatarfelhő képződése ott kezdődik, ahol a felszálló levegő eléri a harmatpont hőmérsékletét, ezért a felhő alja egyenesnek látszik és minden felhőé ugyanabban a magasságban van. A felszálló levegő állandóan hűl, és 2000...4000 m magasságban még nyári időben is eléri a 0 °C szintjét. E fölött túlhűtött vízcseppek, majd jégzemcsék keletkeznek. A zivatarfelhők 8000...10 000 m magasán levő tetején apró jégkristályokból álló, ernyőszerűen szétterülő képződmény jelenik meg.

Villamos töltések keletkezése már a zivatarfelhőnek a fagypon alatti részén megkezdődik. A töltésképződésre sok elmélet létezik, és nem tudjuk pontosan, melyik folyamat játssza a legnagyobb szerepet, ezért példaként csak a legvalószínűbbeket említem. A Lénárd–Simpson-féle vízesélmélet szerint a légáram hatására szétporladó vízcseppek nagyobb maradványai pozitív, a finomabb permet cseppjei negatív töltésűek lesznek. Ennek következtében a 2. ábra szerint a nagyobb vízcseppek a zivatarfelhő alsó részén pozitív töltésű göcot hoznak létre, míg a negatív töltésű vízpermetet a szél a felhő magasabb illetve távolabbi részébe ragadja



magával. A vízcseppek megfagyása is töltésmegosztást okoz, mégpedig apró, pozitív töltésű jégzilánkok pattannak le a nagyobb és negatív töltésűvé váló jégzemcsékről. Ezek a szilánkok alkotják a felhő felső részén az 2. ábrán látható pozitív töltésgócot, a nagyobb jégzemcsék viszont a fagyponti zóna környékén a negatív töltéstömeget növelik. Így alakul ki az ábra szerinti töltéseloszlás a zivatarfelhőben.



2. ábra, A zivatarfelhő töltéseloszlása

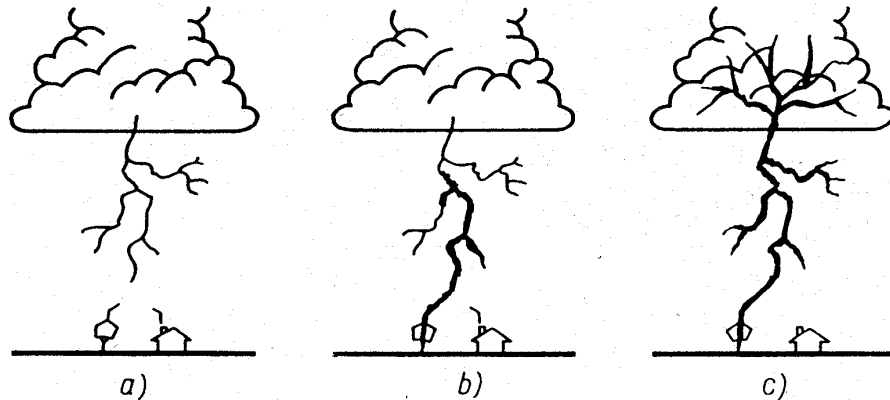
Bár a valóságos zivatarfelhő töltéseloszlása a légáramlások következtében elég változatos, a fagypont fölötti zónában helyezkedik el a zivatarfelhő töltéseinek nagyobb része. Az alsó pozitív góc ehhez képest kicsi, de erősen koncentrált. Egy frontzivatarban a 2. ábrán bemutatott felépítésű zivatarfelhők különböző kialakulási állapotban szorosan egymás mellett helyezkednek el. A fronttal vonuló zivatart ezek a zivatarcellák alkotják.

Bár hazánkban nincsenek nagy területi különbségek, kisebb területi eltérés mégis kimutatható a zivatarok gyakoriságában. A 21. ábra az évenként előforduló zivataros napok számát tünteti fel Magyarorszag területén, amiből látható, hogy nálunk 20-30 zivataros nap van évenként. Trópusi területen ez a százzal is meghaladja, a sarkok felé pedig egyre csökken. Zivataros napnak tekint a meteorológia minden olyan napot, amikor legalább egyszer mennydörgés hallható. Régebben kizárólag a zivataros napok számát használták a zivatartevékenység és a villámveszély jellemzésére. Újabban az évenként 1 km<sup>2</sup> területre lecsapó villámok számával fejezik ki a zivatar-tevékenységet, és ezt mint villámsűrűséget villám/(km<sup>2</sup>·év) egységekben adják meg. Az ábra egyúttal a villámsűrűség területi eloszlására is tájékoztatást nyújt.

#### 4.2.2. A villám keletkezése

A zivatarfelhőben levő feltöltött vízcseppek és jégszemcsék egymás erőterében mozognak, és időnként ellenkező töltésű góccok kerülnek egymás közelébe. Ilyenkor kisülések keletkeznek közöttük, és ez a kisülés egyes esetekben továbbhalad a távolabbi töltésgócok felé. Az így keletkező előkisüléssel kezdődik a villám kialakulása. Ha az előkisülés kilép a felhőből és a föld felé halad, láthatóvá és fényképezhetővé válik. A megfigyelések szerint a lefelé haladó előkisülés zezugos pályán közeledik a földhöz és közben többször elágazik. A földfelszín közelébe érve a földi tárgyaktól vagy esetleg magából a talajból, a 3. ábra szerint, ellenkisülések indulnak meg vele szemben. Amikor ezek közül az egyik találkozik az előkisüléssel, összefüggő kisülési csatorna alakul ki a felhő és a föld között. Ezen az ionozott csatornán alulról felfelé fényes kisülés fut végig, mégpedig az előkisülésnél sokkal nagyobb sebességgel, és az elágazásoknál az ágakat is felvillantva. Ez a villám főkisülése, ami az általában ismert jelenségeket, a fény- és hőhatást, a rombolásokat, a mennydörgést, valamint az élettani hatásokat előidézi.

Negatívnak nevezzük a villámcsapást, ha az előkisülés negatív töltéseket hozott a felhőből, és a főkisülésben pozitív töltés áramlik a földből a felhő felé. Amikor ez a fölfelé áramló töltés eléri a felhőt, szétágazik és semlegesíti az előkisülés kiindulási helyének környezetében levő ellentétes polaritású (negatív villám esetén negatív, pozitív villám esetén pozitív) töltésgócokat. Mivel ekkor a töltéseknek már végig kell futniuk a villámpálya teljes hosszát, nagyobb a villámáram útjának impedanciája (ellenállása), és ezért csökken az áramerősség is. A felhőben a kisülés a fa ágaihoz hasonlóan egyre távolabbi töltésgócokat ér el és így hosszan elhúzóódó áramhullám alakul ki.

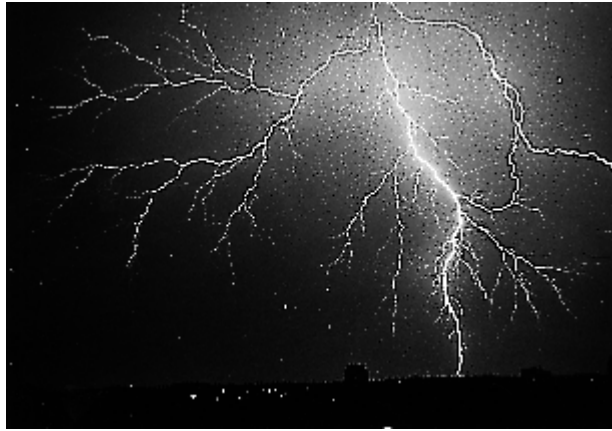


3. ábra, A villámcsatorna kialakulása

A villámcsapás sok esetben nem ér véget az első főkisüléssel, hanem megismétlődik. Ilyen többszörös villám keletkezik akkor, ha az első főkisülés elhalása után, a már szétoszlóban levő kisülési csatornán újabb előkisülés fut végig. Ez azonban nem szökellésekkel halad, hanem egy folyamatosan haladó, 50...100 m hosszú felvillanás (dart leader - gerelykisülés). Ez már nem hatol be a korábbi ágakba, hanem csak a felhőt a földdel összekötő csatornán fut végig, ismét ionokkal telítve azt. A földet elérve az előzőhöz hasonlóan ismét alulról fölfelé alakul ki a második főkisülés. Ez a folyamat többször ismétlődhet, és az egyes részvillámok között 0,01...0,1 s idő telik el. A felhőben levő negatív töltésgócból induló villámok esetén a részvillámok száma leggyakrabban 2...3, de észleltek már 40 részvillámot is. A pozitív villámok többnyire egyetlen részvillámból állnak, a többszörös pozitív villám nagyon ritka. A többszörös villámok időtartama a részkisülések közötti szünetekkel együtt a villámcsapás teljes időtartamát adja, ami általában néhány tizedmásodperc, de elérheti a 1 másodpercet is.

Nem minden villám alakul ki az előbb ismertetett folyamat szerint. A felhőből lefelé jövő előkisülés szökellései egyes esetekben lényegesen rövidebbek, és ekkor az átlagos haladási sebesség kisebb. Előfordulásának gyakorisága az összes villámok néhány százaléka. Magas tornyokon és hegytetőkön előfordul, hogy az előkisülés nem a felhőből indul meg, hanem egy torony csúcsából vagy egy hegytetőn álló tárgyból. Ezt az idézi elő, hogy a kiemelkedő ponton a felhőben levő töltések önmagukban is olyan nagy térerősséget hoznak létre, ami már elegendő a kisülés megindításához. Az ilyen előkisülésből fejlődő villámcsapást nemcsak futó filmre készített Boys-féle felvételen, hanem álló fényképen is meg lehet különböztetni a lefelé csapó villámtól. A villámpálya elágazásai ugyanis mindig a haladás irányába mutatnak, tehát pl. a 4. ábrán látható villám lefelé haladó előkisülésből fejlődött ki. A 5. ábra szerint viszont

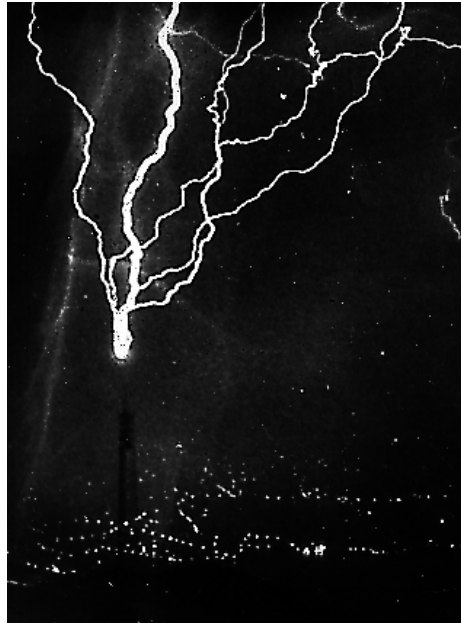
egy bokor ágaihoz hasonlóan fölfelé elágazó villám a Monte San Salvatore csúcsán álló 70 m magas acéltoronyból fölfelé haladó előkisüléssel kezdődött.



**4. ábra, Lefelé haladó villám**

A villám nemcsak a felhő és a föld között, hanem a felhőn belül, két töltésgóc között is kialakulhat. A mérsékelt égövben az összes villámnak 30..40 %-a csap a földre, tehát gyakoribbak a felhők közötti villámok. Északi területeken, pl. Skandináviában nagyobb a lecsapó villámok aránya.

A felhők közötti villám kialakulása ugyanolyan előkisüléssel kezdődik, mint a lecsapó villámoké, de a főkisülés áramerőssége lassabban növekszik, és csúcserőssége is kisebb lesz, mert a töltésgócokból nem tud olyan gyorsan a semlegesítő töltéstömeg a kialakult csatornába áramlani, mint a jól vezető földből. A felhőben keletkező villám hatására mindig töltésátrendeződés jön létre, aminek a hatására a szomszédos töltésgócok felé újabb előkisülés indulhat meg, és végül a villám több zivatarcellán keresztül láncszerűen nagy távolságot hidal át. Nagyon gyakran a felhőn belüli töltés-átrendeződés következtében nő meg a földön a térerősség, és indul meg az alulról fölfelé kialakuló előkisülés. Ha egy villám láncszerűen több töltésgócot süt ki, előfordul, hogy a villámáram polaritása az egyes részvillámokban átvált, tehát pozitív és negatív villámok követik egymást.



5. ábra, Felfelé haladó villám

#### 4.2.3. A villámcsapás fizikai tulajdonságai

A földre lecsapó villámokat pozitív vagy negatív villámnak nevezik, attól függően, hogy milyen polaritású töltésgócot sütnek ki a felhőben. A kétféle polaritású villám között a lényeges fizikai tulajdonságokban is nagy különbségek vannak, pl. a többszörös villámokkal kapcsolatban már láttuk, hogy a negatív villámokra a több egymást követő részvillám, a pozitívokra viszont egyetlen főkísülés jellemző.

A tornyokon és hasonló magas építményeken végzett megfigyelések azt mutatják, hogy az összes villámcsapás kb. 90%-a negatív villám, tehát a pozitív villámok ritkák. Vezetékeken ez az arány eltolódik, és kb. 80 % a negatív villámok aránya. Elméletileg kimutatható, hogy a tornyok erősebben vonzzák magukhoz a negatív villámokat, a pozitív villámcsapások viszont gyakrabban érnek magas torony közelében levő alacsonyabb tárgyat. A két polaritás megfigyelt arányát tehát a megfigyelési hely geometriai viszonyai már torzították. Erre a hatásra utal a tornyokon és a vezetéken tapasztalt polaritásarány eltérése is. A sík területre vonatkozó, torzítatlan polaritásarányt nem ismerjük, erre csak elméleti úton lehet következtetni azon az alapon, hogy milyen felvett torzítatlan aránnyal adódik a tornyokon és a vezetékeken megfigyelt torzított érték. A számítások azt mutatják, hogy sík területen az összes villámcsapás kb. 70 %-a lehet negatív és 30 %-a pozitív villám.

A villámcsapás egyik legjellemzőbb fizikai tulajdonsága az áram-hullám csúcserő a becsapási pontban, amit röviden villámáramnak neveznek. A villám többi adatával együtt ez sem adható meg egyetlen értékkel (pl. a középértékkel) vagy egy szórási tartománnyal, mert különböző gyakorisággal, egymástól több nagyságrenddel eltérő értékek is előfordulnak. Az 50% gyakorisággal előforduló mediánérték azt jelenti, hogy minden második villám árama ennél kisebb. Mivel a villám káros hatásai szempontjából a ritkán előforduló nagy villámáramok fontosak, ezért az 1. táblázat a mediánérték mellett megadja a 10%, 5% és 1% gyakorisággal előforduló értékeket is. Példaként a legutolsó azt jelenti, hogy minden századik villám árama a megadott értékeknél nagyobb. A táblázatból látható, hogy a pozitív villámok mediánértéke nagyobb, mint a negatív villámok első áramhullámáé. A kis valószínűséggel előforduló nagy villámáramoknál ez a különbség egyre nő. Az eddig mért legnagyobb (500 kA fölötti) áramerősségű villámcsapás ugyancsak pozitív volt. A negatív villámok későbbi részkisüléseinek a mediánértéke lényegesen kisebb az első áram-lökésénél.

A villámcsapás másik jellemzője a becsapási ponton kiegyenlítődő töltés. Az 1. táblázatban szereplő adatok közül a teljes villám töltése magában foglalja a többszörös villámok valamennyi részvillámának töltését, valamint az áramlökést esetleg követő kis áramerősségű, de hosszú ideig tartó utóáramokat is. Az első áramlökés töltése az utóáramok és a későbbi részvillámok töltését nem foglalja magába, csak a magasan kiugró impulzus töltését. A táblázat adataiból látható, hogy pozitív villámok esetén a kiegyenlítődő töltés minden tekintetben nagyobb, mint negatív villámok esetén.

Az áramhullámnak fontos jellemzője a kezdeti felfutó szakaszon, vagyis a hullám homlokán fellépő árammeredekség, amit  $\text{kA}/\mu\text{s}$  mértékegységben fejezünk ki. Ennek az 1. táblázatban megadott legnagyobb értéke csak nagyon rövid ideig tart, és nem elég arra, hogy bizonyos káros hatások kifejlődjenek. Ezért a csúcserő 10%-a és 90%-a közé eső, erősen emelkedő szakaszra jellemző átlagos értékek is megtalálhatók a táblázatban. Az adatokból látható, hogy a legnagyobb meredekségek a negatív villámok későbbi részvillámjai alkalmával keletkeznek, ezért az átlagértékek ezekre a részvillámokra vonatkoznak. A pozitív villámok meredeksége általában olyan kicsi, hogy káros hatásaival egyáltalán nem számolnak.

Az áramhullám csúcserőértékének eléréséig eltelt idő a hullám homlokideje. A 1. táblázat adatai szerint ez a pozitív villámok esetén a leghosszabb. Lényegesen rövidebb ideig tart viszont az ismételt negatív részvillámok gyors felfutása.

A jellemző érték	A villám polaritása és a kisülés, amire vonatkozik	50% medi- án	10%   5%   1% gyakorisággal nagyobb, mint		
			10%	5%	1%
A villámáram csúcserőértéke, kA	–első részvillám	33,3	72,3	90,0	135,9
	–ismételt részvillám	12,0	25,0	30,8	45,4
	+összes villám	35,0	166,0	258,0	590,0
Kiegyenlítődő töltés C	–áramlökéscsúcs	5,2	17,3	24,3	46,0
	–teljes villám	7,5	27,6	40,0	80,0
	+áramlökéscsúcs	16,0	82,7	131,6	315,9
	+teljes villám	80,0	252,5	350,0	644,7
Merekség kA/ $\mu$ s maximum átlagos érték	–első részvillám	13,2	26,2	31,8	45,9
	–ismételt részvillám	40,0	118,4	161,0	286,7
	+összes villám	2,4	18,1	30,4	93,6
Az áramhullám homlokideje $\mu$ s	–első részvillám	5,5	13,5	17,4	28,0
	–ismételt részvillám	1,1	3,5	4,9	9,2
	+összes villám	22,0	122,9	200,2	499,8
Fajlagos energia MJ/ $\Omega$	–teljes villám	0,055	0,32	0,53	1,30
	+teljes villám	0,650	7,90	16,00	60,00

1. táblázat, A villámáram jellemző értékeinek előfordulási gyakorisága

A villámcsapás káros hatásai közül több a fajlagos energiától függ. Ez az az energia amely  $1\Omega$  ellenálláson szabadul föl, ha a villám-áram rajta folyik át. A 1. táblázat MJ/ $\Omega$  (megajoule/ohm) mértékegységben adja meg a különböző gyakorisággal várható értékeket. Ebből látható, hogy a pozitív villámok fajlagos energiája lényegesen nagyobb, mint a negatívoké. Ha a villámáramot egy 3 kW teljesítményű (220 V-os) villamos fűtőt testen lehetne átvezetni, az 50% gyakorisággal előforduló értéket véve figyelembe, a felszabaduló energia kb. egy óráig lenne elegendő a táplálására. A villámcsapás folyamán a föld és a felhő között felszabaduló energia sem nagy, hiszen kb. 10 liter olaj fűtőértékével egyenlő. A technikai nehézségektől eltekintve ezért sem érdemes az energetikai hasznosításával foglalkozni.

#### 4.2.4. A villámcsapásból eredő kockázat meghatározásának klasszikus módszere

A klasszikus kockázatelemzés célja az, hogy támpontot adjon annak eldöntésére, hogy az adott objektum esetében kell-e villámvédelmi rendszert kiépíteni vagy nem. Ha a számítással meghatározott kockázat tényező meghalad egy bizonyos küszöbértéket, akkor kell villámvédelmet kiépíteni, ha ennél kisebb, nem szükséges. A küszöbértéket a mindennapi élethez kapcsolódó kockázati tényezők  $10^{-3}$  értékének figyelembevételével általában  $10^{-5}$ -re választják (pl. a BS6651 szerint is [11]). A kockázatot a következőképpen lehet kiszámítani:

$$(19) \quad K = P \cdot F, \text{ ahol}$$

$K$  [1/év] a kockázat mértéke,  $P$  [1/év] az objektumba történő villámcsapás éves gyakorisága,  $F$  pedig a kockázatot figyelembe vevő súlyozó faktorok eredőjeként adódó tényező. A villámcsapási gyakoriságot az épület tulajdonságai és elhelyezkedésének meteorológiai tulajdonsága alapján lehet meghatározni a következőképpen:

$$(20) \quad P = N_g \cdot A_{eq}, \text{ ahol}$$

$N_g$  [1/év/km<sup>2</sup>] az adott területre jellemző villámcsapási gyakoriságot,  $A_{eq}$  [km<sup>2</sup>] pedig azt az ún. egyenértékű területet jelenti, amit azonos gyakorisággal ér villámcsapás, mint magát az épületet.  $N_g$  értékét villámmérési adatok alapján készített statisztikák segítségével lehet becsülni. Az egyenértékű területet a gyakorlatban közelítéssel módszerekkel szokták meghatározni. Egy ilyen összefüggés segítségével a következő módon lehet számítani egy  $[a, b, h]$  (hosszúság, szélesség, magasság) dimenziójú, lapos tetejű épület egyenértékű területét:

$$(21) \quad A_{eq} = ab + 2(a + b)h + h^2 \pi.$$

Az  $F$  tényezőt különböző, a kockázat mértékét jellemző faktorok szorzataként szokták meghatározni. Ezek a faktorok a vizsgált épület különböző szempontok (pl. az épület rendeltetése, anyaga, tartalma, elhelyezkedése, környezete) alapján történő besorolását jelentik. A besorolás alapján minden szemponthoz hozzárendelődik egy kockázati faktor (általában 0,2 és 2 közötti értékű). Az  $F$  tényező ezen kockázati faktorok szorzataként adódik. Bonyolultabb geometriájú objektumok esetén a módszer alkalmazhatósága korlátozott.



## 5. Ipari elektrosztatikus rendszerek hibadiagnosztikai kezelése

### 5.1. A hibadiagnosztika meghatározása

Általában véve a rendszerek hibadiagnosztikai vizsgálata és egyben a hibadiagnosztika célja a következőképpen határozható meg:

*Ha adott a rendszerre vonatkozó megfigyeléseknek egy  $M$  halmaza, akkor a diagnosztikai rendszer feladata egy olyan  $D$  diagnosztikai állítás meghatározása, mely a megfigyeléseket igazoló hibákra vonatkozó információt tartalmaz.*

Itt azt feltételezzük, hogy a diagnosztikai rendszer passzív, tehát semmilyen módon nem befolyásolja a vizsgált rendszer működését. Továbbá azt is feltételezzük, hogy a diagnosztikai rendszer statikus rendszer. Ez azt jelenti, hogy azonos  $M$  megfigyelési halmazok esetén azonos  $D$  diagnosztikai állításokat kapunk. Ezen meghatározás alapján azt mondhatjuk, hogy a diagnosztikai rendszerünk nem más, mint egy olyan  $d(m)$  (szabály)függvény, mely a megfigyelések halmazát képezi le a diagnosztikai állítások halmazára:

$$(22) \quad d(m) : M \rightarrow D, \text{ ahol}$$

$m$  a rendszer pillanatnyi állapotától függő változó [27]. Ezen túlmenően a diagnosztika során arra is keresem a választ, hogy hibás rendszer esetén a hibák a rendszer mely alkotóelemeit érintik, és mit kell tenni ezeknek a hibáknak az elhárítására. A fogalmak tisztázása érdekében itt kell megjegyezni, hogy míg a *diagnosztika* esetében a rendszer hibái és azok elhárítása van a középpontban, addig a *szabályozásnál* egy „hibátlan” rendszer paramétereinek optimális szinten tartásáról van szó változó környezeti tényezők mellett.

Ezek alapján a hibadiagnosztika a következő elemeket foglalja magában:

- A hibákat jelző tünetek detektálása (valamilyen megfigyelés alapján, rögzítve a hozzá tartozó összes adatot)

- A hibák azonosítása a tünetek alapján (inverz következtetés)
- A hibák elhárítására irányuló beavatkozások meghatározása

## 5.2. A diagnosztikai rendszerre vonatkozó követelmények

Az előző fejezetben leírt meghatározás szerint az elektrosztatikus rendszert felügyelő hibadiagnosztikai rendszernek képesnek kell lennie arra, hogy a rendszer bizonyos állapotait jelezze, ezek alapján a lehetséges hibákra következtessen, valamint javaslatot adjon a hibák megszüntetésére. Ezeket a vizsgálatokat a hibadiagnosztikai rendszernek biztonságosan kell végeznie. A diagnosztikai vizsgálatok működésének biztonságát a következőképpen határoztam meg:

**def.:** *A hibadiagnosztikai vizsgálat működését akkor nevezzük **biztonságosnak**, ha a hibadiagnosztikai rendszer*

- *az elektrosztatikus rendszerre vonatkozó megfigyelések alapján mindig a valóságnak megfelelő diagnosztikai állításokat szolgáltat a megfigyeléseket igazoló hibákról,*
- *mindig az elektrosztatikus rendszer működéséhez illeszkedő, előre definiált válaszüzenetben belül szolgáltatja az eredményeket.*

### 5.2.1. A tünetek detektálása

A hibákat jelző tünetek detektálásához először is meg kell határozni azokat a tüneteket, melyek a rendszerben lehetséges hibákat jelezhetik. A hibadiagnosztikai rendszernek ezeket a megfigyelendő tüneteket tárolnia kell (meg kell jegyeznie) későbbi hivatkozások céljából. Ezen túlmenően minden tünet esetében meg kell határozni azt a módot, ahogyan a tünet létezését regisztráljuk. Ez általában valamilyen, a tünetre utaló fizikai mennyiségek folyamatos vagy ciklikus mérését, illetve megfigyelését jelenti. A gyakorlatban ez egy adatgyűjtő rendszer tervezését és installációját jelenti, mely meghatározott gyakorisággal és pontossággal rögzíti, és más műveletek számára biztosítja a rendszerről a szükséges információkat. Ennek tervezésekor nem lehet figyelmen kívül hagyni a vizsgált

elektrosztatikus rendszer mérés-technikai és biztonságtechnikai adottságait (mit, mivel, hogyan lehet mérni az adott elrendezésben) Nehezíti a feladatot, hogy a tárolandó információ mennyisége a rendszer állapotától függhet, előre nem lehet meghatározni. A mérésadatgyűjtő-rendszer paraméterezésétől függően hibátlan üzem esetén nem érkezik tünetet jelző információ, üzemzavar esetén vagy azt megelőző időszakban azonban jelentősen megnövekedhet az ilyen információk mennyisége.

### **5.2.2. A hibák azonosítása**

A tünetekről rendelkezésre álló információk alapján azt kell meghatározni, hogy vajon milyen hibák okozhatták az adott tünetekről érkező információkat. Ehhez rendelkezni kell egy a priori tudással arról, hogy mely hibák milyen tüneteket idézhetnek elő. Ezt a tudást olyan szakértők segítségével gyűjthetjük össze, akik rendelkeznek a problémára vonatkozó általános és kifejezetten az adott rendszer működésére vonatkozó speciális ismeretekkel, üzemeltetési tapasztalattal. A szakértőktől összegyűjtött *tudásbázist* tárolni kell oly módon, hogy az abban tárolt információk egy tetszőleges időpontban, megadott válaszdőn belül előhívhatók legyenek. Ezek után a rendszerről érkezett információk alapján és a tudásbázis éppen aktuális adatainak ismeretében adott válaszdőn belül el kell végezni a következtetést, prezentálni kell a tüneteket előidéző hibákat.

### **5.2.3. A hibák elhárítása**

A hibák hatékony elhárításához minden hiba esetében előre meg kell határozni azokat a szükséges beavatkozásokat, intézkedéseket, melyek egy adott hiba elhárítására irányulnak. Ezeket az információkat tárolni kell, és lehetővé kell tenni, hogy ezek az adatok tetszőleges időpontban megadott válaszdővel rendelkezésre álljanak. Az adott hibákhoz tartozó intézkedések alapján el kell hárítani a hibát.

## **5.3. A diagnosztikai rendszer megvalósítása elektrosztatikus rendszerek esetében**

Az elektrosztatikus feltöltődésből származó problémák általában különböző ipari folyamatok „melléktermékeként” jönnek létre. A rendszerek tervezésekor általában nem számolnak az ilyen eredetű veszélyekkel, gyakran csak az üzemi működés közben derülnek ki az ilyen

jellegű problémák. Ha egy adott rendszerben azonosítják az elektrosztatikus eredetű problémákat, akkor védekezésképpen a rendszer állapotát jelző mérőeszközöket helyeznek el a rendszer különböző pontjain, és egy operátor személyzetet képeznek ki és bíznak meg a rendszer elektrosztatikus veszélyekre vonatkozó felügyeletével. Általában ez nem egy új operátor alkalmazását jelenti, hanem a már eddig is alkalmazásban lévő rendszeroperátorok feladatkörét szélesítik ki.

Ebben a fejezetben azt szeretném megvizsgálni, hogy az elektrosztatikus rendszerek hibadiagnosztikai kezelésére vonatkozóan léteznek-e megkötöttségek, és ezek pontosan mit jelentenek a diagnosztikai rendszer szempontjából. Az eddigiekben megvizsgáltam azokat a feladatokat, melyeket a diagnosztikát végző rendszernek kell ellátnia. Mivel a gyakorlatban emberi operátor alkalmazásával igyekeznek megoldani az elektrosztatikus problémákat, most arra keresem a választ, hogy egy emberi operátor képességei milyen mértékben felelnek meg az elektrosztatikus rendszerek hiba-diagnosztikai feladatai által támasztott követelményeknek.

Mivel a probléma megoldásához magát az operátort kell vizsgálni, a kérdést természetesen nem lehet megválaszolni a műszaki tudomány keretein belül. Segítségül kell hívnom más tudományágakat, melyek az emberi gondolkodás mechanizmusait, képességeit és tulajdonságait kutatják. A kognitív pszichológia és a kognitív tudomány elsősorban azok a tudományágak, melyek eredményei számomra érdekesek a kérdés megválaszolásához. A következő bekezdésekben a kognitív pszichológia azon tudományos eredményeire szeretném felhívni a figyelmet, melyek segíthetnek megválaszolni az előző bekezdésben feltett kérdést [1][25][26].

A kognitív pszichológia sokféle modellt felállított az emberi gondolkodás és problémamegoldás leírására. Ezek között volt olyan is, amely megkísérelte az embert úgy vizsgálni, mint egyfajta információ-átvivő berendezést. Egy ilyen modell esetében logikus próbálkozás volt, hogy megpróbálták megmérni az ember információ-átvivő kapacitását. Megvizsgálták, hogy adott idő alatt mennyi információt képes az ember átvinni (visszamondani, kódolni gomblenyomással). Azt tapasztalták, hogy 4-5 szót minden probléma nélkül vissza tudtak adni a kísérleti személyek. 12-t azonban már egyáltalán nem. Valahol 7 körül mozgott az a határ, amennyi szót a kísérleti személyek képesek voltak hibátlanul visszamondani. Az érdekesség még az, hogy ez az érték bizonyos határok között függetlennek

bizonyult attól, hogy milyen gyorsan érkezett hozzájuk az információ (1 másodpercenként vagy 3 másodpercenként). Hasonló eredményekre jutottak akkor is, ha nem szavakat, hanem más ingereket (színeket, szagokat, hangokat) kellett megjegyezni. Sőt akkor is, ha szókapcsolatokat, vagy akár szállóigéket kellett megjegyezni. Tehát az ember egyszerre kb. ugyanannyit tud fejben tartani betűkből, szavakból, mondatokból, pedig ezek meglehetősen különböznek pl. a karakterek számát illetően. A 7-es szám állandóságát az ember agyában meglévő ún. kognitív sémákkal magyarázzák. A kognitív vagy gondolkodási sémák olyan egységei a gondolkodásunknak, melyek önmagukban is értelmesek, és önálló jelentésük van. Aktívan irányítják az észlelést és a gondolkodást, miközben a beérkező információk alapján maguk is módosulnak. A kognitív sémák bonyolult belső szerkezettel rendelkeznek, sokféle információ szerveződik össze bennük különböző relációk szerint. A meglévő kognitív sémáink egymásra is hatással vannak, módosítják egymást. Ezek alapján azt mondhatnánk, hogy jóformán csak azt vagyunk képesek észlelni a környezetből, melyre van kialakult sémánk. Természetesen új sémák is kialakulhatnak, de ez egy hosszabb folyamat eredménye. A következőkben azt vizsgálom, hogy mit jelent mindez a diagnosztikát végző emberi operátorra vonatkozóan [1][25][26].

Elektrosztatikus feltöltődésből származó tűz- és robbanásveszélyt tartalmazó rendszer esetében a diagnosztika egyik alapfeltétele, hogy a rendszert felügyelő személy értse a rendszer működését, és értelmezve illetve megjegyezve a rendszerről működés közben érkező információkat, dönteni tudjon a beavatkozás szükségességéről, minőségéről. A kognitív pszichológia eredményei alapján azt mondhatjuk, hogy egy átlagos képességű ember egy időben legfeljebb 7 különböző ingert, illetve szabályt képes agyában megjegyezni és feldolgozni. Az emlékezés képességét jelentősen befolyásolják a külső zavaró tényezők is. Ha a rendszert felügyelő operátort pl. megzavarják munkája (a rendszerről érkező információk figyelése) közben, akkor jelentősen lecsökken ez az érték. Ha az ember által felügyelt rendszer olyan összetett, hogy ennél nagyobb számú inger éri az operátort, akkor jelentősen megnő annak a veszélye, hogy az operátor képtelen helyes következtetést levonni az őt ért ingerekből, mivel emlékezetéből törölődnek bizonyos ingerek, vagy nem képes azok összefüggését emlékezetéből előhívni [1][25][26]. Egy kritikus esetben, amikor a rendszerben tünetek jelzik valamilyen hiba(k) felléptét, nem lesz képes megállapítani a tünetek igazi okát. Ezek alapján tehát azt mondhatjuk, hogy az elektrosztatikus feltöltődést tartalmazó rendszereket a hibadiagnosztika megvalósítása szempontjából alapvetően két csoportra lehet

osztani. Az első csoportban a diagnosztika biztonságos működését egy emberi operátor is képes biztosítani. Ehhez persze szükséges, hogy rendelkezzen a szükséges kognitív sémákkal, melyek pl. egy megfelelő oktatás és elég hosszú gyakorlat elvégzése során kialakulhatnak. A második csoportban az emberi operátor alkalmatlan a diagnosztika biztonságos elvégzésére. Az elektrosztatikus rendszereknek ezt a csoportját komplex rendszereknek fogom nevezni, a további vizsgálatok az ilyen típusú rendszerekre vonatkoznak. Mivel a hibadiagnosztika egy inverz következtetési eljárás, ezért a komplex rendszer kritériumát a következtetéshez felhasznált információk számával határozom meg. A következtetés magja az a korábban említett tudásbázis, mely a tünetek és hibák közötti ok-okozati kapcsolatot megteremti.

**def.:** *Ha az elektrosztatikus rendszer hibadiagnosztikai vizsgálatához felhasznált tudásbázis értékes elemeinek száma meghaladja a 7-et, akkor a rendszert a hibadiagnosztika megvalósítása szempontjából komplex elektrosztatikus rendszernek nevezzük.*

Mivel a komplex rendszerek esetében az ember mentális tulajdonságai jelentik a veszély korlátozásának fő akadályát, egy olyan megoldást kell találnom, melyben ezek a hátrányok nem léteznek, vagy nem ilyen erősen jelentkeznek.

#### **5.4. Az automatizált fuzzy diagnosztika alkalmazása elektrosztatikus rendszerek esetében**

Az előzőekben megmutattam, hogy az elektrosztatikus rendszerek hibadiagnosztika szempontjából eltérő kezelést igényelhetnek. Ha a rendszer komplexitása nem halad meg egy bizonyos mértéket, akkor egy átlagos képességű emberi operátor kiválóan képes a rendszer hibadiagnosztikai felügyeletére. Olyan rendszerek esetében azonban, melyek komplexitása meghaladja ezt a mértéket, szükség van más megoldásokra. Ebben a fejezetben azt fogom bemutatni, hogy tetszőlegesen nagy komplexitású elektrosztatikus rendszer hibadiagnosztikai kezelésére is létezik megoldás (legalább is elvileg) és ez miképpen realizálható. A megoldást fuzzy matematikai eszközökkel valósítom meg, és alkalmazását ipari elektrosztatikai folyamatok modelljein mutatom be [4][34].

A hibadiagnosztikai rendszerre vonatkozó követelmények alapján azt mondhatjuk, hogy *komplex* elektrosztatikus rendszerek esetében olyan gyakorlati megvalósítási módra van szükség, mely alkalmas nagy mennyiségű adat tárolására és a megfelelő logikai következtetések elvégzésére. Ha egy olyan számítógépes alkalmazást tudnék meghatározni, mely ezeket a feladatokat valamilyen módon képes elvégezni, akkor elérném a célkitűzést. A számítógépek – a felépítésükből adódóan és a teljesítményüktől függően - teljesítik a nagy mennyiségű adat tárolására vonatkozó követelményt. Bár következtetések elvégzésére önmagukban nem képesek, de egy megfelelő számítógépes alkalmazás segítségével ez is elvégezhető. A céloom egy olyan számítógépes algoritmus alapjainak meghatározása, mely alkalmas az elektrosztatikus rendszerek hibadiagnosztikája által megkívánt következtetések elvégzésére. Magának az algoritmusnak a meghatározása nem céloom, a következő fejezetek alapján ez már egyértelműen meghatározható. A továbbiakban az egyszerűség kedvéért az elektrosztatikus veszélyeket magukban rejtő komplex rendszert röviden *elektrosztatikus rendszernek* fogom nevezni.

Ha az elektrosztatikus rendszerben ismertek a lehetséges tünetek (vagy következmények) és azok okai (a lehetséges hibák), valamint az ezek között fennálló kapcsolat (ok-okozati viszony), akkor egy adott hibakombináció esetén a lehetséges tünetek kombinációja direkt módon meghatározható. Ezen „direkt” probléma megoldásakor mindig egy megoldást kapunk a lehetséges tünetekre. A megfigyelt tünetekből az őket okozó hibákra való következtetést „inverz problémának” nevezik a logikában, és ennek megoldása már komoly matematikai eszközöket igényel. A fuzzy matematika eszköztárának felhasználásával sikerült erre általános érvényű megoldást találni. Pappis és Sugeno [28] részletesen tárgyalják a problémát és az azt megfogalmazó fuzzy relációs egyenletnek a megoldását (ld.: 11.3.2 fejezet). Vegyünk egy példát a lakóházak villamosenergia-ellátásának területéről: Logikus állításnak tűnik, ha azt mondjuk: ha a nappali lámpájának villanykapcsolója le van kapcsolva, akkor a nappaliban lévő lámpa nem világít (direkt következtetés). Ennek az állításnak a megfordítottja (inverze): ha a nappaliban lévő lámpa nem világít, akkor a nappali lámpájának villanykapcsolója le van kapcsolva (inverz következtetés). Ezen utóbbi állítás létjogosultsága már megkérdőjelezhető, mivel a kapcsoló állásán kívül még sok más oka is lehet annak (pl. feszültség-kimaradás, szakadt tápvezeték, stb.), hogy a lámpa nem ég.

### 5.4.1. Az alkalmazás általános leírása

Az alkalmazás első lépéseként az adott elektrosztatikus rendszerben meg kell határozni a lehetséges hibákat és a hibákra utaló tüneteket. Ehhez pontosan tudnom kell, hogy milyen jelenségeket sorolhatok a HIBA és milyeneket a TÜNETHATÓ kategóriába.

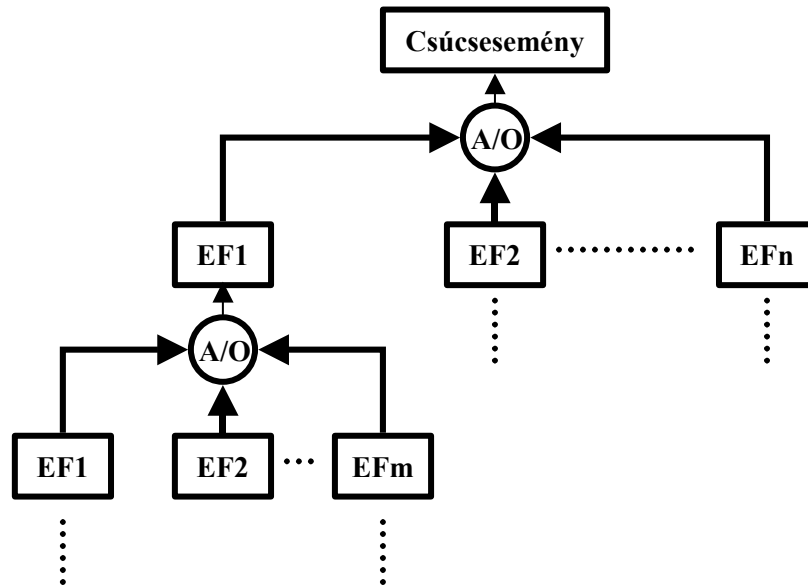
**def.:** *Az elektrosztatikus rendszer alkotóelemeinek olyan, direkt módon nem érzékelhető állapotait nevezzük **hibáknak**, melyek meghatározott feltételek mellett egy nemkívánatos eseményhez vezetnek.*

**def.:** *A **nemkívánatos esemény** a diagnosztikai rendszer üzemeltetője által önkényesen meghatározott, elektrosztatikus feltöltődés kapcsán kialakuló esemény, melynek elkerülésére a diagnosztikai rendszert tervezik. Egy nemkívánatos esemény nem lehet előfeltétele más nemkívánatos eseményeknek.*

Ezek alapján a hibák meghatározásához tehát ki kell választani a nemkívánatos eseményeket. Ezeket a hibafa-analízis terminológiáját használva *csúcseseményeknek* fogom nevezni, mert minden hiba ezen események valamelyikének bekövetkezéséhez vezethet. Ha megvannak a csúcsesemények, akkor elkezdődhet az az elemzési folyamat, melynek során felfejtem a csúcseseményekhez szükséges előfeltételeket, rendszerállapotokat. Ezeket a 6. ábrának feltüntetett általános hibafának megfelelően lehet ábrázolni. A csúcseseményhez ÉS illetve VAGY típusú logikai kapcsolaton (A/O) keresztül kötődnek az egyes előfeltételek (EFn). Ennek az elemzésnek az egyik célja az, hogy olyan előfeltételekhez jussak el, melyek egyértelműen kapcsolhatók a vizsgált elektrosztatikus rendszer egy jól körülhatárolható, hibaelhárítás szempontjából már érdemben tovább nem bontható eleméhez vagy részrendszeréhez. További cél az, hogy ezeknek az előfeltételeknek a létezése valamely megfelelően választott kritérium alapján egyértelműen eldönthető legyen. Ha a hibafa minden ágán elérkeztem egy ilyen előfeltételhez, akkor ezeket nevezhetjük az adott csúcseseményre vonatkozóan az elektrosztatikus rendszerünk lehetséges hibáinak (pl. az ábrán szürke színnel jelölt EF2 előfeltétel). Most rátérek a tünetek meghatározásának módjára. Ehhez először a TÜNETHATÓ fogalmát kell definiálni.

**def.:** *Tünetnek nevezzük azt a jelenséget, mely az elektrosztatikus rendszer legalább egy hibájával ok-okozati kapcsolatban van (ahol a hiba az ok és a tünet a következmény), és a jelenség bekövetkezése valamilyen objektív megfigyeléssel (pl. műszeres mérés) egyértelműen eldönthető.*





6. ábra, A csúcsesemény és a hibák kapcsolata

A továbbiakban olyan tünetek meghatározása a célom, melyek a rendszerben lehetséges hibákra utalnak. A tünetek és hibák kapcsolatát a 7. ábrán látható mátrixszal szemléltetem. Az ábrán  $0 < r_{qp} \leq 1$ , ha a  $q$ -adik hiba és az  $p$ -edik tünet között van kapcsolat, és 0 egyébként. Ebben a mátrixban nem csak a kapcsolat létezését, hanem annak erősségét is meg lehet adni. Az adott tünet minél inkább jelzi az adott hibát,  $r_{qp}$  értéke annál közelebb van 1-hez. A tünet halmaz elemeit úgy kell megválasztani, hogy minden hibára legalább egy tünet vonatkozzon. Az ábrát tekintve ez azt jelenti, hogy minden sorban legalább egy nem nulla elemnek kell lennie. Ideális esetben minden hibát más tünetegyüttes jelez, így logikailag egyértelmű következtetésekkel lehet a tünetek alapján azonosítani a hibákat. Ezen adatbázis "minősége" kulcsfontosságú a diagnosztikai módszer által szolgáltatott eredmények használhatóságának szempontjából. A "minőség" szó ebben az esetben annak a mértékét jelzi, hogy a tudásbázisban foglalt információ milyen mértékben felel meg a rendszer valóságos ok-okozati viszonyainak. Ezeket az információkat csak olyan személyektől (szakértő) lehet beszerezni, akik szaktudásuk és tapasztalatuk folytán az egzakt összefüggések ismerete nélkül is alkalmasak erre a feladatra. A tudásbázis feltöltéséhez általában több szakembert célszerű megkérdezni a rendszer ok-okozati viszonyairól, és az általuk adott információkat valamilyen módszerrel (esetleg valamilyen szempont szerint súlyozottan) átlagolni kell. A "tudásátlagolás" problémájának a tárgyalása nem tartozik a jelen munka tárgyába. Erre a szakirodalomban számos megfelelő példa található [31].

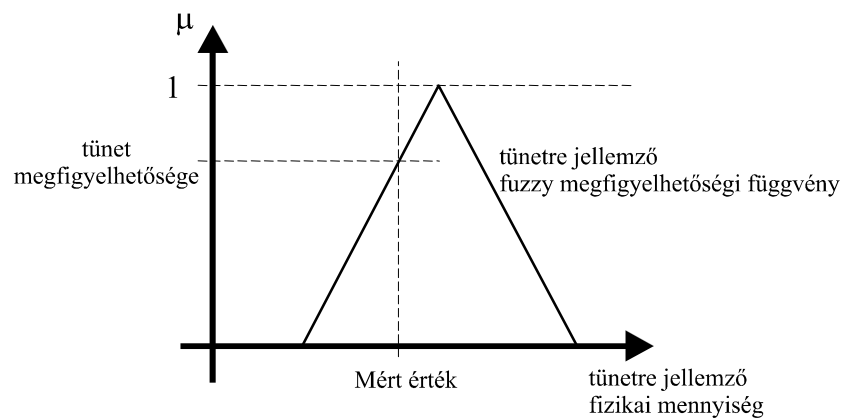
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>....</b>	<b>Tp</b>
<b>H1</b>	$r_{11}$	$r_{12}$		$r_{1p}$
<b>H2</b>	$r_{21}$			
<b>:</b>				
<b>Hq</b>	$r_{q1}$			$r_{qp}$

7. ábra, A hibák és tünetek kapcsolatának ábrázolása

A tünetek bekövetkezésének eldöntésére megfigyeléseket végzünk az elektrosztatikus rendszerben. A megfigyelések a tünetekhez rendelhetők hozzá a hiba-tünet összerendeléshez hasonló módon. A megfigyelés történhet valamely fizikai mennyiség mérőműszerrel történő mérésén, illetve más (pl. az emberi érzékszervek felhasználásával) érzékelési módokon keresztül is. A fuzzy módszerrel lehetőségünk van arra, hogy a mérési eredmények alapján ne csak a tünet bekövetkezését, hanem a bekövetkezés mértékét is jelezzük. Ehhez egy olyan megfigyelhetőségi függvényre (fuzzy tagsági függvény) van szükség, mely folytonos kapcsolatot teremt az adott tünet megfigyelhetőségének mértéke és a megfigyelt mennyiségek pillanatnyi értéke között (8. ábra). Ezek alapján a mérések gyakoriságával megegyező időközönként rendelkezésre áll a tünet megfigyelhetőségére vonatkozó információ. A ilyen megfigyelhetőségi függvények alakjának és pontos menetének meghatározása természetesen a szakértők feladata. Ez a munka a fizikai folyamatok és összefüggéseik, valamint a rendszer működésének pontos ismeretét feltételezi.

A tünetek meghatározásához kiindulhatunk az elektrosztatikus rendszer mérés technikai adottságaiból vagy a hibák következményeinek elemzéséből. Az első módszer szerint megvizsgáljuk, hogy a rendszerben egyáltalán milyen mennyiségeket tudunk mérni, illetve valamilyen módon érzékelni, és meghatározzuk, hogy ezek közül melyek hozhatók ok-okozati kapcsolatba valamely hibával. Bár ebben az esetben valószínűleg sok olyan megfigyeléshez kapcsolódó "tünetjelölt" is szóba jön, mely a korábban meghatározott lehetséges hibák egyikével sem áll kapcsolatban, de kisebb az esélye, hogy megfelelünk egy lehetséges tünetről. A másik módszer szerint a hibákon végig haladva megvizsgáljuk, hogy milyen tünetek jelezhetnék rendszerünkben egy adott hiba létezését. Azon "tünetjelölteket", melyeknél a gyakorlatban is van arra lehetőség, hogy az intenzitásukat valamilyen módon folyamatosan érzékeljük, felvehetjük a tünetlistába. Ily módon csak használható tüneteket fogunk összegyűjteni, bár előfordulhat, hogy bizonyos hasznos tüneteket kifelejtünk. A

gyakorlatban mind a kétféle megközelítés elvégzése javasolt a diagnosztikai rendszer hatékonyságának érdekében.



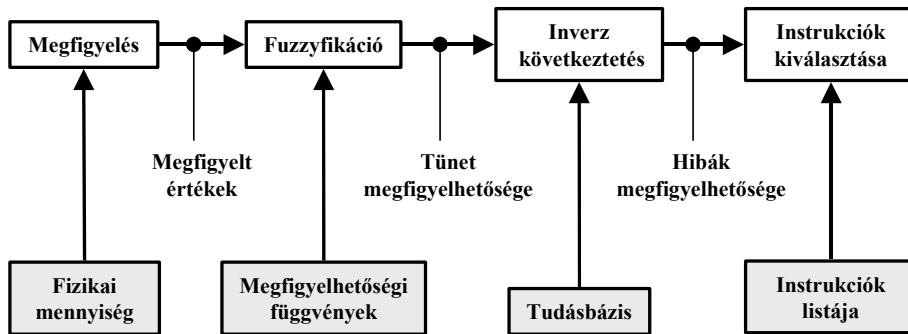
8. ábra, Egy tünetre vonatkozó megfigyelhetőségi függvény

Az eddigiekben bemutattam azt a folyamatot, ahogyan a komplex elektrosztatikus rendszert felügyelő hibadiagnosztikai rendszer működéséhez szükséges adatbázisok és bemenő adatok előállnak. A diagnosztikai rendszer a valós működése közben éppen ellentétes irányú folyamatot visz véghez. A következőkben ezt tekintem át röviden.

#### 5.4.2. A működés leírása

A 9. ábra a komplex elektrosztatikus rendszerek hibadiagnosztikai felügyeletére használható alkalmazás elvi folyamatábráját szemlélteti. A diagnosztikai rendszer működéséhez a következők adottak:

- egy komplex elektrosztatikus rendszer,
- a diagnosztikai rendszer bemenetét előállító megfigyelő rendszer,
- a kiválasztott csúcseménynek megfelelő lehetséges hibák listája,
- a hibákhoz kapcsolódó tünetek listája,
- a tünetekhez kapcsolódó megfigyelhetőségi függvények,
- a tünetek és hibák kapcsolatát leíró tudásbázis,
- a hibákhoz tartozó instrukciók listája.



9. ábra, A komplex elektrosztatikus rendszer fuzzy diagnosztizálásának folyamata

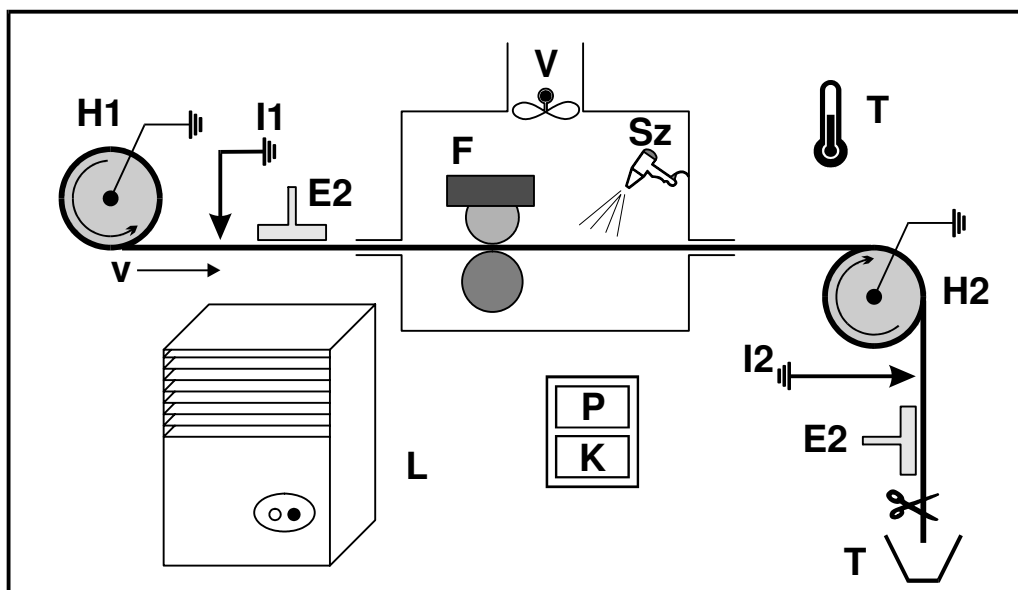
A komplex elektrosztatikus rendszer megfigyelését végző rendszer megadott gyakorisággal szolgáltatja a fizikai mennyiségek aktuális értékére vonatkozó információkat. Ezek a megfigyelt értékek egy fuzzyfikációs folyamaton mennek keresztül. Ennek során a fuzzy megfigyelhetőségi függvények segítségével minden tünetre vonatkozóan előállnak a fuzzy megfigyelhetőségi értékek. Ezek az értékek képezik az inverz következtető rendszer bemenetét. A 11.3 fejezetben használt jelölések felhasználásával azt mondhatjuk, hogy ezek az értékek képezik a  $\mathbf{b}$  vektor elemeit a tudásbázisban rögzített rendnek megfelelően. Az inverz következtető rendszer ezen  $\mathbf{b}$  vektor és a tudásbázisnak megfelelő  $\mathbf{R}$  mátrix felhasználásával meghatározza a 11.3 fejezet szerinti  $\mathbf{a}$  vektor elemeit. Ezek az értékek nem mások, mint a tudásbázisban rögzített hibák létezésnek mértékét mutató  $[0,1]$  intervallumba eső számok. A hibák létezési mértéke alapján kiválaszthatók azok az instrukciók, melyek az adott hibák elhárítására vonatkoznak.

Az eddigiekben általánosságban áttekintettem a fuzzy diagnosztikai rendszer alkalmazását komplex elektrosztatikus rendszerek esetében. A következő fejezetekben elektrosztatikus rendszerek modelljén mutatom be a hibadiagnosztika működését. Természetesen a fuzzy hibadiagnosztikai módszer alkalmazhatósága nem korlátozódik az itt szereplő rendszerekre, számos más esetben is van létjogosultsága [7].

### 5.4.3. Szigetelő anyagú fólia festése

Ebben a fejezetben a 10. ábra szerint modellezett elektrosztatikus rendszer hibadiagnosztikai felügyeletére alkalmazom a fuzzy diagnosztikai módszert [16][22][29]. Az 10. ábra egy olyan rendszer modelljét ábrázolja, melyben egy villamos szempontból szigetelő anyagú fólia gördül le a H1 jelű földelt fémhengerről [9]. A fólia egy zárt burkolatú festőművön halad

keresztül, ahol a felületére hengerek segítségével festéket visznek fel. A festőműben lévő levegő oldószergőz-koncentrációját a V jelű ventilátor segítségével szabályozzák. A szárítás után a második H2 földelt fémhengert is elhagyva, a fóliát feldarabolják és a T tartályban összegyűjtik. A fólia haladási sebessége  $v$ , a hengerek után I1 és I2 ionizátorok semlegesítik a fólia és a henger elválásakor szétválasztott töltéseket. Az E1 és az E2 jelű térerősség mérők a villamos térerősség nagyságát mérik a szigetelő fólia felületének közelében, az eliminátorok után. A festőműben az F jelű hengerek segítségével juttatjuk fel a festéket a fólia felületére, majd az Sz-el jelölt szárító berendezés megszáritja a festéket. A festőhengerek esetében azt feltételezzük, hogy a fólia feltöltése szempontjából ezek szerepe elhanyagolható. A V ventilátor feladata annak biztosítása, hogy a festőmű légterében az oldószergőz koncentrációja ne kerüljön a robbanóképes tartományba. A festőművön kívüli munkatérben mérjük a levegő T hőmérsékletét, a P páratartalmát és az oldószergőz K koncentrációját. A levegő páratartalmát és hőmérsékletét az L légkondicionáló berendezés szabályozza.



10. ábra, Szigetelő anyagú fólia festésének modellje

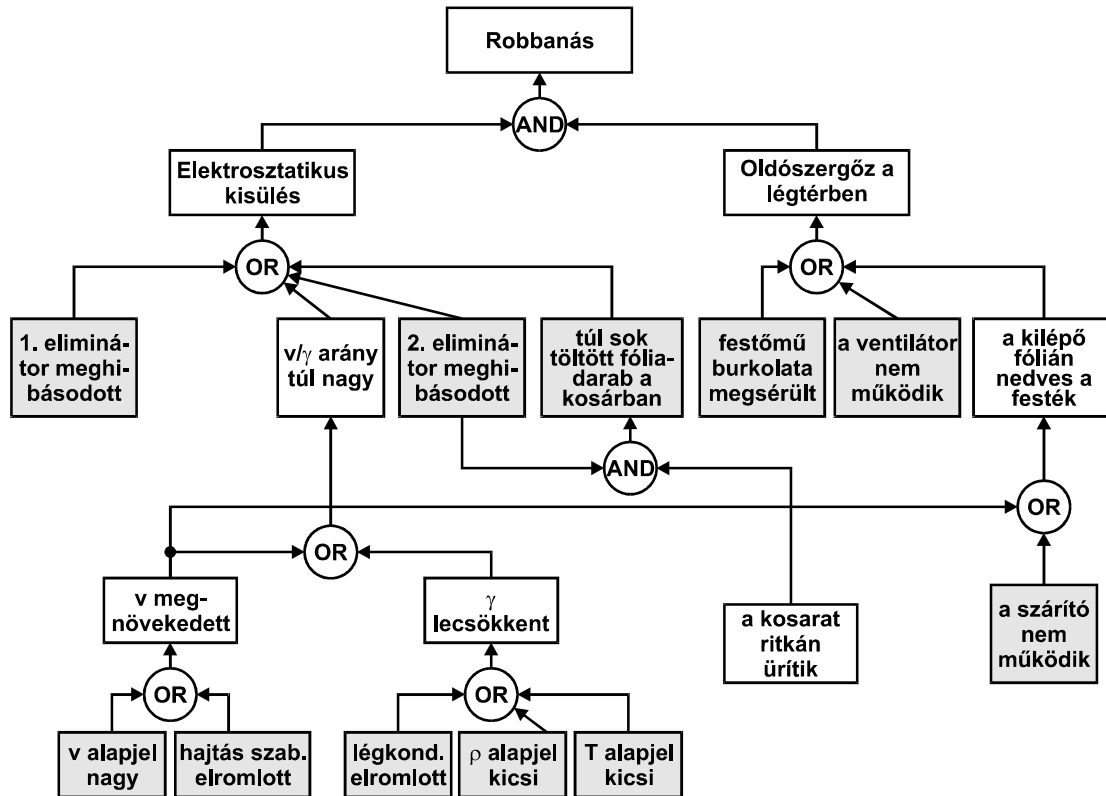
Először a kiválasztott csúcsesemények (nem kívánatos események) alapján meg kell határozni azt, hogy milyen jelenségeket nevezünk „hibának”. Ebben az esetben a szempont az lesz, hogy az elektrosztatikus kisülés okozta károkat (elsősorban elektrosztatikus eredetű robbanást) el akarjuk kerülni. A nemkívánatos csúcsesemény tehát az elektrosztatikus eredetű robbanás lesz. Azokat az eseményeket, rendszerállapotokat, melyek meghatározott feltételek mellett ehhez a nemkívánatos eseményhez vezethetnek, hibáknak fogom nevezni. A 11. ábra

ezt az elemzést szemlélteti [15][20][21]. Az ábrán legfelül látható a csúcsesemény, az elektrosztatikus kisülés okozta "robbanás". Ez az esemény csak akkor fordulhat elő, ha a léteznek azok a feltételek, melyek szükségesek a robbanás létrejöttéhez. Esetünkben ezek a megfelelő energiájú elektrosztatikus kisülés, valamint a légtérben jelenlévő megfelelő koncentrációjú oldószergőz. Mivel ezeknek a körülményeknek együtt kell létezniük a robbanáshoz, ezért logikai ÉS kapcsolattal kötődnek a "robbanás"-hoz. Ehhez hasonlóan a tovább haladhatunk az események előfeltételeinek visszafejtésében. Végül eljutunk azokhoz az eseményekhez, melyeket az ábrán szürke téglalappal jelöltünk. A kiválasztott csúcseseményt figyelembe véve ezeket neveztem a rendszer hibáinak, melyeket a 2. táblázatban foglaltam össze.

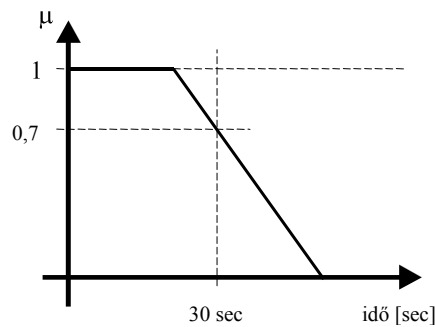
<i>A hiba kódja</i>	<i>A hiba leírása</i>
H1	Az 1. eliminátor meghibásodott (nincs töltésemlegesítés).
H2	A 2. eliminátor meghibásodott (nincs töltésemlegesítés).
H3	Túl sok töltött fóliadarab halmozódott fel a gyűjtőkosárban.
H4	A hengerhajtás szabályozása meghibásodott (nagy sebesség, „megszaladás”).
H5	A sebesség alapjel túl nagy.
H6	A légkondicionáló meghibásodott.
H7	Az abszolút páratartalom alapjel kicsi.
H8	A levegő-hőmérséklet alapjel kicsi.
H9	A festőmű burkolata megsérült.
H10	A ventilátor nem működik.
H11	A szárítóberendezés meghibásodott.

**2. táblázat, A hibák listája (szigetelő fólia festése)**

Ezt követően a tüneteket határozom meg. Tüneteknek azokat a jelenségeket neveztem, melyek az előbb felsorolt hibákkal ok-okozati kapcsolatban vannak és bekövetkezésük illetve intenzitásuk valamilyen módon érzékelhető. Az előző pontban leírt módszerek valamelyikével (vagy mindegyikével) meg kell határozni, hogy milyen tünetek jelezhetik a fenti hibák létezését. A 3. táblázatban a hibákhoz kapcsolódó tüneteket láthatjuk. A táblázatból könnyen látható, hogy egy tünet esetleg több hiba létezésére is utalhat, illetve egy hiba létezését több tünet együttese jelezheti.



11. ábra, Hibák meghatározása hibafával (szigetelő fólia festése)

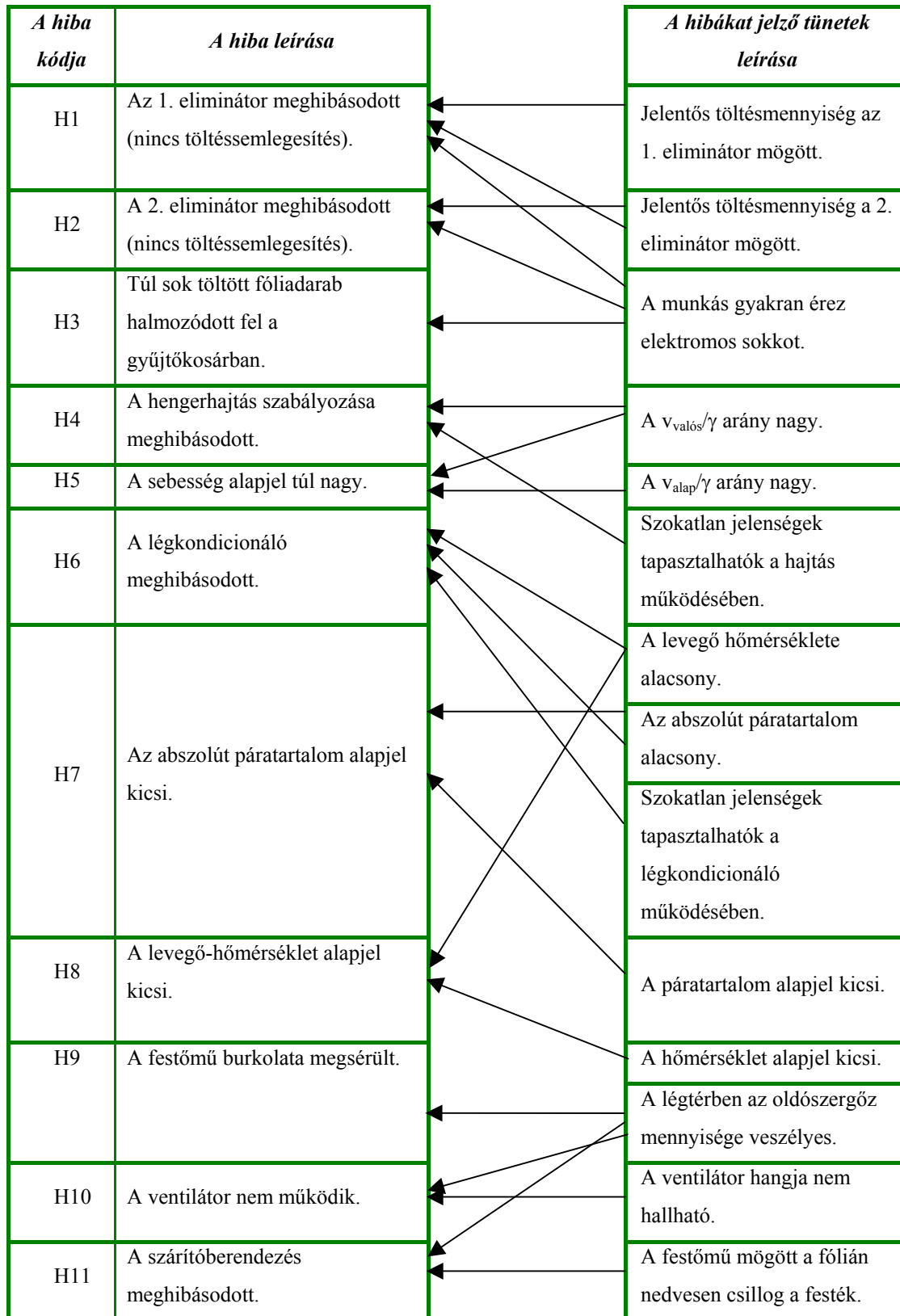


12. ábra, A T3 tünet megfigyelhetőségi függvénye

A tünetek ismeretében azokat a fizikai mennyiségeket, vagy érzékelési módokat definiálom, melyekkel az egyes tünetek létezéséről akarok információt gyűjteni. A 4. táblázatban ezeket foglaltam össze. Ezt követően meg kell adni azokat a fuzzy tagsági függvényeket, melyek egy adott tünet és a hozzá kapcsolódó fizikai mennyiség pillanatnyi értéke között teremtenek kapcsolatot, azaz megadják a tünetek létezését jellemző megfigyelhetőségi mértéket. Példaképpen a 12. ábrán a T3-al jelölt tünet ("a munkás gyakran érez elektromos sokkot")

esetében megadjuk ezt a fuzzy függvényt. A 4. táblázat szerint ezt a tünetet a munkás által érzékelt elektromos sokkok között eltelt idővel jellemezzük. Minél kisebb ez az idő, annál nagyobb a tünet megfigyelhetőségi mértéke. A 12. ábrán látható alakú függvény például megfelelő lesz a tünet létezésének jelzésére. A függvény töréspontjainak pontos helyét meghatározhatjuk egyrészt olyan szakértők segítségével, akik ismerik a rendszer fizikai folyamatait, valamint valós hiba eseteken végzett próbával és az azt követő hangolással. Ehhez hasonlóan minden tünetre meg kell határoznunk egy ilyen megfigyelhetőségi függvényt. Ezek segítségével és a tünetekhez kapcsolódó mennyiségek folyamatos detektálásával minden időpillanatban információval rendelkezhetünk a tünetek megfigyelhetőségi mértékéről.





3. táblázat, Hibák és tünetek kapcsolata (szigetelő fólia festése)

<i>A tünet kódja</i>	<i>A tünet leírása</i>	<i>Megfigyelés módja</i>
T1	Jelentős töltésmennyiség az 1. eliminátor mögött.	villamos térerősség mérése
T2	Jelentős töltésmennyiség az 2. eliminátor mögött.	villamos térerősség mérése
T3	A munkás gyakran érez elektromos sokkot.	idő mérése
T4	$A v_{\text{valós}}/\gamma$ arány nagy.	sebesség, vezetőképesség mérése
T5	$A v_{\text{alap}}/\gamma$ arány nagy.	sebesség, vezetőképesség mérése
T6	Szokatlan jelenségek tapasztalhatók a hajtás működésében.	megfigyelés
T7	A levegő hőmérséklete alacsony.	hőmérséklet mérése
T8	Az abszolút páratartalom alacsony.	páratartalom mérése
T9	Szokatlan jelenségek tapasztalhatók a légkondicionáló működésében.	megfigyelés
T10	Páratartalom alapjel kicsi.	páratartalom alapjel detektálása
T11	A hőmérséklet alapjel kicsi.	hőmérséklet alapjel detektálása
T12	A légtérben az oldószergőz mennyisége veszélyes.	koncentráció mérése
T13	A ventilátor hangja nem hallható.	megfigyelés
T14	A festőmű mögött a fólián nedvesen csillog a festék.	megfigyelés

4. táblázat, A tünetek megfigyelésének módja (szigetelő fólia festése)

A fentiek ismeretében meg lehet határozni az elektrosztatikus rendszerben előforduló hibák, és az ezeket jelző tünetek kapcsolatát leíró  $R$  mátrixot. Ehhez a 3. táblázat elkészítésével megtettem az első lépést, meghatároztam, hogy mely tünetek milyen hibák létezését jelzik egyáltalán. A tünetek és a hibák kapcsolatát mutató nyilak azonban még csupán a kapcsolat létezését jelzik, nem hordoznak információt a kapcsolat erősségére vonatkozóan.

A következő mátrixban a sorok az elektrosztatikus rendszerben definiált hibákat, az oszlopok pedig a tüneteket reprezentálják. Az oszlopok és sorok sorszámai megegyeznek a hibákat és tüneteket összefoglaló táblázat sorszámozásával. Ennek megfelelően az  $R_{ij}$  értéke megmutatja az  $i$ -edik hiba és a  $j$ -edik tünet között fennálló kapcsolat erősségét. A mátrixban szereplő adatokat az előző fejezetnek megfelelően szakértők tudására alapozva határoztam meg. Itt szeretném felhívni a figyelmet, hogy már egy ilyen egyszerű elektrosztatikus rendszer esetében is az 5.3 fejezetben definiált *komplex* rendszerrel van dolgunk, hiszen a mátrix mérete megfelel az ott definiált kritériumnak.

$$(23) \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0,3 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0,8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0,8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0,6 & 0,8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

A következőkben a komplex elektrosztatikus rendszerünkre vonatkozóan három esetet fogok megvizsgálni a 11.3.2 fejezetben leírt módszer szerint. A számításokat egy erre a célra fejlesztett számítógépes program segítségével végeztem, mely a tudásbázis  $\mathbf{R}$  mátrixa és a tünetek megfigyelhetőségének  $\mathbf{b}$  vektora ismeretében meghatározza a hibák létezésének alsó és felső korlátját, valamint vizsgálja a megoldás létezésének szükséges és elégséges feltételét (117)-es egyenlet) [12].

### 1. eset

A fent definiált mérések és megfigyelések alapján azt feltételezem, hogy a rendszer működése közben egyik tünet sem jelentkezik, tehát minden tünet megfigyelhetősége 0. Ez azt jelenti, hogy a  $\mathbf{b}$  vektor (a tünetek megfigyelhetőségi mértékét tartalmazó vektor) elemei mind 0-k:

$$(24) \quad \mathbf{b} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

A megoldás akkor és csak akkor létezik, ha a (117)-es egyenletet kielégítik a fenti  $\mathbf{b}$  vektor és az  $\mathbf{R}$  mátrix értékei. A számítást elvégezve könnyen belátható, hogy

$$(25) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T \circ \mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] = \mathbf{b},$$

tehát létezik megoldás. Meghatározva a hibák létezésének felső korlátját azt kapjuk, hogy

$$(26) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

majd ehhez hasonlóan az alsó korlátra is 0-k adódnak.

$$(27) \quad \max(\phi(\mathbf{S}^*))^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Ezzel a vizsgálattal tulajdonképpen igazoltuk azt a - józan ésszel is belátható - tényt, hogy ha a rendszerben nincsenek hibát jelző tünetek, akkor a hibák létezése sem bizonyítható.

## 2. eset

A második esetben azt vizsgálom, hogy milyen eredmény adódik akkor, ha a mérések és megfigyelések alapján minden tünet a lehető legnagyobb mértékben megfigyelhető. Itt hívom fel a figyelmet arra, hogy megoldás létezése mellett a tünetek maximális megfigyelhetősége nem minden esetben 1. Akkor lehet ez a maximális megfigyelhetőség 1-nél kisebb, ha az adott tünet egyik hibát sem jelzi „biztosan”, az  $\mathbf{R}$  mátrixnak a tünethez tartozó oszlopában minden elem 1-től különböző értékű. A tünetek meghatározásánál arra kell törekedni, hogy minél kevesebb legyen az ilyen tünetek száma, de adódhatnak olyan esetek, mikor ez elkerülhetetlen. Esetünkben a megoldás létezése melletti maximális megfigyelhetőség a következőképpen alakul.

$$(28) \quad \mathbf{b} = [1 \ 1 \ 1 \ 0,5 \ 1 \ 0,8 \ 0,6 \ 0,6 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 0,9 \ 1 \ 1].$$

Ilyen  $\mathbf{b}$  vektorral számolva tehát a hibák létezésének felső korlátja

$$(29) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1],$$

Az alsó korlát meghatározásánál az adódik, hogy

$$(30) \quad \max(\phi(\mathbf{S}^*))^T = [1 \ 1 \ 1 \ 0,8 \ 1 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 0,9 \ 1 \ 1].$$

Ebben az esetben azt kaptam eredményül, hogy a 4., a 6. és a 9. hibát kivéve minden hiba létezése az 1 és az 1 érték között van, tehát 1. Három esetben azonban a létezés alsó korlátja kisebb, mint egy. Ha megfigyeljük, ezek éppen azok a hibák, melyeket egyetlen tünet sem jelez „biztosan” (az  $\mathbf{R}$  mátrixnak a hibához tartozó sorában minden elem 1-től különböző). Eredményünk azt jelzi, hogy ezeknél a hibáknál nem rendelkezünk olyan információval, mely egyértelműen eldöntené a hiba létezését. Ilyenkor két dolgot tehetünk. Vagy elfogadjuk ezt a

helyzetet, vagy megpróbálunk olyan hiba-tünet kombinációkat előállítani, melyek kiküszöbölik ezt (pl. új tünetek felvételével, vagy a hibák tovább bontásával, és új tünetek hozzárendelésével).

### 3/a. eset

Végül egy olyan esetet vizsgálunk, amikor bizonyos tünetek különböző mértékben megfigyelhetők, mások viszont nem. A tünetek megfigyelhetőségét jellemző  $\mathbf{b}$  vektor a következőképpen néz ki:

$$(31) \quad \mathbf{b} = [0,9 \quad 0,6 \quad 0,6 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

Ezt behelyettesítve a megoldás létezésének szükséges és elégséges feltételét leíró egyenletbe azt kapjuk, hogy

$$(32) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T \circ \mathbf{B} = [0,9 \quad 0,6 \quad 0,6 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] = \mathbf{b},$$

tehát létezik megoldás. Ez a következőképpen néz ki:

$$(33) \quad [0,9 \quad 0,6 \quad 0,6 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \leq \mathbf{a} \leq [0,9 \quad 0,6 \quad 0,6 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

ahol az  $\mathbf{a}$  vektor tartalmazza a hibák létezését jellemző értékeket. Ebben a példában a hibák létezésének mértékéből egyértelműen eldönthető, hogy az 1. hiba létezésének az esélye a legnagyobb. Emellett a 2. és 3. hiba is fennáll, ezek mértéke azonban kisebb.

### 3/b. eset

Tegyük fel, hogy a tünetek megfigyelhetősége a következőképpen alakul:

$$(34) \quad \mathbf{b} = [0,9 \quad 0,6 \quad 0,6 \quad 0 \quad 0 \quad 0,8 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

Ebben az esetben megvizsgálva a megoldás létezésének szükséges és elégséges feltételét azt kapjuk, hogy

$$(35) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T \circ \mathbf{B} = [0,9 \quad 0,6 \quad 0,6 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \neq \mathbf{b},$$

tehát nem létezik megoldás. Látható, hogy a megoldás létezésének meghatározásához használt kifejezés mátrixának 6. eleme tér el a  $\mathbf{b}$  vektor megfelelő elemétől. A 3/a. esetben vizsgáltakkal összevetve megállapítható, hogy egy olyan tünetkombinációval van most

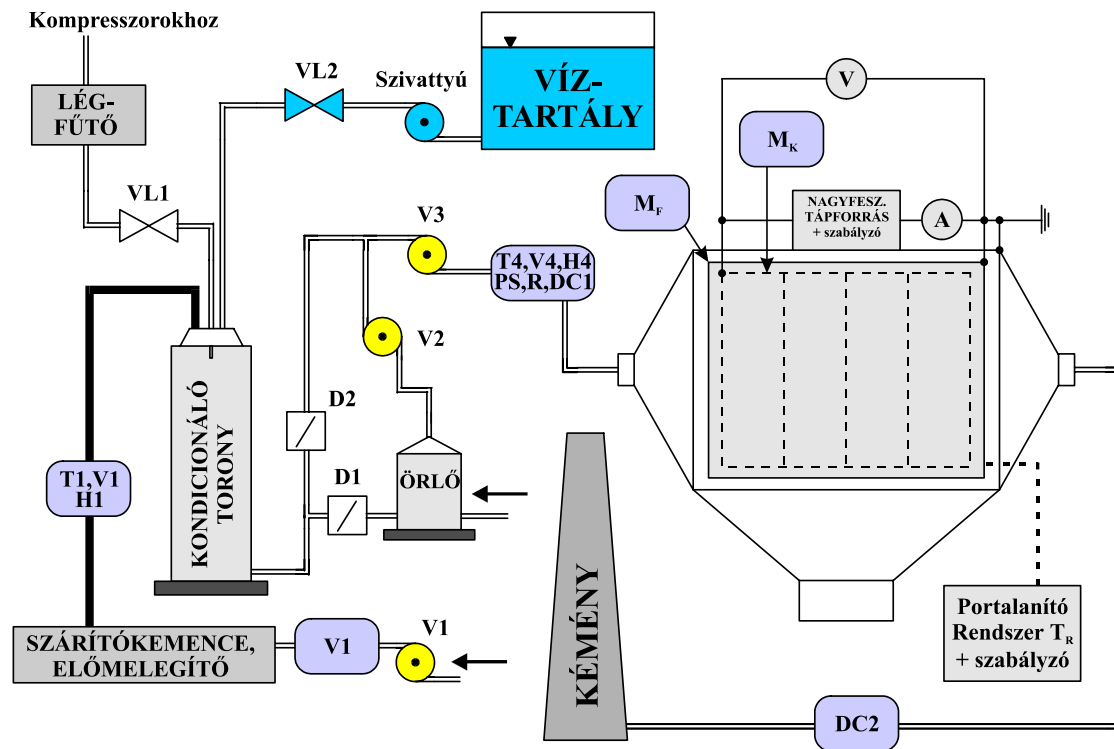
dolgunk, mely a hibák és a tünetek összefüggéseit figyelembe véve nem igazolható. Ekkor két eset lehetséges:

- a T6 tünet megfigyelhetőségét szolgáltató mérőműszer meghibásodott,
- egy olyan tünethez kapcsolódó műszer hibásodott meg, aminek mindig a 6. tünettől együtt kell előfordulnia. Ilyen tünet esetünkben a 4. tünet.

A fenti példából az is látható, hogy ha a rendszerben lévő mérőműszer meghibásodik, és hibás mérési eredményeket szolgáltat, akkor ez a hozzá tartozó tünet megfigyelhetőségét befolyásolja. Ez oda vezethet, hogy az adott tünetkombináció a hozzá tartozó megfigyelhetőségekkel semmilyen hiba létezésére sem vezethető vissza. Ez a felhasználó számára úgy jelentkezik, hogy az adott bemeneti paraméterekkel számolva nem létezik megoldás. Ha helyesen (a rendszer belső logikájának megfelelően) vettük fel a tudásbázist ( $R$  mátrixot), akkor ez egyértelműen a hibás mérési eredmény következménye. Ily módon lehetőség van a hibás mérések kiszűrésére.

#### 5.4.4. Elektrosztatikus porleválasztás

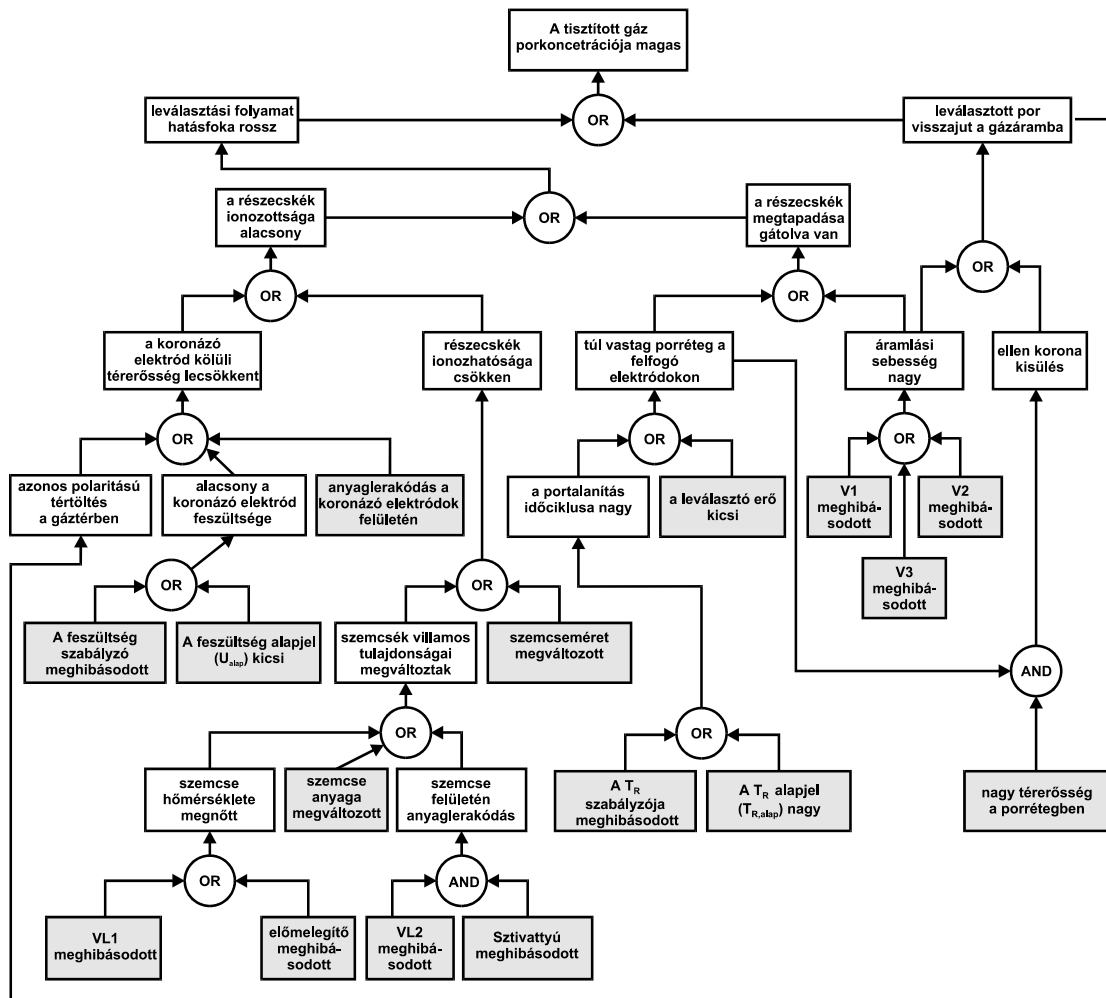
Ebben a fejezetben a 13. ábra szerint modellezett komplex elektrosztatikus rendszer hibadiagnosztikájára alkalmazzuk a számítógépes fuzzy diagnosztikai módszert. A kép egy cementgyártási folyamat egyszerűsített rajzát mutatja. Az őrlőmalomban a cementet a megfelelő szemcsenagyságúra őrlik. Ezt a port az előmelegítőből érkező gázzal szárítják, és ennek segítségével szállítják el a porleválasztóba. Itt a gyűjtőelektródokon lerakódott anyagot a portalanító rendszer segítségével eltávolítják a felfogó elektródokról és biztonságos helyen összegyűjtik. Bizonyos időközönként az őrlőmalmot kikapcsolják, és ilyenkor a szárításra használt gázt közvetlenül a porleválasztóba vezetik a D1, D2 szelepek segítségével. Ilyenkor magasabb hőmérsékletű gáz jutna a porleválasztóba, ezért az őrlőmalom előtt elhelyezett, és azzal sorba kapcsolt kondicionáló tornyot alkalmaznak. Ebben a toronyban vízpermetet juttatnak a légtérbe, mely ráakódva a lebegő részecskékre, a megfelelő hőmérsékletre hűti a gázt. Az őrlőmalom újraindításakor ismét visszaállítják az eredeti működési feltételeket. A modellben csak azt az üzemiállapotot vizsgálom, amikor az őrlőmalom működik [3][30].



13. ábra, Elektrosztatikus porleválasztás folyamatának modellje

Először az általunk kiválasztott csúcsesemények (nem kívánatos események) alapján meg kell határozni azt, hogy milyen jelenségeket nevezünk „hibának”. Esetünkben a szempont az lesz, hogy a kéménybe való belépés előtt elkerüljük a porkoncentráció növekedését (az átlagosnak mondható értékhez képest). A nemkívánatos csúcsesemény tehát ezek alapján a tisztított gáz magas porkoncentrációja. Azokat az eseményeket, rendszerállapotokat tehát, melyek közvetve vagy közvetlenül ehhez a nemkívánatos eseményhez vezethetnek, hibáknak fogom nevezni. A 14. ábra ezt az elemzést szemlélteti [15][20][21]. Az ábrán legfelül látható a csúcsesemény, a magas porkoncentráció. Ez az esemény csak két esetben fordulhat elő. Vagy valamilyen ok miatt a porleválasztás hatásfoka leromlott, vagy a már leválasztott por visszajut a gázáramba. Mivel ezek a körülmények egymástól függetlenül is a nemkívánatos csúcseseményhez vezethetnek, ezért logikai VAGY kapcsolattal kötődnek a csúcseseményhez. Ehhez hasonlóan tovább haladhatunk az események előfeltételeinek visszafejtésében. Végül eljutunk azokhoz az eseményekhez, melyeket az ábrán szürke téglalappal jelöltünk. Ezeket nevezzük a kiválasztott csúcseseményt figyelembe véve a rendszer hibáinak. Érdeemes megemlíteni, hogy a kiválasztott csúcsesemény szerint csak azokkal a hibákkal foglalkozom, melyek az őrlőmalom bekapcsolt állapota mellett fordulnak

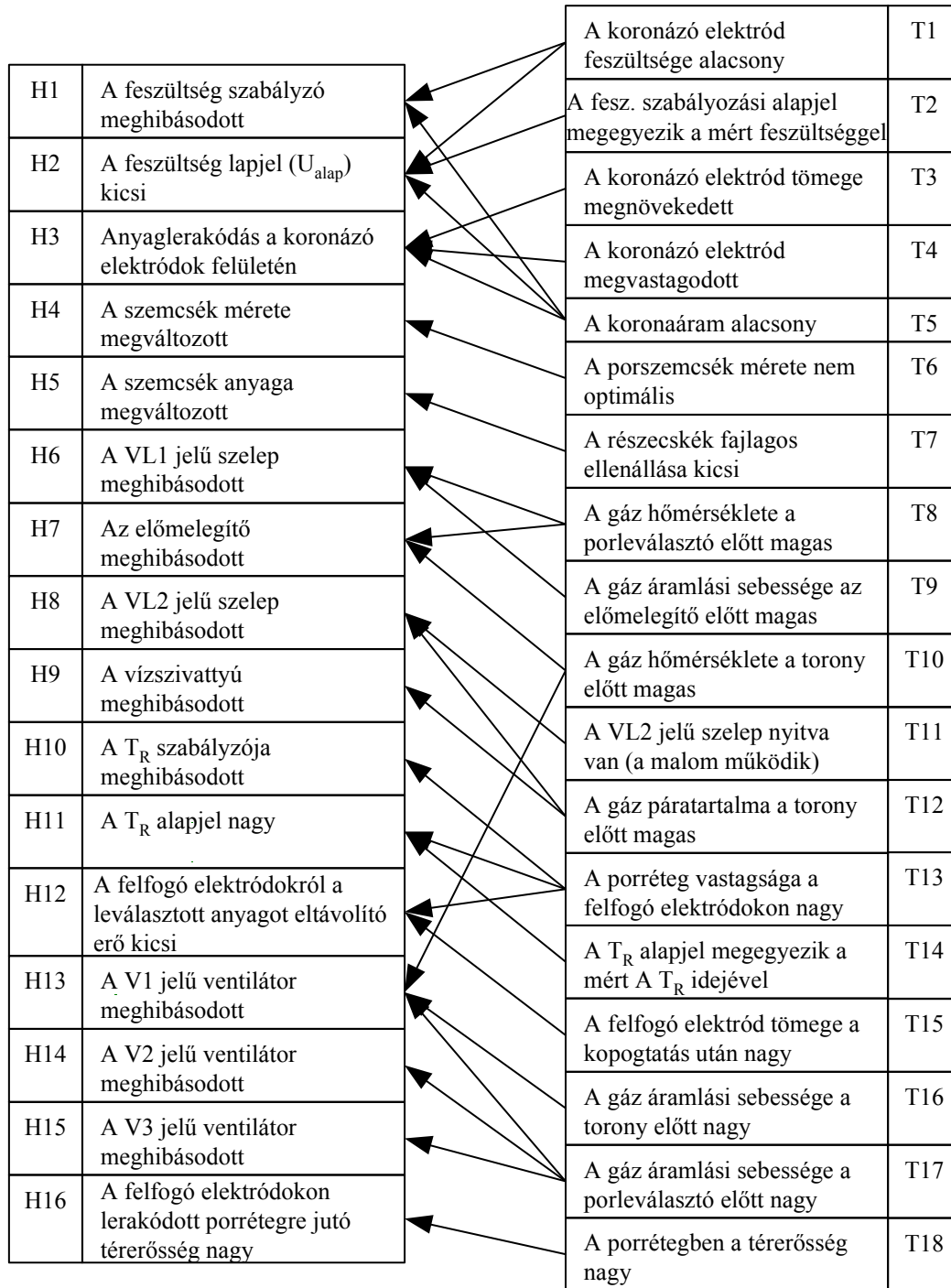
elő, hiszen csak ebben az esetben van jelen por a légtérben, a porkoncentráció csak ilyenkor lehet magas.



14. ábra, Hibák meghatározása hibafával (porleválasztó)

Ezt követően a tüneteket határozom meg. Tüneteknek azokat a jelenségeket neveztem el, melyek az előbb felsorolt hibákkal ok-okozati kapcsolatban vannak, és bekövetkezésük illetve intenzitásuk valamilyen módon érzékelhető. Az előzőekben leírt módszerek valamelyikével (vagy mindegyikével) meg kell határozni, hogy milyen tünetek jelezhetik számunkra a fenti hibák létezését. A 15. ábrán a hibákhoz kapcsolódó tüneteket láthatjuk. Az ábrából könnyen látható, hogy egy tünet esetleg több hiba létezésére is utalhat, illetve egy hiba létezését több tünet együttese jelezheti [3].





15. ábra, Hibák és tünetek kapcsolata (porleválasztás)

A tünetek ismeretében definiálni lehet azokat a fizikai mennyiségeket, vagy érzékelési módokat, melyekkel az egyes tünetek létezéséről gyűjtök információt. Az 5. táblázatban ezeket foglaltam össze. A felvázolt modellben számos helyen mérjük a tüneteket jellemző fizikai mennyiségeket. A kondicionáló torony előtt megmérjük a gáz hőmérsékletét, páratartalmát és áramlási sebességét. Mielőtt a gáz belépne a porleválasztóba, megmérjük a

hőmérsékletét, az áramlási sebességét, a páratartalmát, a részecskék szemcsenagyságát, fajlagos ellenállását, valamint a porkoncentrációt. A porleválasztó esetében mérjük a koronázó elektródokra kapcsolt feszültséget, az elektród tömegét, valamint a koronaáramot, a felfogó elektródok tömegét és a felfogó elektródra lerakódott porrétegben a térerősséget. A portalanító rendszer szabályzójának időállandója egy előre beállított érték, tehát ezt ismertnek feltételezzük, a valós kopogtatási időt megmérjük. Mielőtt a tisztított gáz belépne a kéménybe, megmérjük a gáz porkoncentrációját is. Ezt követően meg kell adni azokat a fuzzy tagsági függvényeket, melyek egy adott tünet és a hozzá kapcsolódó fizikai mennyiség pillanatnyi értéke között teremtenek kapcsolatot, azaz megadják a tünetek létezését jellemző megfigyelhetőségi mértéket (ld. előző fejezet). Ezek segítségével és a tünetekhez kapcsolódó mennyiségek folyamatos detektálásával minden időpillanatban információval rendelkezhetünk a tünetek megfigyelhetőségi mértékéről.

<i>A tünet kódja</i>	<i>A tünet leírása</i>	<i>A megfigyelés módja</i>
T1.	A koronázó elektród feszültsége alacsony.	feszültségmérés
T2.	A fesz. szabályozási alapjel megegyezik a mért feszültséggel	feszültségmérés
T3.	A koronázó elektród tömege megnövekedett.	súlymérés
T4.	A koronázó elektród megvastagodott.	megfigyelés, súlymérés
T5.	A koronaáram alacsony.	árammérés
T6.	A porszemcsék mérete nem optimális.	részecskeátmérő mérése
T7.	A részecskék fajlagos ellenállása kicsi.	fajlagos ellenállás mérése
T8.	A gáz hőmérséklete a porleválasztó előtt magas.	hőmérséklet mérése
T9.	A gáz áramlási sebessége az előmelegítő előtt magas.	áramlási sebesség mérése
T10.	A gáz hőmérséklete a torony előtt magas.	hőmérséklet mérése
T11.	A VL2 jelű szelep nyitva van (miközben az őrlőmalom működik).	automatikus állapotjelzés
T12.	A gáz páratartalma a torony előtt magas.	páratartalom mérése
T13.	A porréteg vastagsága a felfogó elektródokon nagy.	súlymérés
T14.	A $T_R$ alapjel megegyezik a mért $T_R$ idejével.	időmérés, megfigyelés
T15.	A felfogó elektród tömege a kopogtatás után nagy.	súlymérés
T16.	A gáz áramlási sebessége a torony előtt nagy.	áramlási sebesség mérés
T17.	A gáz áramlási sebessége a porleválasztó előtt nagy.	áramlási sebesség mérés
T18.	A porrétegben a térerősség nagy.	térerősség mérése

### 5. táblázat, A tünetek megfigyelésének módja (porleválasztás)

A fentiek ismeretében meghatározom az elektrosztatikus rendszerben előforduló hibák, és az ezeket jelző tünetek kapcsolatát leíró  $\mathbf{R}$  mátrixot. Ehhez a 15. ábra elkészítésével megtettem az első lépést, meghatároztam, hogy mely tünetek milyen hibák létezését jelzik egyáltalán. A tünetek és a hibák kapcsolatát mutató nyilak azonban még csupán a kapcsolat létezését jelzik, nem hordoznak információt a kapcsolat erősségére vonatkozóan.

A következő mátrixban a sorok az elektrosztatikus rendszerben definiált hibákat, az oszlopok pedig a tüneteket reprezentálják. Az oszlopok és sorok sorszámai megegyeznek a hibákat és tüneteket összefoglaló ábra sorszámozásával. Ennek megfelelően az  $\mathbf{R}_{ij}$  értéke megmutatja az  $i$ -edik hiba és a  $j$ -edik tünet között fennálló kapcsolat erősségét. A mátrixban szereplő adatokat szakértők tudására alapozva határoztam meg. Itt szeretném felhívni a figyelmet, hogy már egy ilyen egyszerű elektrosztatikus rendszer esetében is az 5.3 fejezetben definiált komplex rendszerrel van dolgunk, hiszen a mátrix mérete megfelel az ott definiált kritériumnak.

A következőkben a komplex elektrosztatikus rendszerünkre vonatkozóan három esetet fogunk megvizsgálni a 11.3.2 fejezetben leírt módszer szerint. A számításokat egy erre a célra fejlesztett számítógépes program segítségével végeztem, mely a tudásbázis ( $\mathbf{R}$  mátrix) és a tünetek megfigyelhetősége ( $\mathbf{b}$  vektor) ismeretében meghatározza a hibák létezésének alsó és felső korlátját, valamint vizsgálja a megoldás létezésének szükséges és elégséges feltételét (117)-es egyenlet) [12].

$$(36) \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7 & 0,5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,8 & 0,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0,8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

### 1. eset

A fent definiált mérések és megfigyelések alapján azt feltételezem, hogy a rendszer működése közben egyik tünet sem jelentkezik, tehát minden tünet megfigyelhetősége 0. Ez azt jelenti, hogy a  $\mathbf{b}$  vektor (a tünetek megfigyelhetőségi mértékét tartalmazó vektor) elemei mind 0-k:

$$(37) \quad \mathbf{b} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

A megoldás akkor és csak akkor létezik, ha a (117)-es egyenletet kielégítik a fenti  $\mathbf{b}$  vektor és az  $\mathbf{R}$  mátrix értékei. A számítást elvégezve könnyen belátható, hogy

$$(38) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T \circ \mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] = \mathbf{b},$$

tehát létezik megoldás. Meghatározva a hibák létezésének felső korlátját azt kapjuk, hogy

$$(39) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

majd ehhez hasonlóan az alsó korlátra is 0-k adódnak.

$$(40) \quad \max(\phi(\mathbf{S}^*))^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Ezzel a vizsgálattal itt is igazoltam azt a - józan ésszel is belátható - tényt, hogy ha a rendszerben nincsenek hibát jelző tünetek, akkor hibák létezése nem bizonyítható.

**2. eset**

A második esetben azt vizsgálom, hogy milyen eredmény adódik akkor, ha a mérések és megfigyelések alapján minden tünet a lehető legnagyobb mértékben megfigyelhető. Itt kell felhívni a figyelmet arra, hogy megoldás létezése mellett a tünetek maximális megfigyelhetősége az  $\mathbf{R}$  mátrixtól függ, nem minden esetben 1. Akkor lehet ez a maximális megfigyelhetőség 1-nél kisebb, ha az adott tünet egyik hibát sem jelzi biztosan, az  $\mathbf{R}$  mátrixnak a tünehez tartozó oszlopában egyik elem sem 1. A tünetek meghatározásánál arra kell törekedni, hogy minél kevesebb legyen az ilyen tünetek száma, de adódhatnak olyan esetek, mikor ez elkerülhetetlen. Esetünkben a megoldás létezése melletti maximális megfigyelhetőség a következőképpen alakul:

$$(41) \mathbf{b} = [1 \ 0,5 \ 1 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,8 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 0,9 \ 1].$$

Ilyen  $\mathbf{b}$  vektorral számolva tehát az adódik a hibák létezésének felső korlátjára, hogy

$$(42) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1],$$

Az alsó korlát meghatározásánál az adódik, hogy

$$(43) \max(\phi(\mathbf{S}^*))^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0,9 \ 1], \text{ vagy}$$

$$(44) \quad \max(\phi(\mathbf{S}^*))^T = [1 \ 0,5 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,8 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0,8 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0,9 \ 1].$$

A fenti három egyenletből látható, hogy ennek a problémának két megoldása is van. Az első megoldást a (42) és (43) egyenletekben, a második megoldást pedig a (42) és (44) egyenletekben olvashatjuk. Ebben az esetben az első megoldás szerint a 9., 10., 11., 14. és a 15. hibát kivéve minden hiba létezése az 1 és az 1 érték között van, tehát 1. Öt esetben azonban a létezés alsó korlátja kisebb mint 1. A 9. hibára például azt kaptuk, hogy 0 és 1 között van a létezésének mértéke, ugyanúgy lehet 0,9, mint 0,21. Az eredmény teljes bizonytalanságot mutat. Nézzük meg, mi lehet ennek a hátterében.

A 9. hiba a vízszivattyú meghibásodását jelzi. Az általunk definiált  $\mathbf{R}$  mátrix szerint ezt a hibát összesen egy tünet implikálja, a 12. tünet (A gáz páratartalma a torony előtt magas). Azt is láthatjuk, hogy a 12. tünet nem kizárólag erre a hibára utalhat, hanem a 8. hibára is. A 8. hibát viszont más (a 12. tünettől különböző) tünet is implikálja. Mivel a  $\mathbf{b}$  vektort úgy

választottuk meg, hogy a lehető legnagyobb értékek szerepeljenek az elemeiben (41), ezért az adott modellben nem lehet eldönteni, hogy a 12. tünet létezése a 8. vagy a 9. hiba létezésének a következménye. Ez a bizonytalanság fejeződik ki a 0 és 1 közötti megoldásban. Ha például a 11. tünet nem létezne, akkor egyértelműbb lenne a helyzet, mert a 8. hiba létezésének igazolásához ez hiányozna. Következésképp a 11. tünet csak a 9. hiba következtében állhatna fenn. Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy az  $\mathbf{R}$  mátrixban meghatározott hiba-tünet kombinációk miatt a rendszerünk bizonyos hibákra nézve „bizonytalan” diagnosztikai rendszer. Ha ezt meg akarjuk szüntetni, akkor az eddig bizonytalan hibákat jelző újabb tüneteket és a tünetekhez kapcsolódó méréseket, megfigyeléseket kell felvennünk, az  $\mathbf{R}$  mátrixot és a  $\mathbf{b}$  vektort ennek megfelelően kell módosítanunk.

A 10., 11., 14. és 15. hibák esetében hasonló okokra vezethető vissza a kapott eredmény. Az ebben az esetben vázolt módszerrel könnyen kiszűrhetjük rendszerünknek a hibadiagnosztika szempontjából „gyenge” pontjait. A rendszer tesztelésének fázisában ez a módszer hasznos eredményeket szolgáltatathat.

### 3/a. eset

Végül egy olyan esetet vizsgálunk, amikor bizonyos tünetek különböző mértékben megfigyelhetőek, mások viszont nem. A tünetek megfigyelhetőségét jellemző  $\mathbf{b}$  vektor a következőképpen nézzen ki:

$$(45) \quad \mathbf{b} = [0 \ 0 \ 1 \ 0,8 \ 0,6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Ezt behelyettesítve a megoldás létezésének szükséges és elégséges feltételét leíró egyenletbe azt kapjuk, hogy

$$(46) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T \circ \mathbf{B} = [0 \ 0 \ 1 \ 0,8 \ 0,6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] = \mathbf{b},$$

tehát létezik megoldás. Ez a következőképpen néz ki:

$$(47) \quad [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \leq \mathbf{a} \leq [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \text{ ahol}$$

$\mathbf{a}$  vektor tartalmazza a hibák létezését jellemző értékeket. Ebben a példában a hibák létezésének mértékéből egyértelműen eldönthető, hogy az 3. hiba létezésének az esélye a legnagyobb.

### 3/b. eset

Tegyük fel, hogy a tünetek megfigyelhetősége a következőképpen alakul:

$$(48) \quad \mathbf{b} = [0 \ 0,3 \ 1 \ 0,8 \ 0,6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Ebben az esetben megvizsgálva a megoldás létezésének szükséges és elégséges feltételét azt kapjuk, hogy

$$(49) \quad \min(\mathbf{R} \alpha \mathbf{b})^T \circ \mathbf{B} = [0 \ 0 \ 1 \ 0,8 \ 0,6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \neq \mathbf{b},$$

tehát nem létezik megoldás. Látható, hogy a megoldás létezésének meghatározásához használt kifejezés vektorának 2. eleme tér el a  $\mathbf{b}$  vektor megfelelő elemétől. A 3/a. esetben vizsgáltakkal összevetve megállapítható, hogy egy olyan tünetkombinációval van most dolgunk, mely a hibák és a tünetek összefüggéseit figyelembe véve nem igazolható. A 15. ábrát megvizsgálva láthatjuk, hogy a T2 tünet csak a T1 és T5 tünetekkel együtt jelentkezhet. Mivel a T1 tünet esetünkben nem megfigyelhető, ezért most nem létezik megoldás. Ekkor két eset lehetséges:

- A T2 tünet megfigyelhetőségét szolgáltató mérőműszer meghibásodott és valójában ez a tünet nem áll fenn. Ekkor továbbra is csak a H3 hiba létezik.
- A T1 tünet megfigyelhetőségét szolgáltató mérőműszer meghibásodott és valójában ez a tünet is fennáll. Ebből következően a H3 mellett a H2 hiba is létezik.

A fenti példából az is látható, hogy ha a rendszerben lévő mérőműszer meghibásodik, és hibás mérési eredményeket szolgáltat, akkor ez a hozzá tartozó tünet megfigyelhetőségét befolyásolja. Ez oda vezethet, hogy az adott tünetkombináció a hozzá tartozó megfigyelhetőségekkel semmilyen hiba létezésére sem vezethető vissza. Ez számunkra úgy jelentkezik, hogy az adott bemeneti paraméterekkel számolva nem létezik megoldás. Ha helyesen (a rendszer belső logikájának megfelelően) vettem fel a tudásbázis  $\mathbf{R}$  mátrixát, akkor ez egyértelműen a hibás mérési eredmény következménye. Ily módon lehetőségünk van a hibás méréseket kiszűrni.

Itt kell megjegyezni, hogy elméletben előfordulhatnak olyan esetek is, amikor egy adott hibára utaló összes tünet megfigyelhetőségét szolgáltató összes objektum meghibásodik oly módon, hogy mindegyikük a hiba létezését, vagy nem létezését támasztja alá. Ilyenkor természetesen sem a fenti módszerrel sem más következtető eljárással nem lehet kiszűrni ezeket a meghibásodásokat. Ennek a problémának az elkerülésére érdemes úgy meghatározni a tüneteket, hogy azok megfigyelhetősége több megfigyelés eredményeképpen jöjjön létre. Mivel az egymástól független események (a megfigyelés végző objektumok meghibásodása) bekövetkezésének valószínűsége lényegesen kisebb, mint egyetlen esemény bekövetkezési valószínűsége, ezért így jelentősen csökkenthető az ilyen jellegű problémák előfordulási valószínűsége. Egy másik lehetőség a megfigyelést végző objektumok redundáns telepítése. Itt is az előző elvet alkalmazzuk, csak nem a különböző megfigyeléseket végző objektumok számát, hanem egy adott megfigyelést végző objektumok számát növeljük.



## 6. Léggöri elektrosztatikus eredetű veszélyek vizsgálata

Az ipari elektrosztatikus veszélyek mellett az elektrosztatikus feltöltődésből származó veszélyek másik nagy csoportja a léggöri elektrosztatikus feltöltődésre vezethető vissza. Mivel az ilyen jellegű feltöltődések lényegesen más fizikai környezetben, más fizikai paraméterekkel jönnek létre, ezért az elektrosztatikus veszélyeken belül érdemes külön tárgyalni ezeket. Hatásuk és az ellenük való védekezés is eltér az ipari elektrosztatikában tapasztalttól és alkalmazottól. A továbbiakban a „léggöri elektrosztatikus eredetű veszélyek”, valamint a „villámcsapásból eredő veszélyek” egyenértékű fogalmakként szerepelnek. Ebben a fejezetben arra keresem a választ, hogy a rendelkezésre álló, adott minőségű és mennyiségű információ alapján, valamint a villámcsapásból eredő kockázat felmérésén keresztül miképpen lehet valós információkat szolgáltatni a védekezés megtervezéséhez. Magának a védekezésnek a módszerei nem képezik a munka tárgyát.

### 6.1. A kockázat megítélése a klasszikus módszerből kiindulva

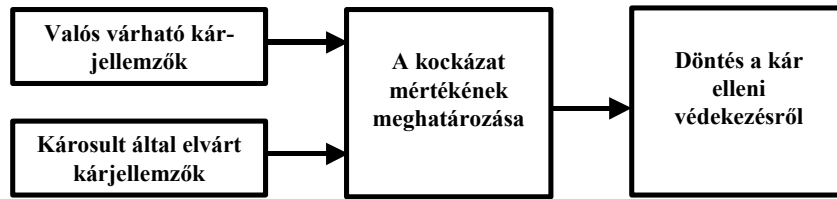
A villámcsapásból eredő kockázat meghatározásának egy újfajta módszerét mutatják a 16. és 17. ábrákon látható blokkvázlatok. A módszer a klasszikus módszerből kiindulva arra a gondolatra épül, hogy a kockázat mértékének és a védekezés szükségességének megítélése nem a teljes kár egy általános érvényű mérőszámának való megfeleltetése alapján történik (pl.  $10^{-5}$  teljes kár/év), hanem a különböző lehetséges károknak a számítások során meghatározott jellemzőit összehasonlítjuk a károsultak által a károkra felállított követelményekkel. Ehhez természetesen a számítással meghatározott és a károsultak által megfogalmazott kárjellemzőknek összehasonlíthatóknak kell lenniük, azaz azonos dimenzióval kell rendelkezniük. Mivel általában véve a káresemények és azok kezelése napjainkban erősen összefügg a különböző biztosító társaságok által forgalmazott biztosítási konstrukciókkal, termékekkel, ezért az ott megszokott és alkalmazott dimenziót, a pénz egységét (Euro) választjuk az összehasonlítás alapjának. A káresemények számított és a károsultak által meghatározott jellemzők tehát Euro/év alakban lesznek megadva.

További különbség a klasszikus módszerhez képest az, hogy a számítás során felhasznált adatok és számítási módszerek pontatlanságát és közelítéseit kezelni kell. Itt általában nem a

pontatlanságok kiküszöböléséről, hanem olyan fogalmak és mennyiségek bevezetéséről, számításáról van szó, melyek a kapott eredményben megjelenítik a számítás során felmerült hiányosságokat és ezek figyelembe vételével tudjuk az eredményeket értékelni. Bizonyos esetekben javaslatot teszünk bizonyos egyszerűsítések közelítő módszerrel való helyettesítésére is.

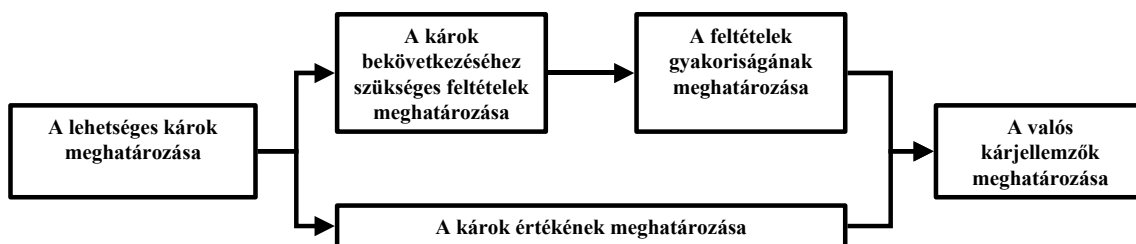
Ebben a kockázatkezelési koncepcióban a lehetséges károkat elkülönítetten kezelem. Ez lehetővé teszi a differenciált kockázat-meghatározást, láthatóvá válnak a kockázat súlypontjai, és a védekezés is ennek figyelembevételével alakítható ki. A számítások során a fuzzy matematika eszközeit alkalmazzuk [4].

A 16. ábrának megfelelően a kockázat meghatározásának célja tulajdonképpen egy döntés meghozatalának alátámasztása, mely kimondja a villámcsapás okozta károk elleni védekezés szükségességét, illetve bemeneti információt szolgáltat a védekezés módjának meghatározásához. A „védekezés” fogalmát most tágabb értelemben használom, nem csupán a primer és szekunder villámvédelem megtervezésére és kiépítésére gondolok. A „védekezés” lehet minden olyan tevékenység, mely a villámcsapás okozta károk következtében keletkező anyagi kiadások kiküszöbölését célozzák. Mint ilyen, ennek egy módszere lehet pl. a villámvédelmi rendszer kiépítése is, de ugyanúgy jelentheti egy megfelelő kárbiztosítási szerződés megkötését is, vagy egyéb pénzügyi manipuláció végrehajtását az esetleges károkhoz kapcsolódó kiadások fedezésére. Adott esetben védekezést jelenthet pl. a veszélyeztetett berendezések elköltöztetése is. Ehhez egy olyan mérőszámot határoztam meg, mely jellemzi a számítások során meghatározott kárjellemzők, és a károsult által felállított követelményrendszer közötti különbséget. A mérőszám a számított kárjellemzők és a követelményrendszer összevetésén keresztül határozandó meg. A károsultak követelményrendszere tulajdonképpen az egy évre vetített, a károsult számára még elfogadható pénzügyi kiadást határozza meg. Ezeknek az adatoknak a meghatározási módszerével nem foglalkozom. Azt feltételezem, hogy ezek az információk egy későbbiekben meghatározott formátumban rendelkezésre állnak.



16. ábra, A villámcsapás okozta károk elleni védekezés alapja

A valós várható kárjellemzők meghatározása a 17. ábra alapján történik. Első lépésben meg kell határozni azokat a káreseményeket, melyek a vizsgálandó objektum esetében az épületet vagy annak környezetét ért villámcsapás következtében szóba jöhetnek (pl. levezetők szakadása, számítógépek megrongálódása, tűz, stb.). A potenciális káresemények listájának birtokában kétfajta vizsgálat kezdhető el. Az egyik típusú vizsgálat során megállapítom a káresemények pénzügyi következményeit, a másik típusúnál pedig a káresemények gyakoriságát (frekvenciáját). A pénzügyi következményeket kutató vizsgálat számomra nem érdekes, eredményeit adottnak veszem. A káresemények frekvenciájának meghatározásához először azokat az előfeltételeket kell meghatározni (a későbbiekben bemutatott módon), melyek a kár bekövetkezéséhez szükségesek. Olyan előfeltételekig kell eljutnom, melyek frekvenciáját valamilyen módszerrel meg lehet határozni. Az előfeltételek frekvenciájának ismeretében magának a kárnak az előfordulási gyakorisága meghatározható. A károk frekvenciájának és értékének felhasználásával a valós várható kárjellemző kiszámítható.



17. ábra, A valós várható kárjellemzők meghatározásának blokkvázlata

### 6.1.1. A lehetséges károk meghatározása

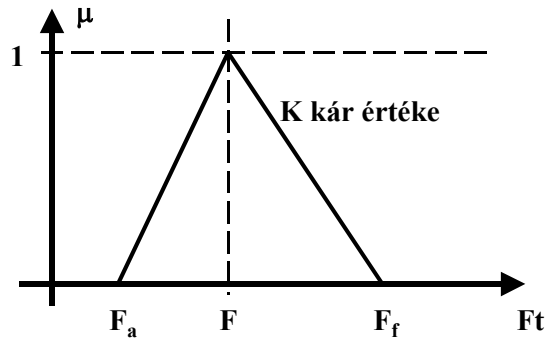
A villámcsapás következtében kialakuló káreseményeket alapvetően két csoportra oszthatjuk. Az 1. csoport közvetlenül a villámcsapás (hő, villamos, elektrodinamikai, stb.) hatására

bekövetkező *elsődleges káreseményeket*, míg a 2. csoport az ezen elsődleges események következményeképpen kialakuló *másodlagos káreseményeket* (pl. Internetes kezelői felületű villamosenergia-piac web-szerverének kiesése következtében kialakuló kereskedelmi problémák) gyűjti össze. Az elsődleges és másodlagos káresemények külön-külön kezelendők a káresemények értékének meghatározásánál. A káresemények előfeltételeinek vizsgálata esetén is külön káreseményként kell kezelni minden elsődleges és másodlagos káreseményt, a másodlagos eseményeknél azonban előfeltételként fog megjelenni egy elsődleges káresemény. Az előfeltételek gyakoriságának meghatározása során tehát először az elsődleges káresemények előfeltételeinek gyakoriságát, majd a másodlagos káresemények előfeltételeinek gyakoriságát kell meghatározni [24]. A továbbiakban csak a „káresemény” kifejezést használom, de a fenti megállapítások továbbra is érvényben maradnak.

### **6.1.2. A károk értékének meghatározása**

A lehetséges káresemények összegyűjtését követően meghatározom a káresemények piaci értékét. A meghatározásnak a módja kívül esik érdeklődési körünkön. Számomra az a fontos, hogy ez a munka mindig elvégezhető (pl. az eredeti állapot visszaállítását vagy más alapelvet figyelembe véve).

A károk értékének meghatározásánál olyan eseményekkel kapcsolatban kell nyilatkozni, melyek a jövőben, bizonytalan időben fognak megtörténni, egészen pontosan nem látható körülmények között. Például egy számítógép processzorának meghibásodása következtében szükségessé váló csere a hardverárak ingadozása és trendje miatt csak bizonyos mértékű bizonytalansággal adható meg. A vizsgált objektum berendezéseinek pontos specifikációját sem ismerhetjük pl. egy épület tervezési fázisában, stb. Ezen kívül bizonyos pénzügyi vagy más gazdasági folyamatok is befolyással lehetnek a károk bekövetkezéskori értékének alakulására. A károk jellegétől függően ezek a hatások eltérő mértékűek lehetnek, a hatások számossága változhat de mindenképpen jelen vannak, tehát „számolni” kell velük.



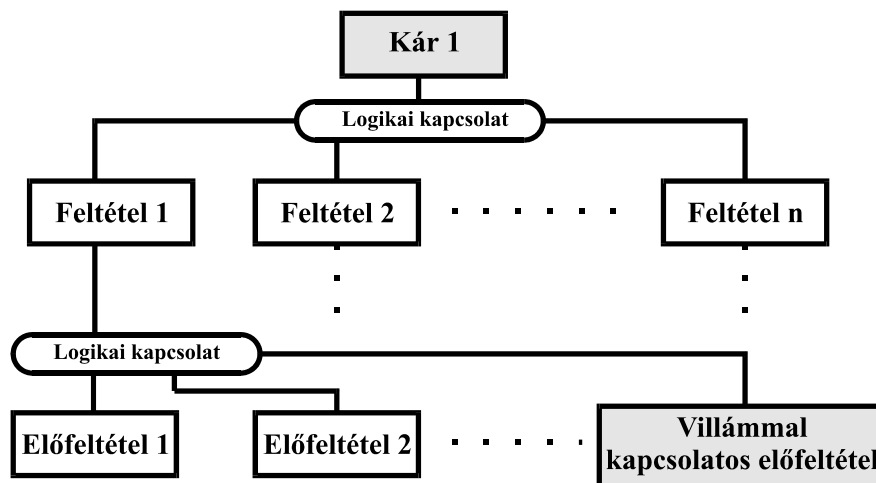
18. ábra, A kár értékének megadása

A károk értékének meghatározásakor tehát mindenképpen szembesülnünk kell azzal, hogy a kiszámított érték bizonytalan. Bár ezt a bizonytalanságot a jövőre vonatkozó információ hiányában nem tudjuk kiküszöbölni, de a kár értékének megadásakor a bizonytalanságot leíró információt is figyelembe vehetjük. Ha a  $K$  kár várható értékét a 18. ábrának megfelelően egy fuzzy számmal jellemezzük, akkor az  $F_a$  és  $F_f$  értékek segítségével megadhatjuk a függvény magjához ( $\mu = 1$ -hez) tartozó  $F$  érték bizonytalanságát is. Minél pontosabb a kár értékének becslése  $F_a$  és  $F_f$  értékek annál közelebb esnek  $F$ -hez. Ilyen módon kell megadni minden kár várható fuzzy értékét. A fuzzy tagsági függvény pontos alakja elvileg szabadon választható. Az értékek meghatározásában rejlő bizonytalanságok és a számítások egyszerűsége miatt azonban nem célszerű sokkal bonyolultabb menetű függvényt választani.

### 6.1.3. A károk bekövetkezéséhez szükséges feltételek meghatározása

A károk értékének meghatározásával párhuzamosan el kell végezni a károk előfeltételeinek meghatározását. Az elsődleges és másodlagos károk esetében a feladat nem különbözik. A definícióból adódóan a másodlagos károk előfeltételei között szerepel legalább egy elsődleges vagy egy másodlagos kár. Az előfeltételek összegyűjtéséhez és logikai összefüggéseik ábrázolásához a már jól bevált hibafa analízist használom, a 19. ábrán látható módon [10]. Egy kiválasztott kár esetén felsorolom azokat a feltételeket melyek megléte közvetlenül szükséges a káresemény bekövetkezéséhez. Ezek meghatározott logikai kapcsolaton (ÉS, VAGY) keresztül kapcsolódnak a káreseményhez. Ezután azokat a feltételeket határozom meg, melyek az előbb definiált feltételek szükséges előzményei [5]. Mivel a folyamat legelején olyan káreseményeket gyűjtöttünk össze, melyek a vizsgált objektum vagy annak

környezetét ért villámcsapás következtében jöttek létre, ezért várható, hogy az előfeltételek keresése folyamán eljutok egy olyan előfeltételhez is, mely magával a villámmal van kapcsolatban. Mivel a villámcsapás okozta károk minden esetben kapcsolatba hozhatók a villám valamely fizikai tulajdonságával (villámparaméterrel), és a becsapás helyével, ezért a villámmal kapcsolatos előfeltételek tulajdonképpen a villámparaméterekre és a becsapás helyére vonatkozó előfeltételeket jelentik. Az előfeltételek keresését mindaddig folytatni kell, amíg olyan feltételekhez nem érünk, melyek előfordulási gyakoriságáról adattal rendelkezünk, vagy valamilyen módon számítani tudjuk [2][32].



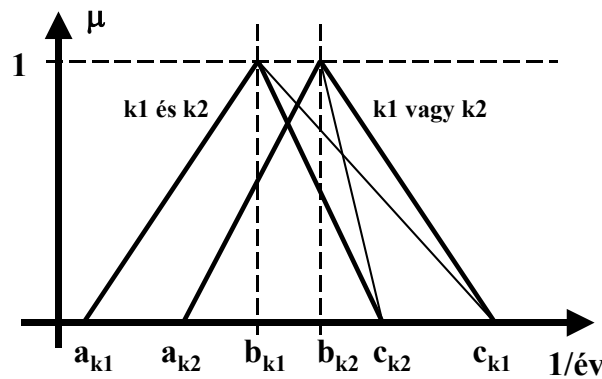
19. ábra, A kár villámmal kapcsolatos előfeltételének meghatározása

#### 6.1.4. A károk előfordulási gyakoriságának meghatározása

Egy adott kár előfordulási gyakoriságát a kárhoz tartozó előfeltételek előfordulási gyakorisága alapján határozom meg [1/év] dimenzióban. A károk értékének megadásához hasonlóan az előzmények gyakoriságát is fuzzy számok segítségével fogom megadni. Ha a hibafa  $k_1, k_2, \dots, k_n$  előfeltételeinek  $N_{k_1}, N_{k_2}, \dots, N_{k_n}$  előfordulási gyakoriságai háromszög alakú  $(a_{k_1}, b_{k_1}, c_{k_1}), (a_{k_2}, b_{k_2}, c_{k_2}), \dots, (a_{k_n}, b_{k_n}, c_{k_n})$ , adatokkal megadott fuzzy számok formájában ismertek, és ezek az előfeltételek logikai ÉS kapcsolaton keresztül kapcsolódnak az őket logikailag közvetlenül megelőző  $(k-1)$  előfeltételhez, akkor az  $N_{(k-1)}$  előfordulási gyakoriságot a következőképpen határozhatjuk meg:

$$(50) \quad \begin{aligned} a_{(k-1)l} &= \min_n(a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}), \\ b_{(k-1)l} &= \min_n(b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{kn}), \\ c_{(k-1)l} &= \min_n(c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kn}). \end{aligned}$$

A fenti egyenletben  $a_{(k-1)l}$  és  $c_{(k-1)l}$  jelentik az  $N_{(k-1)l}$  előfordulási gyakoriságot jellemző fuzzy szám tagsági függvényének a vízszintes tengellyel való metszéspontjának a helyét, míg  $b_{(k-1)l}$  az  $N_{(k-1)l}$  tagsági függvény maximumának a helyét adja meg (20. ábra).



20. ábra, Egy kár előfordulási gyakoriságának meghatározása fuzzy számokkal

Ha a hibafa  $k1, k2, \dots, kn$  előfeltételeinek  $N_{k1}, N_{k2}, \dots, N_{kn}$  előfordulási gyakoriságai háromszög alakú  $(a_{k1}, b_{k1}, c_{k1}), (a_{k2}, b_{k2}, c_{k2}), \dots, (a_{kn}, b_{kn}, c_{kn})$  adatokkal megadott fuzzy számok formájában ismertek, és ezek az előfeltételek logikai VAGY kapcsolaton keresztül kapcsolódnak az őket logikailag közvetlenül megelőző  $(k-1)l$  előfeltételhez, akkor az  $N_{(k-1)l}$  előfordulási gyakoriságot a következőképpen határozhatjuk meg:

$$(51) \quad \begin{aligned} a_{(k-1)l} &= \max_n(a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}), \\ b_{(k-1)l} &= \max_n(b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{kn}), \\ c_{(k-1)l} &= \max_n(c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kn}). \end{aligned}$$

A fenti egyenletben  $a_{(k-1)l}$  és  $c_{(k-1)l}$  jelentik az  $N_{(k-1)l}$  előfordulási gyakoriságot jellemző fuzzy szám tagsági függvényének a vízszintes tengellyel való metszéspontjának a helyét, míg  $b_{(k-1)l}$  az  $N_{(k-1)l}$  tagsági függvény maximumának a helyét adja meg. A fenti műveletek grafikus ábrázolása a 20. ábrán látható. A fenti számításokat elvégezve a teljes hibafára, a vizsgált kár

előfordulási gyakorisága meghatározható. Az eredmény egy háromszög alakú fuzzy szám formájában adódik.

### 6.1.5. A villámmal kapcsolatos előfeltétel gyakoriságának meghatározása

Ezek után rátérek az előfeltételek előfordulási gyakoriságának meghatározására. Az eddigi vizsgálatokban nem tettem megkötéseket az előfeltételek minősége alapján. Egy adott kár bekövetkezéséhez szükséges előfeltételek között azonban - a villámra vonatkozó előfeltétel mellett – számos, nem a villámhoz kapcsolódó előfeltétel is lehet. A gyakoriságuk meghatározása szempontjából ezeket két csoportra oszthatjuk. Az 1. csoportba azokat az előfeltételeket soroljuk, melyek a vizsgálat időpontjában és várhatóan a villámcsapás időpontjában is fennállnak. A 2. csoportba olyan előfeltételek tartoznak, melyek a vizsgálat időpontjában nem állnak fenn, de a villámcsapás időpontjában fennállhatnak. Ezen két csoport esetében a gyakoriság meghatározását nem vizsgálom. Azt feltételezem, hogy az ilyen előfeltételek gyakoriságát bizonyos, itt nem tárgyalandó módszerekkel meg lehet határozni és a fent bemutatott fuzzy szám formájában meg lehet adni. A továbbiakban tehát csak azon előfeltételek gyakoriságának meghatározásával foglalkozom, melyek magával a villámmal vannak kapcsolatban, annak valamely jellemzőjére fogalmaznak meg kritériumokat.

A villámmal kapcsolatos előfeltétel általában nem egymástól független kritériumok logikai láncolata, hanem egymással kapcsolatban lévő fizikai mennyiségekre vonatkozik. Ilyenek a villám villamos paraméterei ( $I_{max}$  villámáram csúcsértéke,  $dI/dt$  villámáram meredeksége, stb.), valamint a becsapás helye. A villámparaméterre vonatkozó kritériumok általában egy küszöbértékhez viszonyított relációt fogalmaznak meg. A becsapás helyére vonatkozó kritériumok pedig a tér egy adott részébe történő becsapást fogalmaznak meg. A következőkben tehát arra keresem a választ, hogy a vizsgált objektum adott káreseménye bekövetkezéséhez szükséges paraméterű villám milyen gyakran csap be egy meghatározott helyre. Ehhez tudnom kell, hogy átlagosan hány villám csap be a meghatározott helyre és ezek közül átlagosan hány villám rendelkezik a meghatározott paraméterekkel. Ezt a következő egyenletben fogalmazhatjuk meg:

$$(52) \quad N_{velő} = N_V \cdot D_p,$$



ahol  $N_{velő}$  [1/év] a villámmal kapcsolatos előfeltétel gyakorisága,  $N_V$  [1/év] az adott kár villámmal kapcsolatos előfeltétele által meghatározott  $V$  térrészre vonatkozó átlagos becsapási gyakoriság,  $D_p$  pedig az  $V$  térfogatot érő, adott villámparaméterrel rendelkező villámok számának és a  $V$  térfogatot érő összes villám számának a hányadosa. Itt kell megjegyezni, hogy a  $N_V$  és  $D_p$  nem minden esetben függetlenek egymástól. Például a villámáram által indukált túlfeszültségekkel kapcsolatos károk esetében  $V$  (és ezzel együtt  $N_V$ ) a villámáram meredekségének ( $dI/dt$ ) függvénye. Mivel ilyen esetekben a villámparaméterre vonatkozó kritérium éppen a  $dI/dt$ -re vonatkozó feltételt jelent, ezért  $D_p$  is ennek a villámparaméternek a függvénye. Ilyen esetekben az adott kárhoz szükséges, villámmal kapcsolatos előfeltétel tulajdonképpen a  $V$  térrész és  $P$  villámparaméter között kapcsolatot teremtő függvény, melynek pontjaira egyenként kell meghatározni  $N'_{velő}$  értékeket. Egyenletekkel ez a következőképpen írható. Mivel

$$(53) \quad N_V = f(V, N_g) \text{ és } V = f(P), \text{ tehát } N_V = f(P)$$

ahol  $V$  az adott kár villámmal kapcsolatos előfeltétele által meghatározott  $V$  térrész,  $N_g$  [1/év/km<sup>2</sup>] az adott területre érvényes átlagos becsapási sűrűség,  $P$  pedig az adott kár villámmal kapcsolatos előfeltétele által meghatározott villámparaméter. Mivel  $D_p$  definíciójából adódóan igaz, hogy

$$(54) \quad D_p = f(P), \text{ ezért}$$

$$(55) \quad N'_{velő} = f(P)$$

Ilyen esetekben  $N_{velő}$  értéke  $N'_{velő}$  értékeiből valamilyen átlagolós módszerrel határozható meg. A függvények menetének pontos meghatározása nem célja ennek a munkának, de a további kutatási irányok szempontjából mindenképpen kiemelkedő jelentőségű.

#### 6.1.5.1. $N_V$ meghatározása

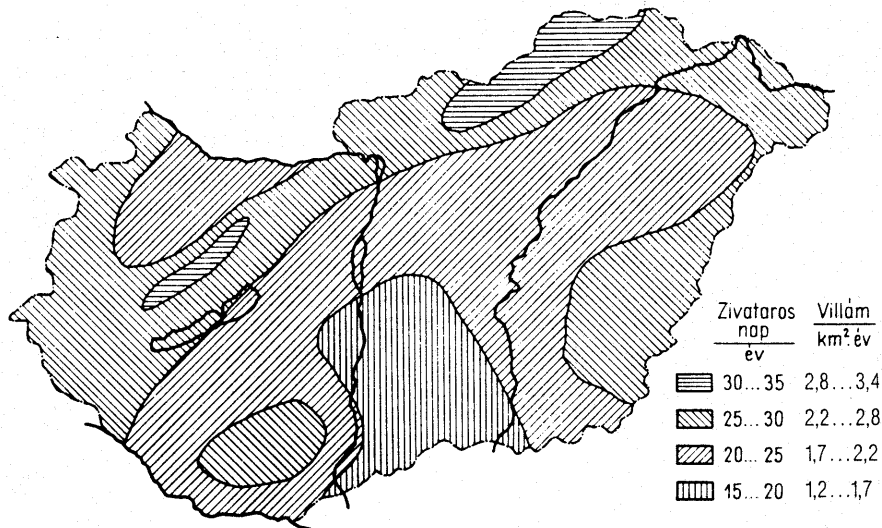
Az vizsgált kár villámmal kapcsolatos előfeltétele által meghatározott  $V$  térrészre vonatkozó átlagos becsapási gyakoriság vagy teljes becsapási sűrűséget a következőképpen lehet megadni:

$$(56) \quad N_V = N_g \cdot A_{eq}, \text{ ahol}$$

$N_g$  [1/év/km<sup>2</sup>] az adott területre érvényes átlagos becsapási sűrűség,  $A_{eq}$ [km<sup>2</sup>] pedig az ún. egyenértékű terület. Az egyenértékű terület (a szokásosnál általánosabban megfogalmazva) itt azt a területet jelenti, melyet ugyanolyan gyakorisággal ér villámcsapás, mint a vizsgált kár villámmal kapcsolatos előfeltétele által meghatározott  $V$  térrészt. A következőkben ezeknek a mennyiségeknek a meghatározásával és az ennek kapcsán felmerülő problémákkal foglalkozom [18].

#### **6.1.5.1.1. Az átlagos becsapási sűrűség ( $N_g$ ) vizsgálata**

A területre vonatkozó átlagos becsapási sűrűséget ( $N_g$ ) általában mérési adatokból számított statisztikák alapján határozzák meg (21. ábra). A statisztikákat konkrét esetre alkalmazva mindig felmerül a mért értékek relevanciájának problémája. Ez azt jelenti, hogy a mérésekből származó értékek csak bizonyos fenntartásokkal, vagy csak bizonyos mértékben érvényesek a vizsgált probléma esetében. Az átlagos becsapási sűrűség konkrét esetre történő alkalmazása során előfordulhat például, hogy az vizsgált területre vonatkozóan csak viszonylag kevés statisztikai adat áll rendelkezésre, mert pl. csak pár éve rögzítik az ilyen jellegű adatokat azon a vidéken. Ekkor a mérési adatokból számított átlagos becsapási sűrűség nyilvánvalóan el fog térni a valóságban kialakuló átlagértéktől. Egy másik probléma lehet az is, ha olyan mérési adatokat használunk fel, melyek egy olyan területről származnak, ahol a villámok kialakulását befolyásoló tényezők eltérnek a vizsgálandó objektum területére vonatkozó jellemzőktől. Ez az eltérés is hatással van a számított átlagértékre. A felhasznált mérési adatbázisból számított statisztikai értékek ezen adottságai befolyásolják  $N_g$ , és ezen keresztül a vizsgált kárra vonatkozó kockázat mértékét. A felhasznált mérési adatok konkrét esetre vonatkozó relevanciáját és a relevancia mértékéből származó bizonytalanságot kezelni kell és lehet. Ezen kívül meg kell határozni azon mérési adatoknak a körét, melyekkel számolva a legpontosabb és legmegbízhatóbb eredményt kapjuk a konkrét esete vonatkozó átlagos becsapási sűrűségre.



21. ábra, A zivataros napok számának területi eloszlása Magyarországon

Tegyük fel, hogy adott egy  $M$  mérési adatbázis, mely a villámbeccapások adatai tartalmazza és melyet egy adott objektumra vonatkozó átlagos beccapási sűrűség kiszámításához fogunk felhasználni. Az  $M$  mérési adatbázis tartalmazza a 6. táblázatban lévő mennyiségeket.

Mérések azonosítója	Mérések attribútuma			
	Mérés helye		Mérés ideje ( dátum, óra, perc )	Mért érték (a beccapások száma)
	koordináták	területszegmens, km <sup>2</sup>		
$m_1$	$x_1, y_1$	$A_1$	$t_1$	$v_1$
$m_2$	$x_2, y_2$	$A_2$	$t_2$	$v_2$
...	...	...	...	...
$m_n$	$x_n, y_n$	$A_k$	$t_n$	$v_n$

6. táblázat, Az  $N_g$  meghatározásához használt  $M$  mérési adatbázis tartalma

Ha az  $M$  adatbázis mérési adatai által meghatározott  $A$  gyűjtési területet felosztom  $A_i$  nagyságú területszegmensekre, akkor a mérés helyének koordinátái alapján meghatározható, hogy egy  $m_i$  mérés mely területszegmenshez tartozik. Ekkor egy  $v_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) mért értékhez hozzárendelhető a beccapás koordinátái alapján meghatározható  $A_i$  ( $i=1, \dots, k$ ) területszegmens,

a  $t_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) mérési időpont, és egy  $m_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) azonosító kód. Ezek alapján tehát egy  $A_i$  területszegmensre vonatkozó átlagos becsapási gyakoriság a következőképpen számítható:

$$(57) \quad N'_{\text{becsap}, A_i} = \frac{\sum_{1 \leq i \leq n} v_i}{t_{\max} - t_{\min}},$$

ahol  $N'_{\text{becsap}, A_i}$  [1/év] az  $A_i$  területre vonatkozó átlagos becsapási gyakoriság,  $v_i$  az  $A_i$  területre vonatkozó mért értékeket (becsapások számát) jelöli,  $t_{\max}$  és  $t_{\min}$  [év] pedig  $t_i$  maximális (a jelen időponthoz legközelebb lévő) és minimális (a jelen időponttól legtávolabb lévő) értéke. Itt azt feltételeztem, hogy a villámdetektáló rendszer folyamatosan, megszakítás nélkül üzemel. Ha ismert a villámdetektáló rendszer üzemén kívül töltött ideje, akkor ezzel csökkenteni kell a fenti időintervallumot. Ezt felhasználva az  $A_i$  területszegmens egy egységére vonatkozó átlagos becsapási gyakoriság:

$$(58) \quad N'_{g, A_i} = \frac{N'_{\text{becsap}, A_i}}{A_i} = \frac{\sum_{1 \leq i \leq n} v_i}{(t_{\max} - t_{\min}) A_i},$$

ahol  $N'_{g, A_i}$  [1/év/km<sup>2</sup>] az  $A_i$  terület egy egységére vonatkozó átlagos becsapási gyakoriság,  $A_i$  az  $i$ -edik területszegmens területe [km<sup>2</sup>]. Az  $A_i$  területszegmensre vonatkozó  $N'_{g, A_i}$  értéke tehát  $v_i$ ,  $A_i$  és  $t_i$  mérési értékek felhasználásával számítható. A kérdés számomra az, hogy a számításhoz felhasznált adatok a vizsgált objektum esetében milyen mértékben alkalmazhatók (relevancia) és a felhasznált adatokból számított  $N_g$  mennyire megbízható (megbízhatóság). A célom az, hogy a vizsgált objektumra vonatkozó  $N_g$  számításához a mérési adatbázisnak azon adatait használjuk fel, melyeknek a lehető legnagyobb a relevanciája a vizsgált esetre vonatkozóan, valamint a kiszámított értékben a számítás bizonytalansága is megjelenjen. Ehhez a mérési adatbázisban szereplő mennyiségek felhasználásával a számításhoz használt mérési értékek relevanciáját illetve megbízhatóságát vizsgálom és ennek alapján  $N_g$  konkrét esetre vonatkozó értékét számítom ki [6].

A mérési adatok adott esetre vonatkozó relevanciájának és megbízhatóságának meghatározása relevancia- és megbízhatósági-kritériumok alapján történik.  $N_g$  esetében a következő kritériumokat fogalmazom meg (lehet ennél többet is):

RK1. Minél hasonlóbba a mérés helyén a villámok becsapási gyakoriságát befolyásoló jellemzők a vizsgált objektum helyén érvényes jellemzőkhöz, a mért érték annál relevánsabb. A „villámok becsapási gyakoriságát befolyásoló jellemző” lehet pl. a zivataros napok száma.

MK1. Minél nagyobb időintervallumot ölel fel a számításhoz használt mérések legkorábbi és legutolsó ideje, a felhasznált mért értékek alapján számolt átlagos becsapási sűrűség annál megbízhatóbb. Az időintervallum meghatározása a mérések ideje ( $t_i$ ) és a villámdetektáló rendszer üzemideje alapján történik.

A fenti RK1 relevanciakritérium alapján meghatározható a mért értékek relevanciája. Ehhez olyan  $A_i$  területszegmenseket definiáltam, hogy az egy területszegmenshez tartozó mért értékek RK1 szerinti  $r_{RK1,i}$  relevanciája egy előre meghatározott és szabadon választott  $I_i$  intervallumba essen.  $r_{RK1,i}$  értékét például a vizsgált objektumra és a mérési helyre érvényes zivataros napok számának hányadosaként határoztam meg. Bár tudjuk, hogy a becsapások és a zivataros napok száma nem lineáris kapcsolatban van egymással, most az egyszerűség kedvéért mégis ezt feltételezzük. Természetesen semmilyen akadálya nincs annak, hogy más, differenciáltabb módszert alkalmazzunk. Számomra a lényeg az, hogy  $r_{RK1,i}$  meghatározására létezik módszer. Ennek megfelelően a 7. táblázatban látható, hogy minden ( $A_1, A_2, \dots, A_k$ ) ( $k \leq n$ ) területszegmenshez hozzárendelhető a  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$  mért értékek halmazából képzett  $(V_1, V_2, \dots, V_k)$  részhalmazok. Minden ilyen mért érték csoporthoz az RK1 alapján hozzárendelhetjük a relevanciájuk mértékét jelző  $(R_{RK1,1}, R_{RK1,2}, \dots, R_{RK1,k})$  mennyiségeket. Az  $R_{RK1,i}$  értékeket az azonos  $I_i$  intervallumokba eső (tehát egy területszegmenshez tartozó)  $r_{RK1,i}$  értékek átlagából képezhetjük. Ha  $r_{RK1,i}$  értékek megadását RK1 szerint végeztük, akkor a következőket mondhatjuk:

- Az  $R_{RK1,i}$  által jellemzett relevanciát *tökéletesnek* mondjuk, ha  $R_{RK1,i} = 1$ . Ilyenkor az  $I_i$  intervallum definiálásakor meghatározott pontossággal megegyezik a vizsgált objektumra vonatkozó és az  $A_i$  területszegmensre vonatkozó  $N'_{becsap,A_i}$  értéke
- Az  $R_{RK1,i}$  által jellemzett relevanciát *csökkent mértékűnek* mondjuk, ha  $R_{RK1,i} \neq 1$ . Ilyenkor a relevancia az  $R_{RK1,i}$  mennyiség 1 értéktől való %-os eltérése szerint csökken. Minél nagyobb a %-os eltérés, annál kisebb a relevancia.

Az  $R_{RK1,i}$  által jellemzett relevanciát csupán a szemléletesség kedvéért említettem, pontosabb definiálása most nem szükséges. A további számításaimban  $R_{RK1,i}$  mennyiséget fogom használni.

<b>Mérés helye (<math>A_i</math>)</b>	$A_1$	$A_2$	...	$A_k$
<b>Mért értékek</b>	$V_1$	$V_2$	...	$V_k$
<b>Mérési időintervallumok</b>	$T_1$	$T_2$	...	$T_k$
<b>Mért értékek relevanciája RK1 alapján</b>	$R_{RK1,1}$	$R_{RK1,2}$	...	$R_{RK1,k}$
<b>Mért értékek megbízhatósága MK1 alapján</b>	$M_{MK1,1}$	$M_{MK1,2}$	...	$M_{MK1,k}$

7. táblázat, A mért értékek relevanciája

Most rátérek a megbízhatóság meghatározására. A 7. táblázatból azt is láthatjuk, hogy minden ( $V_1, V_2, \dots, V_k$ ) részhalmazhoz tartozik egy  $T_1, T_2, \dots, T_k$  érték ( $T = t_{max} - t_{min}$ ), amihez az MK1 alapján hozzárendelhetjük a megbízhatóság mértékét jelző ( $M_{MK1,1}, M_{MK1,2}, \dots, M_{MK1,k}$ ) mennyiségeket. Kiszámításuk az MK1 figyelembevételével pl. a következőképpen történhet (természetesen ennél differenciáltabb képlet is lehetséges):

$$(59) \quad M_{MK1,i} = \frac{T_i}{K[\text{év}]} = \frac{t_{\max,i} - t_{\min,i}}{K[\text{év}]}, \quad \text{ha } t_{\max,i} - t_{\min,i} \leq K \text{ és}$$

$$M_{MK1,i} = 1, \quad \text{ha } t_{\max,i} - t_{\min,i} > K, \text{ ahol}$$

$K$  egy állandó ( $K > 1$  év), mely megegyezik az adott területre vonatkozó, éves villámbeesési számot befolyásoló nagy léptékű természeti folyamatok ciklusidejével. A képlet mögötti gondolat az, hogy akkor megbízható a felhasznált adathalmaz, ha olyan hosszú időintervallum adataiból áll, mely alatt legalább egyszer megtörténnek a normális természeti folyamatok éves ciklusnál nagyobb léptékű változásai. A fenti számítási módot figyelembe véve a következőket mondhatjuk:

- Az  $M_{MK1,i}$  által jellemzett megbízhatóságot *tökéletesnek* mondjuk, ha  $M_{MK1,i} = 1$ .
- Az  $M_{MK1,i}$  által jellemzett megbízhatóságot *csökkent mértékűnek* mondjuk, ha  $M_{MK1,i} < 1$ . A megbízhatóságot a (59)-os képlettel számíthatjuk.

A további számításaimban  $R_{RK1,i}$  mennyiséget fogom használni. Az  $A_i$  terület adatai alapján számított, a vizsgált objektumra (amely egy mások területszegmensben is lehet) vonatkozó  $N_{g,A_i}$  átlagos becsapási sűrűséget a 22. ábrán látható fuzzy számmal adtam meg. Ha csökkent megbízhatóságú adatok alapján kell számolni ( $R_{RK2,i}$  kisebb, mint 1), akkor a kiszámított érték épp úgy lehet több is és kevesebb is, mint a valóságos. Az MK1 szerinti megbízhatóság esetében ezért az  $N'_{g,A_i}$  értékének bizonytalanságáról van szó. Ez a bizonytalanság olyan jellegű, hogy a számított értéktől való nagyobb eltérésnek az esélye kisebb. Ezért ezt a bizonytalanságot a 22. ábrán látható módon az  $M_{MK1}$ -el arányos alappal és  $N'_{g,A_i}$  maggal rendelkező háromszög alakú fuzzy számmal vehetjük figyelembe.

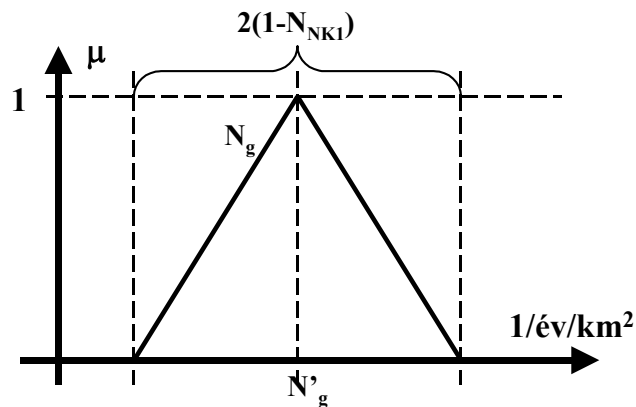
Mivel célom az volt, hogy a lehető legrelevánsabb eredményt állítsam elő, ezért egy adott  $O$  objektum esetében annak az  $A_o$  területszegmensnek az adatait kell felhasználni  $N_g$  meghatározásához, melyhez az  $O$  objektum is tartozik. Itt a mért értékek  $V_o$  részhalmazára  $R_{RK1} = 1$ . Mivel a területszegmensek meghatározásakor semmilyen kikötést nem tettünk a szegmensek alakjára illetve méretére vonatkozóan és mivel egy  $I$  intervallumba eső  $r_{RK1}$  értékekkel rendelkező mérési pontok tartoznak egy szegmenshez, ezért az  $A_o$  területszegmens magába foglalja azt az objektumot körülvevő teljes területet, mely tökéletes relevanciával rendelkezik. Ha erre a területszegmensre meghatározom  $N'_{g,A_o}$  értékét és 22. ábrán látható módon figyelembe veszem az  $M_{MK1,o}$  megbízhatóságot is, akkor azt mondhatjuk, hogy az  $M$  mérési adatbázis tökéletes relevanciájú adatai alapján az  $M_{MK1,o}$  megbízhatóságot is figyelembe véve meghatároztam a vizsgált objektumra vonatkozó  $N_g$  átlagos becsapási sűrűséget.

Ezek alapján az  $N_{g,A_o}$  konkrét számítását a három törésponthoz tartozó érték meghatározásával végzem. Ha  $a_o$  jelenti  $N_{g,A_o}$  magjának helyét a vízszintes tengelyen,  $b_o$  és  $c_o$ , ( $b_o \leq c_o$ ) pedig a vízszintes tengellyel vett metszéspontjait, akkor

$$(60) \quad a_o = N'_{g,A_o}, \quad b_o = a_o M_{MK1,o}, \quad c_o = a_o (2 - M_{MK1,o}).$$

A fenti módon meghatároztam egy adott objektumra vonatkozóan a rendelkezésre álló  $M$  adatbázis tökéletes relevanciájú adatainak felhasználásával és a megbízhatóságuk figyelembe vételével az átlagos becsapási sűrűséget. Előfordulhat azonban, hogy a tökéletes relevanciájú adatokkal számolva a megbízhatóság nagyon alacsony értékű lesz (lapos háromszög alakú

fuzzy számot kapunk). Ez tipikusan akkor fordul elő, ha a vizsgált objektum környezetében viszonylag rövid ideje detektálják a villámcsapásokat. Ilyen esetekben újabb területszegmensek adatainak bevonásával javítható a megbízhatóság. Természetesen ilyenkor a felhasznált adatok relevanciájának mértéke csökkenhet. A relevancia mértékének segítségével azonban más területszegmensek adataiból számított becsapási gyakoriság átszámolható az  $A_o$  területszegmensre. Első lépésben olyan szegmenseket kell bevonni, melyek bár nem kapcsolódnak a vizsgált objektumhoz, RK1 alapján mégis tökéletes relevanciájúak és MK1 szerinti megbízhatóság jobb, mint  $A_o$ -ban. Ha így sem sikerül elfogadható mértékűre csökkenteni a relevanciát, akkor további, nem feltétlenül tökéletes relevanciájú de jobb megbízhatóságú szegmenst kell bevonni a számításba. Ennek a módját tárgyalom a következőkben.



22. ábra, Az  $A_o$ -ra vonatkozó átlagos becsapási sűrűség megadása fuzzy számmal

Tegyük fel, hogy adott a vizsgált objektumot magába foglaló területszegmens az  $M$  mérési adatbázisból hozzá tartozó  $A_o$ ,  $V_o$ ,  $T_o$ ,  $R_{RK1,o}$  és  $M_{MK1,o}$  mennyiségekkel. Továbbá adott egy  $b$  területszegmens is, melyhez tartozó mérési adatokat be akarunk vonni az objektumra vonatkozó becsapási gyakoriság meghatározásába. A bevonandó  $b$  területszegmensre is adottak az  $A_b$ ,  $V_b$ ,  $T_b$ ,  $R_{RK1,b}$  és  $M_{MK1,b}$  mennyiségek. Ezek felhasználásával kiszámítható az  $o$  és  $b$  területszegmensekre vonatkozó, saját adataik alapján számított  $N_{g,Ao}$  és  $N_{g,Ab}$  értékek.

Mivel az objektum az  $A_o$ -hoz tartozik, ezért  $R_{RK1,o} = 1$ . Így  $N_{g,Ao}$  meghatározása a fent ismertetett módon történhet.  $N_{g,Ab}$  meghatározása is ezzel azonos módon történhet, hiszen a  $b$  területszegmens adatainak a  $b$  területszegmensre vonatkozó relevanciája szintén tökéletes. A  $b$  területszegmens adatai alapján számított és az  $O$  objektumra vonatkozó  $N'_{g,Ab}$  esetében



viszont ez a peremfeltétel nem biztosítható, kezelnünk kell a relevancia problémáját. Ha  $r_{RK1,i}$  értékek megadását RK1 szerint végeztük, akkor minél nagyobb az  $R_{RK1,b}$  relevancia, annál inkább megegyezik a  $b$  területszegmens mérései alapján a  $b$  területszegmensre számított  $N_{g,Ab}$  és a  $b$  területszegmens mérései alapján a vizsgált objektumra számított  $N'_{g,Ab}$  értéke. Mivel RK1 éppen a becsapási gyakoriságok alapján lett megfogalmazva, ezért  $R_{RK1,b}$  relevancia segítségével a  $b$  területszegmens mért értékeiből számolt becsapási gyakoriságot „átszámolhatjuk” az  $O$  objektumra. Ennek megfelelően a  $b$  területszegmens adatai alapján az  $O$ -ra számított  $N'_{g,Ab}$  becsapási gyakoriságot a (60) egyenletben alkalmazott jelölésekkel a következőképpen kapjuk:

$$(61) \quad a'_b = N_{g,Ab} R_{RK1,b}, \quad b'_b = a_b M_{MK1,b}, \quad c'_b = a_b (2 - M_{MK1,b}).$$

A (60) és (61) szerint meghatároztam az  $o$  és  $b$  területszegmensek adatai alapján számított és az  $O$  objektumra vonatkozó becsapási gyakoriságot a hozzájuk kapcsolódó megbízhatósággal. Most már nincs más dolgom, mint a két mennyiség számtani közepe alapján meghatározni az objektumra vonatkozó  $N_g$  átlagos becsapási gyakoriságot.

$$(62) \quad N_g = \frac{N_{g,Ab} + N'_{g,Ab}}{2}.$$

Ezt a módszert több területszegmens esetében is elvégezhető, ha a megbízhatóság nem kielégítő. Azonban mindig olyan területszegmenseket érdemes csak bevonni a számításba, melyek megbízhatósága jobb, mint a már bevont területszegmensek átlagáé. Természetesen más területszegmensek bevonásánál a kulcskérdés mindig az átszámítás módja, amely esetünkben szoros kapcsolatban van a relevancia meghatározásával. Minél pontosabban írjuk le a becsapási gyakoriságot befolyásoló jellemző hatását a becsapási gyakoriságra, annál valószínűbb lesz ez a transzformáció. Ez az eredmény tartalmaz minden olyan, az  $N_g$ -t befolyásoló információt, mely az  $M$  mérési adatbázis adataiból kinyerhető. Bár a mérési adatbázisban rejlő információhiányokat pótolni nem lehet, de a számítás során megjeleníthető, figyelembe vehetjük őket és vizsgálhatjuk a kockázatban okozott hatásukat. Az  $I$  intervallum megválasztásával az egy relevanciacsoportba tartozó mérési értékek száma szabályozható.

Itt kell megjegyezni, hogy a relevanciakritériumok számára nem tettünk megkötést, elvileg akármennyit definiálhatunk. Ezek segítségével nyílik lehetőség pl. a mérések pontosságnak,

az átlagos becsapási gyakoriságot befolyásoló geológiai tényezők, stb. figyelembevételére is. A geológiai tényezők lehetnek pl. a magas talajvízszint, a természetes vízhez való közelség, magaslat, völgy, stb. A fenti példában az egyszerűség kedvéért egy relevancia kritériummal számoltam, de több kritérium esetén is hasonlóan működik a módszer. A kritériumok meghatározásának kulcseleme a relevancia/megbízhatósági mérték számítási módjának definiálása. Sok esetben jelenleg még nem létezik egzakt számítási mód az egyes befolyásoló tényezők hatására. Ezen számítási módszereket vagy hasonló esetek mérési adatainak elemzéséből (ha ilyen rendelkezésünkre áll), vagy villamos térszámítási módszer segítségével állítható elő.

#### 6.1.5.1.2. Az egyenértékű terület vizsgálata

Egy objektum egyenértékű területének analitikai meghatározása a következő integrállal lehetséges:

$$(63) \quad A_{eq} = \int b \frac{dP}{dr} dV ,$$

ahol  $b$  a tér  $dV$  részére vonatkozó becsapási valószínűséget (az abból a térrészből az épületbe csapó villámok száma viszonyítva az összes villám számához) jelenti.  $dP/dr$  annak az eloszlásfüggvénynek a sűrűségfüggvénye, ami azt a valószínűséget fejezi ki, hogy az orientációs távolság kisebb, mint a  $dV$ -hez tartó  $r$ .  $dV$  jelöli a vizsgált objektumot körülvevő tér egy infinitezimális térfogatelemét. Az integrálást a teljes térre el kell végezni. Mivel a térnek abban a részében, ahol  $b = 0$  az integrandus mindig zérus, ezért a gyakorlatban csak a nullától különböző  $b$ -vel rendelkező  $V_a$  térrészre érdemes az integrálást végezni.  $b$  és  $dP/dr$  mennyiségek  $r$ -től függenek, ezért érdemes az integrálást is ezen változó szerint végezni [18].

$$(64) \quad A_{eq} = \int_{V_a} b \frac{dP}{dr} A(r) dr ,$$

ahol  $A(r)$  az objektumtól  $r$  távolságra lévő felületnek a  $V_a$  térfogatba eső részét jelenti. Először az integráljel mögötti mennyiségeket vizsgálom meg. A tér egyes pontjaiban  $b$  értékeit (és ezen keresztül  $V_a$  térfogat határát) csak kísérleti úton lehet meghatározni, modelleken, laboratóriumban. Bár egyes szerzők megkérdőjelezzik ezen modellkísérleteknek a valósággal való összevethetőségét, itt most azt feltételezem, hogy a modellkísérletből szerzett

információk valós esetre átvihetők. Az előző fejezetben bevezetett fogalmak felhasználásával ez azt jelenti, hogy a  $b$ -re vonatkozó adatok relevanciájából és megbízhatóságából származó bizonytalanságot elhanyagoljuk. Ezt azért teszem meg, mert jelenleg nem ismeretes olyan módszer, mellyel általánosságban meg lehetne határozni vagy akár csak besülni a kísérleti mérési adatok relevanciájának és megbízhatóságának az értékre és annak bizonytalanságára gyakorolt hatását. Valószínűsíthető, hogy a kísérleti eredmények használatával növekszik az egyenértékű terület értékének bizonytalansága. A vizsgálat végén az egyenértékű területre kapott eredmény bizonytalansága tehát csak egy alsó korlátként értelmezhető.

A fenti egyenletet a gyakorlatban úgy szokták megoldani, hogy az integrálást a  $V_a$  térrész helyett csak egy  $V'_a$  térrészre vonatkozóan szokták elvégezni.  $V'_a$  térrész határát úgy határozzák meg, hogy egybeessék a  $b=0,5$  értékhez tartozó felülettel. Ekkor azt feltételezik, hogy a  $V'_a$  térrészen belül  $b=1$ , azon kívül eső térben pedig  $b=0$ . Ez a feltételezés abban az esetben helytálló, ha az  $A(r)$  felületek mentén haladva  $b$  értéke a  $b=0,5$  ponttól két irányba távolodva szimmetrikusan változik. A kísérleti eredmények alapján megrajzolt konstans  $b$ -vonalak diagramjából azonban megállapítható, hogy ez nem mindig biztosított. Általánosságban megállapítható, hogy a  $V'_a$  térrész határának fenti módon történő megválasztása bizonytalanságot eredményezhet az egyenértékű terület értékében. A bizonytalanság mértékének vizsgálathoz természetesen figyelembe kell venni az integrandus adott pontbeli értékét. A bizonytalanság mértékét azonban most nem vizsgáljuk, számunkra a lényeg az, hogy a fenti feltételezés esetében van ilyen.

A  $b$  értékek változását leíró függvény lépésfüggvényként való értelmezése akkor nem eredményez pontatlanságot a végeredményben, ha a lépés helyét, azaz a  $V'_a$  felületet a következő kritérium alapján határozzuk meg

$$(65) \quad \int_{V_a} b \frac{dP}{dr} A(r) dr = \int_{V'_a} \frac{dP}{dr} A(r) dr .$$

A fenti egyenlet bal oldalán valós  $b$  értékekkel a  $V_a$  térrészre számított egyenértékű terület, jobb oldalán pedig a  $b=1$  értékekkel a  $V'_a$  térrészre számított egyenértékű terület látható.  $b$  valós értékeinek (és a  $V_a$  térfogat határát képező felületet) ismeretében, ezek alapján meghatározhatjuk  $V'_a$  térfogat határát.

A fentiekből az látható, hogy  $b$  valós értékeinek ismeretét nem lehet kikerülni a bizonytalanság kiküszöböléséhez. Mivel bármely objektumra a modellkísérlet elvégzése a gyakorlatban nem megvalósítható és nincs pontos információnk a modellkísérletek relevanciájáról sem, ezért más módszerhez kell folyamodnom. A becsapási gyakoriságot a felhő tértöltései és a vizsgált objektum (és annak környezete) között kialakuló villamos erőter tulajdonságai határozzák meg. Ennek az erőternek a számításával és vizsgálatával tehát lehetőségünk nyílna a tér pontjaiban  $b$  adott esetre vonatkozó valós értékének meghatározására. Bár a  $b$ -értékek ilyen módon történő meghatározásának pontos módszere nem tartozik a munkám tárgyába, de a valós  $b$  értékek elengedhetetlenek az egyenértékű terület minél pontosabb meghatározásához.

A következőkben a  $dP/dr$  sűrűségfüggvény vizsgálatával foglalkozom. Ezt a mennyiséget mérési adatokból készített statisztikák segítségével számították ki és a következő egyenlettel közelíthető:

$$(66) \quad \frac{dP}{dr} = \frac{p}{s\sqrt{2\pi}} \frac{1}{r} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{p \ln \frac{r}{r_m}}{s}\right)^2},$$

ahol  $dP/dr$  kifejezése a

$$(67) \quad P(x \leq r) = \Phi\left(\frac{p \ln \frac{r}{r_m}}{s}\right)$$

kifejezés  $r$  szerinti differenciálásából adódott. Itt  $P(x \leq r)$  azt a valószínűséget jelenti, hogy az orientációs távolság  $r$ -nél kisebb. Ezt a valószínűséget úgy kapták meg, hogy a villámmérési adatok alapján készített statisztika közelítésére felállított

$$(68) \quad P(i \leq I) = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{I}{I_m}\right).$$

képletbe behelyettesítették az orientációs távolság és a villámáram csúcserő között kapcsolatot teremtő – ugyancsak mérések alapján meghatározott – kifejezést:

$$(69) \quad \frac{I}{I_m} = \left(\frac{r}{r_m}\right)^p$$

Itt  $I$  jelenti a villámáram csúcserőértékét,  $r$  az ehhez tartozó orientációs távolság,  $I_m$  és  $r_m$  pedig az összetartozó mediánértékek (50%-os valószínűséghez tartozók) [18]. A (68) egyenletben szereplő kifejezés azt a valószínűséget fejezi ki, hogy a csúcserőérték  $I$ -nél kisebb érték lesz.  $s$  értékét a villámáram csúcserőértékének eloszlására összegyűjtött statisztikai adatok alapján határozták meg (csakúgy, mint az  $I_m$  értékét), ugyanis a mérési eredmények alapján azt mondták, hogy a villámáram csúcserőértéke normál eloszlást követ.  $s$  függ a villám polaritásától és negatív villámok esetén attól, hogy az első vagy az azt követő becsapásokról van-e szó. Ebben az egyenletben  $\Phi$  a Gauss-féle hibaintegrált jelenti, melynek a következő a definíciója:

$$(70) \quad \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

$p$  értékére csak becslések léteznek, mivel a (69) egyenletet kísérleti eredményekből származtatták, értéke 1,2 és 2 közötti. Az egyenletben szereplő  $r_m$  értékét a következő képlettel lehet megadni:

$$(71) \quad r_m = h \left( \frac{I_m}{I_n} \right)^{\frac{1}{p}} \left[ (C \cdot h)^a + \left( \frac{D}{h} \right)^b \right],$$

ahol  $I_m$  a villámáram medián értéke,  $I_n = 20$  kA,  $h$  az objektum magassága,  $a = 0,1$ ,  $b = 0,7$ , pozitív villámok esetében  $C = 1$  [1/m],  $D = 31,6$  [m], negatív villámok esetében pedig  $C = 644$  [1/m],  $D = 32,5$  [m] [18].

A fentiekből az látható, hogy  $dP/dr$  meghatározása során számos olyan adatot kell felhasználnunk, melyet villámmérési adatokból számítottak. Megbízhatóságuk, adott esetre vonatkozó relevanciájuk kérdéses. Az előző fejezetben bemutatam egy módszert, melynek segítségével a mérési adatbázis adatainak relevanciája és megbízhatósága figyelembevételével határoztunk meg a keresett mennyiséget. Mivel az egyenértékű terület előbbiekben bemutatott meghatározásának módja is egy mérési adatbázis adatain nyugszik, hasonló módon lehet figyelembe venni a felhasznált adatokból származó bizonytalanságot.

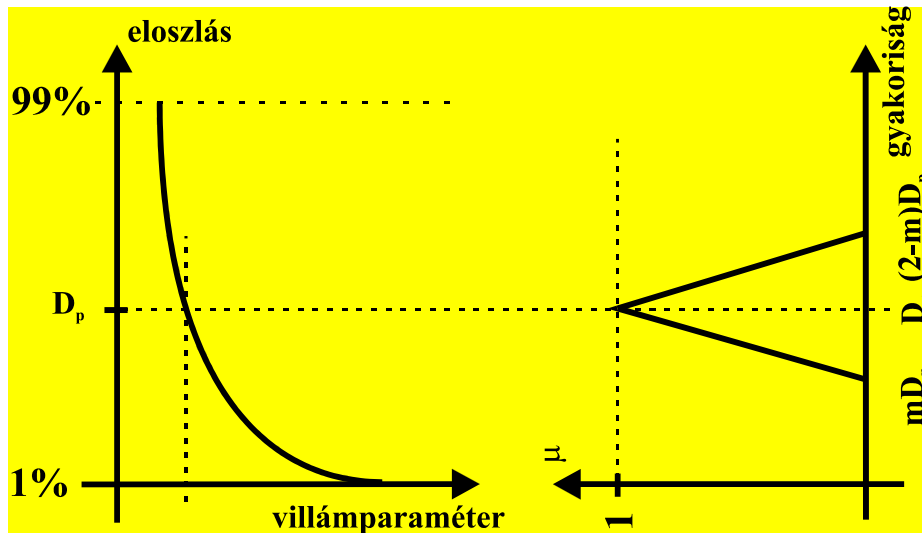
Az egyenértékű terület meghatározásához felhasznált mérési adatbázis mért értéke a villámok áramának csúcserőértéke, ehhez kapcsolhatók a mérés hely és időkoordinátái. Megfogalmazhatók azok a relevancia és megbízhatósági kritériumok, melyek alapján a mért

értékeket értékeljük. A kritériumok alapján adódó relevancia és megbízhatósági mértékek segítségével meghatározható a  $dP/dr$  mennyiségre vonatkozó bizonytalanság, amit a 22. ábrán láthatóhoz hasonló fuzzy számmal jellemezünk.

Az egyenértékű terület meghatározásánál nem volt céлом egy analitikus kifejezés meghatározása vagy a meghatározás módjának pontosítása, hanem az integráljel mögötti kifejezés  $r$  szerinti értékeit akartam meghatározni figyelembe véve a felhasznált mérési adatokból eredő bizonytalanságot. Az integrálás egy megfelelő pontosságú számítógépes numerikus integrállal elvégezhető.

#### 6.1.5.2. $D_p$ meghatározása

Ha adott a vizsgált káreseményhez szükséges, villámmal kapcsolatos előfeltétel villámparaméterre vonatkozó kritériuma, akkor a 23. ábrán látható módon az adott villámparaméterre vonatkozó eloszlásfüggvényből meghatározható az ilyen villámoknak az összes villámhoz viszonyított aránya. A korábbi fejezetekhez hasonlóan itt is megállapítható, hogy az eloszlásfüggvényeket más helyen más időpontban és más objektumokon regisztrált mérési adatok alapján készített statisztikák felhasználásával generálták. Probléma lehet például az a tény, hogy a mérési adatokat milyen magas tárgyakon mérték és ez hogyan viszonyul a vizsgált objektum magasságához. A villámparaméterek eloszlása ugyanis függ pl. az objektum magasságától is. A mérési adatok relevanciájából és megbízhatóságából eredő bizonytalanságot az előzőekhez hasonlóan kezelhetjük. A fenti módszert követve az adott villámparaméter gyakoriságára is egy olyan fuzzy számot kapok, mely tartalmazza a rendelkezésre álló információk alapján figyelembe vehető bizonytalanságot [2].

23. ábra,  $D_p$  megadása fuzzy számmal

#### 6.1.6. A kockázat mértékének meghatározása

A kockázat mértékének megítélésekor nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a villámcsapásból eredő károknak mindig a károsult viseli a következményeit. Ezért annak eldöntését, hogy a villámcsapásból eredő kár mennyire súlyos, azaz mekkora a kockázat, mindig a károsultak körülményeinek és elvárásainak figyelembevételével kell végezni.

A kockázat mértékének meghatározása a 16. ábra alapján úgy történik, hogy a valós várható és a károsult által elvárt kárjellemzőket összehasonlítjuk. A valós várható kárjellemző minden kárra külön egy olyan fuzzy szám formájában adott, amely a kár következtében a károsult számára várható éves kiadást tartalmazza (24. ábra  $\mu_{N_h}$  tagsági függvénye). A károsult által elvárt kárjellemzőt szintén egy fuzzy számmal jellemeztem, melyet a 24. ábra  $\mu_{K_e}$  tagsági függvénye szemléltet. Ez a görbe a „Károsult számára elfogadható éves kiadás” fuzzy függvény tagsági értékeit mutatja. A károsult számára a kockázat annál elfogadhatóbb, minél inkább része a valós kárjellemző a károsult által elfogadhatónak. Matematikai nyelven ez annyit jelent, hogy az  $N_h$  fuzzy halmaz minél inkább részhalmaza a  $K_e$  fuzzy halmaznak, a kockázat annál elfogadhatóbb. Ezt így írhatjuk:

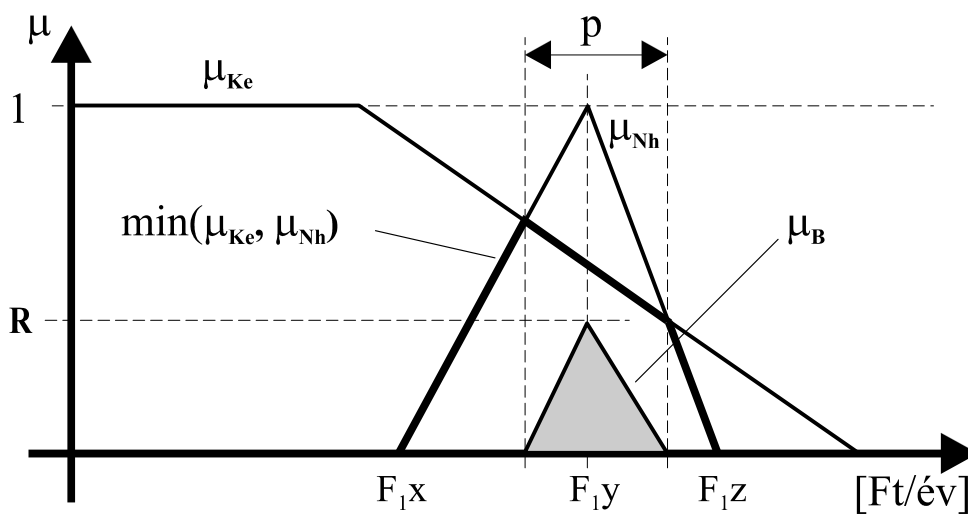
$$(72) \quad \tilde{N}_h \cap \tilde{K}_e = \tilde{N}_h - \tilde{B}, \text{ ahol}$$

$\tilde{B}$  jelenti az  $\tilde{N}_h$  és a  $\tilde{K}_e$  halmazok közötti különbséget és a fenti egyenletből a következőképpen adható meg.

$$(73) \quad \tilde{B} = \tilde{N}_h - \tilde{N}_h \cap \tilde{K}_e,$$

azaz tagsági függvényekkel írva

$$(74) \quad \mu_b = \mu_{N_h} - \min(\mu_{N_h}, \mu_{K_e}).$$



24. ábra, A kockázat mértékének meghatározása

A kockázatot jellemző  $\mu_B$  tagsági függvény  $R$  maximuma a kockázat nagyságáról,  $p$  értéke pedig a rendelkezésre álló bemenő információkból származó pontatlanságról vagy megbízhatóságról szolgáltat információt. Látható, hogy a kockázatot jellemző  $\mu_B$  tagsági függvény alakjára valós és a károsult által elvárt kárjellemezők vannak hatással. Bármelyiket változtatva  $\mu_B$  tagsági függvény alakja is változik. Ha tehát  $\mu_B$  tagsági függvény alakja túl nagy kockázatra illetve bizonytalanságra utal, akkor vagy a károsultak elvárásain vagy a valós várható kárjellemezőkön változtathatunk. Mindegyik esetben számos gyakorlati lehetőség kínálkozik.

A károsultak elvárásainak változtatása általában valamilyen pénzügyi manipulációt rejt magában (kockázati biztosítás kötése, bizonyos alapok elkülönítése a károk költségeinek fedezésére, stb.) Ezeknek a döntéseknek a meghozatalába pénzügyi szakembereket kell



bevonni. A valós kárjellemezők változtatása történhet a károk értékének, illetve gyakoriságának változtatásán keresztül. A károk értékét elsősorban a lehetséges károk listáján keresztül lehet változtatni. Bár elvileg megvan a lehetőség egy konkrét kár értékének a csökkentésére is, a gyakorlatban ennek kisebb a jelentősége. Konkrét létesítményeknél ugyanis általában a funkció tökéletes ellátása az elsődleges szempont. Mivel a funkció ellátásához szükséges teljesítmény/erőforrás általában erős kapcsolatban van az árral, ezért ilyen módon kevés esély van a kár értékének csökkentésére. Harmadikként a kár gyakoriságát változtathatjuk. Ennek klasszikus módszere a villámvédelmi rendszer kiépítése, mellyel tulajdonképpen a villámmal kapcsolatos előfeltételek gyakoriságát akarjuk csökkenteni. Emellett lehetőség van a károkból veszélyeztetett berendezések áthelyezésére is. Természetesen elképzelhető, hogy bizonyos károk kockázata még elviselhető a károsult számára, bizonyosak nem. Ilyenkor csak ezen károk kockázatának csökkentésére kell törekedni.

Az előzőekben bemutatott gondolatmenet arra világít rá, hogy a villámcsapásból eredő károk kockázata differenciáltan kezelendő. A károkat külön kell vizsgálni, összehasonlítva a károsultak által támasztott igényekkel. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a kockázat meghatározásához használt információink hiányosak, nem tehetünk úgy, mintha ez nem létezne. A bizonytalanság csökkentésének kulcsa a mérési adatokban rejlik. Minél több méréssel és minél több információval rendelkezünk a mérésekről, annál inkább csökkenthető a bizonytalanság. A felhő és az objektum közötti villamos tér számítása esetleg lehetőséget teremthet a számításaink további pontosítása érdekében. Ennek egyszerű alkalmazhatósága azonban még kérdéses.

## 7. Tézisek

Az előző fejezetek alapján az elektrosztatikus eredetű veszélyek kezelésével kapcsolatban a következő új tudományos eredményeket fogalmazhatók meg:

### 1. tézis

**Az általános gyakorlattal ellentétben a légköri és ipari elektrosztatikus eredetű veszélyek kezelését nem a káresemények bekövetkezése elleni védekezési mód meghatározásán keresztül, hanem mindig az adott esetre vonatkozó és a potenciális károsult elvárásainak megfelelő (személyre szabott) kockázatvállalási stratégia alapján kell meghatározni. A védekezés módja nemcsak a káresemények bekövetkezése elleni védekezés módszereit jelentheti, hanem eleme lehet minden olyan módszer, mely a kockázatvállalás mértékének beállítására használható. [2]**

#### Megjegyzés a tézishez:

*A káreseményhez tartozó kockázatvállalás ( $Ft/év$ ) egy adott mértékű pénzügyi teher ( $Ft$ ) tudatos vállalását jelenti a káresemény átlagos gyakoriságával ( $1/év$ ) megegyező gyakorisággal.*

### 2. tézis

**Az elektrosztatikus feltöltődésből származó veszélyeket tartalmazó ipari rendszerek esetében a károk csökkentésére alkalmazott hibadiagnosztikai rendszer komplexitása legalább egy nagyságrenddel nagyobb, mint egy emberi operátor által kezelhető hibadiagnosztikai probléma komplexitása. Ezek alapján az elektrosztatikus feltöltődést tartalmazó ipari rendszerek esetében definiáltam a komplex elektrosztatikus rendszer fogalmát. [4]**

#### Megjegyzés a tézishez:

*Az elektrosztatikus rendszerek esetében a hibadiagnosztikai rendszer komplexitását a következőképpen definiáltam. Egy szabadon kiválasztott - az elektrosztatikus feltöltődés kapcsán kialakuló - nemkívánatos esemény szempontjából keressük meg az elektrosztatikus rendszernek a lehetséges hibáit, valamint azokat a lehetséges tüneteket, melyek a hibák*

létezésére utalhatnak. Készítsünk el egy olyan  $R$  mátrixot, mely az egyes hibák és tünetek kapcsolatának erősségét 0 és 1 közötti számértékekkel jellemzi (oszlopok a tüneteket, sorok a hibákat reprezentálják). Ha  $n$  az  $R$  mátrix nem nulla elemeinek a számát jelöli, akkor  $n$  a hibadiagnosztikai rendszer komplexitásának mérőszáma.

A nemkívánatos esemény a diagnosztikai rendszer üzemeltetője által önkényesen meghatározott, elektrosztatikus feltöltődés kapcsán kialakuló esemény, melynek elkerülésére a diagnosztikai rendszert tervezik. Egy nemkívánatos esemény nem lehet előfeltétele más nemkívánatos eseményeknek. Az elektrosztatikus rendszer alkotóelemeinek olyan, direkt módon nem érzékelhető állapotait nevezük hibáknak, melyek meghatározott feltételek mellett egy nemkívánatos eseményhez vezetnek. Tünetnek nevezük azt a jelenséget, mely az elektrosztatikus rendszer legalább egy hibájával ok-okozati kapcsolatban van (ahol a hiba az ok és a tünet a következmény), és a jelenség bekövetkezése valamilyen objektív megfigyeléssel egyértelműen eldönthető.

### **3. tézis**

**Komplex ipari elektrosztatikus rendszerek esetében a feltöltődésből származó veszélyek biztonságos kezelésére fuzzy alapú automatizált hibadiagnosztikai rendszert dolgoztam ki. [7][22][29]**

#### Megjegyzés a tézishez:

*A hibadiagnosztikai vizsgálatot végző rendszer működését akkor nevezük biztonságosnak, ha a hibadiagnosztikai rendszer*

- *az elektrosztatikus rendszerre vonatkozó megfigyelések alapján mindig a valóságnak megfelelő diagnosztikai állításokat szolgáltat a megfigyeléseket igazoló hibákról*
- *mindig az elektrosztatikus rendszer működéséhez illeszkedő, előre definiált válaszdíőn belül szolgáltatja az eredményeket.*

### **4. tézis**

**A légeköri és ipari elektrosztatikus feltöltődésből származó kockázat meghatározásakor olyan bizonytalanságokkal kell számolni, mely a számításhoz felhasznált mérési adatok mérésének pontatlanságán kívül a mérési adatok adott esetre vonatkozó relevanciájából és megbízhatóságából ered. Az eddigi gyakorlattal ellentétben a kockázatot a lehetséges káresemények szerinti bontásban, a mérési adatok relevanciáját és megbízhatóságát figyelembe véve kell meghatározni. [2][3][5][6]**

Megjegyzés a tézishez:

*Az  $M$  mérési adat adott  $E$  elrendezésre vonatkozó relevanciája annak a mértékét fejezi ki, hogy az  $M$  értékét befolyásoló tényezők mennyire egyeznek meg az  $E$  elrendezés esetében mérhető, hasonló típusú  $M_E$  mérési adat értékét befolyásoló tényezőkkel. Minél inkább fennáll az egyezés,  $M$ -et az  $E$  elrendezésre vonatkozóan annál relevánsabbnak mondjuk.*

## 8. Táblázatjegyzék

1. táblázat, A villámáram jellemző értékeinek előfordulási gyakorisága .....	31
2. táblázat, A hibák listája (szigetelő fólia festése).....	46
3. táblázat, Hibák és tünetek kapcsolata (szigetelő fólia festése) .....	49
4. táblázat, A tünetek megfigyelésének módja (szigetelő fólia festése) .....	50
5. táblázat, A tünetek megfigyelésének módja (porleválasztás) .....	59
6. táblázat, Az $N_g$ meghatározásához használt $M$ mérési adatbázis tartalma.....	75
7. táblázat, A mért értékek relevanciája .....	78

## 9. Ábrajegyzék

1. ábra, Egy porleválasztó elvi felépítése	14
2. ábra, A zivatarfelhő töltéseloszlása	25
3. ábra, A villámcsatorna kialakulása	27
4. ábra, Lefelé haladó villám	28
5. ábra, Felfelé haladó villám	29
6. ábra, A csúcsesemény és a hibák kapcsolata	41
7. ábra, A hibák és tünetek kapcsolatának ábrázolása	42
8. ábra, Egy tünetre vonatkozó megfigyelhetőségi függvény	43
9. ábra, A komplex elektrosztatikus rendszer fuzzy diagnosztizálásának folyamata	44
10. ábra, Szigetelő anyagú fólia festésének modellje	45
11. ábra, Hibák meghatározása hibafával (szigetelő fólia festése)	47
12. ábra, A T3 tünet megfigyelhetőségi függvénye	47
13. ábra, Elektrosztatikus porleválasztás folyamatának modellje	55
14. ábra, Hibák meghatározása hibafával (porleválasztó)	56
15. ábra, Hibák és tünetek kapcsolata (porleválasztás)	57
16. ábra, A villámcsapás okozta károk elleni védekezés alapja	67
17. ábra, A valós várható kárjellemzők meghatározásának blokkvázlata	67
18. ábra, A kár értékének megadása	69
19. ábra, A kár villámmal kapcsolatos előfeltételének meghatározása	70
20. ábra, Egy kár előfordulási gyakoriságának meghatározása fuzzy számokkal	71
21. ábra, A zivataros napok számának területi eloszlása Magyarországon	75
22. ábra, Az $A_o$ -ra vonatkozó átlagos becsapási sűrűség megadása fuzzy számmal	80
23. ábra, $D_p$ megadása fuzzy számmal	87
24. ábra, A kockázat mértékének meghatározása	88
25. ábra, Fuzzy halmaz	99
26. ábra, Fuzzy halmazokon végzett műveletek tagsági függvényei	101

## 10. Irodalomjegyzék

- [1] Anderson J. R., Cognitive Psychology, W. H. Freeman & Co., 1995
- [2] Balog E., Berta I., A Theoretical Approach to Safety in Lightning Protection Based on Fuzzy Logic, 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, 2000
- [3] Balog E., Berta I., Fuzzy Logic in Electrostatics - Hazard Assessment, Electrostatics '99, Cambridge, Great Britain, 1999
- [4] Balog E., Berta I., Fuzzy Solutions in Electrostatics, Journal of Electrostatics 51-52 () (2001) pp. 409-415
- [5] Balog E., Berta I., Kóczy T. L., Fuzzy Logic in Lightning Protection, 24th International Conference on Lightning Protection, 1998, Birmingham, Great Britain
- [6] Balog E., Berta I., Lightning Data Relevance in Stroke Frequency Assessment, 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 2004
- [7] Balog E., Kiss I., Pula L., Berta I., Kóczy L. T., Evaluation of Electrostatic Hazards and Determination of Effective Protection Methods Based on Fuzzy Logic, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, 1997
- [8] Berta I., (Chang J. S., Crowley J. M., Kelly A. J.), Handbook of Electrostatics, Chapter 31. Static Electricity Hazards: Solid Surfaces and Gases, Marcel Dekker Inc., New York, 1995 pp. 703-722
- [9] Berta István, Elektrosztatikus feltöltődés változása szigetelőanyagokon, Doktori értekezés, 1976.
- [10] Bevezetés a hibafaanalízisbe, Segédlet a "Nagybiztonságú számítógépes és hibrid rendszerek" c. tárgyhoz BME Közlekedésautomatikai Tanszék, Budapest, 1996. November

- [11] British Standard, BS 6651:1999, Code of practice for protection of structures against lightning, British Standards Institution, 15 September 1999
- [12] C.P.Pappis, G.Adamopoulos, A Computer Algorithm for the Solution of the Inverse Problem of Fuzzy Systems, Fuzzy Sets and Systems, vol. 39, no. 3, pp 279-290., 1991
- [13] Csernátorny-Hoffer A. – Horváth T.: Nagyfeszültségű technika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968
- [14] Dubois D., Prade H., Fuzzy real algebra: some results. Fuzzy Sets and Systems, 2, pp. 327-348, 1979
- [15] Furuta H., Shiraishi N., Fuzzy Importance in Fault Tree Analysis, Fuzzy Sets and Systems 12, (1984) pp 205-213
- [16] Gmytrasiewicz P., Hassberger J. A., Lee J. C., Fault Tree Based Diagnostics Using Fuzzy Logic, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 12, no. 11, 1990
- [17] Horváth T., Berta I., Pohl J.: Az elektrosztatikus feltöltődések, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984
- [18] Horváth T., Computation of Lightning Protection, Research Studies Press Ltd., John Wiley & Sons Inc., New York-Toronto-Singapore, 1991
- [19] Kaufman A., Gupta M. M., Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science, North Holland, 1998
- [20] Kieselbach R., Systematic Failure Analysis Using Fault Tree and Fuzzy Logic, Technology, Law and Insurance 2, pp. 13-20, 1997
- [21] Kim C.E., Ju Y.J., Gens M., Multilevel Fault Tree Analysis Using Fuzzy Numbers vol. 23, no. 7, Cover date: 23, 7, July 1996 Computers And Operations Research



- [22] Kiss I., Pula L., Balog E., Kóczy L. T., Berta I., Fuzzy Logic in Industrial Electrostatics, 8th International Conference on Electrostatics, Poitiers-Futuroscope, France, 1997
- [23] Masuda S., Hosokawa S.: Electrostatic Precipitation. In Handbook of Electrostatic Processes (Chang - Crowley - Kelly), Chapter 21. Marcel Dekker Inc., New York, 1995. pp. 441-479
- [24] Mazzetti C., Ratti U., Flisowski Z., Risk Assessment Procedure for the Protection of Electronic Systems Against Lightning, 22<sup>nd</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP), Budapest, 1994
- [25] Mérő László, Észjárások: A racionális gondolkodás korlátai és a mesterséges intelligencia, Tercium Kiadó, 1997
- [26] Mérő László, Új észjárások: A racionális gondolkodás ereje és korlátai, Tercium Kiadó, 2001
- [27] Nyberg M., Model Based Fault Diagnosis Methods, Theory, and Automotive Engine Applications, Dissertation, Department of Electrical Engineering Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden, 1999
- [28] Pappis C. P., Sugeno M., Fuzzy Relational Equations and the Inverse Problem, Fuzzy Sets and Systems, 15, pp 79-90, 1985
- [29] Pula L., Balog E., Kiss I., Kóczy L. T., Berta I., Increasing the Safety of Industrial Processes by Using Fuzzy Logic, 8. Internationale Wissenschaftliche Konferenz-Hochspannungstechnik, Stará Lesná, Szlovákia, 1996.
- [30] Reyes V, Nielsen A, Emission Control During Transition Periods Using an Expert Supervisory Control System, 6<sup>th</sup> International Conference on Electrostatic Precipitation, Budapest, 1996
- [31] Ross T. J., Fuzzy Logic with Engineering Applications, McGraw-Hill Inc., New York, San Francisco, London, Montreal, Sydney, Tokyo, etc., 1995

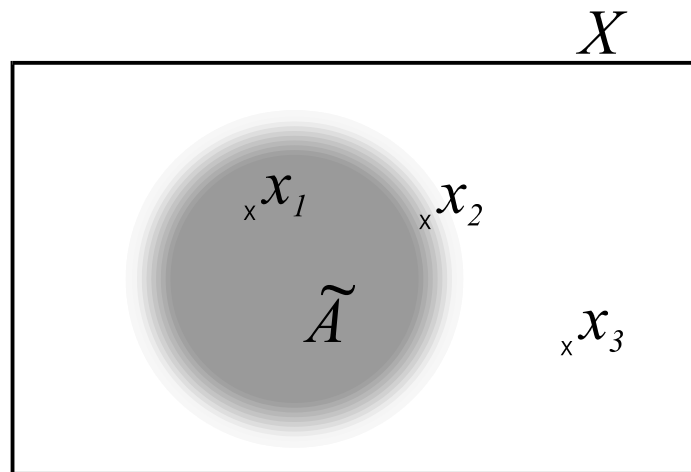
- [32] Singer D., A Fuzzy Set Approach to Fault Tree and Reliability Analysis, Fuzzy Sets and Systems 34, pp. 145-155, 1990
- [33] Terano T., Asai K., Sugeno M., Fuzzy Systems Theory and its Applications, Academic Press, Inc., Boston, San Diego, New York, London, Sydney, Tokyo, Toronto, 1992
- [34] Wells D. J., The Diagnosis of Nuclear Power System Faults, Dissertation, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Systems Engineering Group, Clarkson University, 1984
- [35] White H. J., Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1963
- [36] Zadeh L. A., Fuzzy Sets. Information and Control Vol. 8, 1965, pp. 338-353
- [37] Zadeh L. A., Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, IEEE Trans. Systems Man & Cybernet. 3, 28-44, 1973
- [38] Zadeh L. A., The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems, Fuzzy Sets and Systems, 11, pp. 199-277, 1983

## 11. Függelék

### 11.1. A fuzzy halmazelmélet alapjai

A fuzzy halmazokat például a 25. ábrán látható módon lehet szemléltetni. A téglalap alakú  $X$  halmaz jelenti azt a teret, melyen a  $\tilde{A}$  fuzzy halmaz értelmezett. A fuzzy halmaz az  $X$  részhalmaza és a határának elmosódottsága arra utal, hogy az  $x$  pont a helyzetétől függően része, nem része, illetve csak bizonyos mértékig része az  $A$  halmaznak. A fuzzy halmazelmélet annak a mértékét határozza meg, hogy az  $X$  halmaz elemét képező  $x$  elem mennyire tartozik bele a  $\tilde{A}$  fuzzy halmazba. Azt a függvényt, amely minden  $x$ -re megadja az  $\tilde{A}$  fuzzy halmazba való tartozás mértékét, az  $\tilde{A}$  fuzzy halmaz tagsági függvényének nevezzük és általában  $\mu_A(x)$ -el jelöljük. [33][36] Ezek szerint az ábrán mutatott példára a következőket írhatjuk:

$$\mu_A(x_1) = 1, \quad \mu_A(x_2) = 0,6 \quad \mu_A(x_3) = 0$$



25. ábra, Fuzzy halmaz

A fuzzy halmazok matematikai definícióját a következőképpen lehet megadni:

Legyen a  $\mu$ -vel jelölt függvény olyan, hogy  $\mu: X \rightarrow [0,1]$  és  $\tilde{A}$  pedig jelentse  $X$ -nek egy fuzzy részhalmazát. Ekkor  $\mu_{\tilde{A}}$ -t az  $\tilde{A}$  fuzzy halmaz tagsági függvényének nevezzük.

Mivel a fuzzy halmazokat általában egy általános  $X$  halmaz részeként definiáljuk, a legtöbb esetben a „rész” megnevezés elmarad és csak egyszerűen fuzzy halmazokról beszélünk. A definícióból következik, hogy mivel végtelen számú fuzzy halmaz létezhet és bármilyen formájú tagsági függvényt definiálhatunk, nem mindig egyszerű a fuzzy halmazokat nyelvi eszközökkel (szavakkal) körülírni.

A halmazelméletben a műveleteknek három fő csoportja van, az első az uniót, a második a metszetet, a harmadik pedig a komplementert szolgáltató műveletek. A klasszikus halmazelméletben két halmaz (pl. a  $C$  és  $D$  halmazok) unióját a következőképpen definiálhatjuk:

$$(75) \quad C \cup D = \{x | x \in C \text{ vagy } x \in D\}.$$

Mivel a fuzzy halmazokat a tagsági függvényükön keresztül definiáltuk, a fuzzy halmazok uniójának kifejezésére a fenti definíciót nem alkalmazhatjuk. A műveletek definiálásakor a tagsági függvényeket kell felhasználnunk.

Az  $\tilde{A}$  és  $\tilde{B}$  fuzzy halmazok **unióját** a következő tagsági függvénnyel lehet megadni:

$$(76) \quad \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x).$$

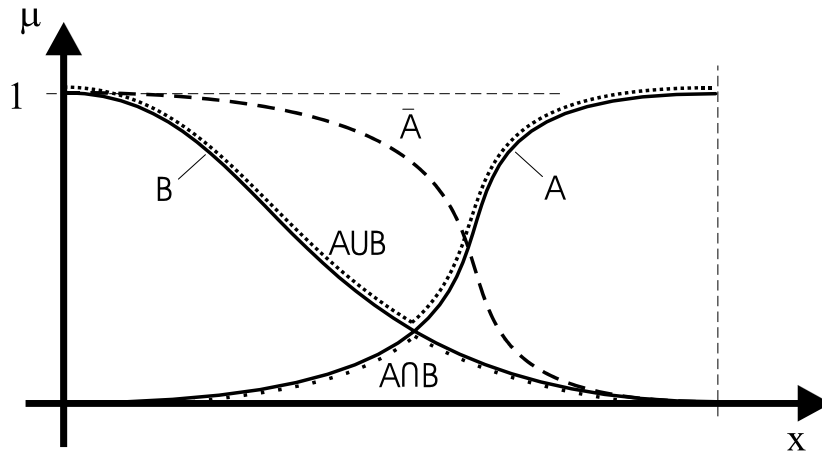
Az  $\tilde{A}$  és  $\tilde{B}$  fuzzy halmazok **metszetét** a következő tagsági függvénnyel lehet megadni:

$$(77) \quad \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x).$$

Az  $\tilde{A}$  fuzzy halmaz **komplementerét** a következő tagsági függvénnyel lehet megadni:

$$(78) \quad \mu_{\tilde{A}^c}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x).$$

A fenti egyenletekben a  $\wedge$  és a  $\vee$  szimbólumok a MIN és a MAX operátorokat jelölik. A definíciók grafikus ábrázolását a 26. ábrán láthatjuk.



26. ábra, Fuzzy halmazokon végzett műveletek tagsági függvényei

Ezekre a műveletekre igaz, hogy a klasszikus halmazelmélet kiterjesztései, hiszen ott a tagsági érték 1 vagy 0 lehet és ezt alkalmazva a fenti definíciókra megkapjuk a klasszikus halmazelméletben megszokott műveleteket [36]. Most pedig definiáljuk az ekvivalencia relációt és az inklúzió relációt a fuzzy halmazok körében:

$$(79) \quad \tilde{A} = \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x), \quad \forall x \in X$$

$$(80) \quad \tilde{A} \subset \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x), \quad \forall x \in X.$$

Mivel a fuzzy halmazokat a klasszikus halmazok kiterjesztésének tekintjük, nem kell azon csodálkoznunk, hogy bizonyos tulajdonságok, melyek igazak voltak a klasszikus halmazok körében, a fuzzy halmazoknál nem lesznek igazak. Ilyenek például a fuzzy komplementerekkel végzett bizonyos műveletek. Míg a kétszeres negálás és a De Morgan azonosságok fuzzy halmazokra is teljesülnek,

$$(81) \quad \overline{\overline{\tilde{A}}} = \tilde{A}$$

$$(82) \quad \overline{\tilde{A} \cup \tilde{B}} = \overline{\tilde{A}} \cap \overline{\tilde{B}}$$

$$(83) \quad \overline{\tilde{A} \cap \tilde{B}} = \overline{\tilde{A}} \cup \overline{\tilde{B}}$$

addig a halmaz saját komplementerével vett uniója nem adj ki az univerzum halmazt, csakúgy, mint ezen halmazok metszete nem eredményez üres halmazt.

$$(84) \quad \tilde{A} \cup \overline{\tilde{A}} \neq X$$

$$(85) \quad \tilde{A} \cap \overline{\tilde{A}} \neq \emptyset$$

**Normál fuzzy halmazoknak** nevezzük azokat a fuzzy halmazokat, melyekre igaz, hogy van 1 tagsági értékkel rendelkező elemük:

$$(86) \quad \tilde{A} \text{ normál fuzzy halmaz} \Leftrightarrow \max_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) = 1$$

Azokat a fuzzy halmazokat nevezzük **konvex fuzzy halmazoknak**, melyekre mindig igaz, hogy  $\forall x \in [a, b]$  esetén

$$(87) \quad \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \mu_{\tilde{A}}(a) \wedge \mu_{\tilde{A}}(b)$$

Egy  $\tilde{A}$  fuzzy halmaz  $\alpha$  **vágatát** a következőképpen definiáljuk:

$$(88) \quad \begin{aligned} \tilde{A}_\alpha &= \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) > \alpha\}, \alpha \in [0,1] \\ \tilde{A}_\alpha &= \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}, \alpha \in [0,1] \end{aligned}$$

A felső egyenlet a gyenge, az alsó a szigorú  $\alpha$  vágatot jelenti [33].

## 11.2. L-R típusú fuzzy számok

Ebben a fejezetben a fuzzy számok és azon belül is az L-R típusú fuzzy számok értelmezését és definícióját adjuk meg. Az itt használt jelöléseket a későbbiekben is következetesen betartjuk az egyértelműség érdekében. A következő definíció a Zadeh-től származik, a valós függvények fuzzy tartományra való kiterjesztését definiálja [37][38].

Az  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  valós változójú  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  valós függvény kiterjesztése a fuzzy intervallumban az  $\{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n\}$  fuzzy változójú  $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$  fuzzy függvény, a következő tagsági függvénnyel

$$(89) \quad \tilde{u}_y(t) = \sup_{t=f(s_1, s_2, \dots, s_n)} \min(\tilde{\mu}_{x_1}(s_1), \tilde{\mu}_{x_2}(s_2), \dots, \tilde{\mu}_{x_n}(s_n)), \text{ ahol}$$

$\tilde{\mu}_{x_1}(s_1), \tilde{\mu}_{x_2}(s_2), \dots, \tilde{\mu}_{x_n}(s_n)$  a fuzzy változók tagsági függvényei. A fuzzy és a „crisp” változókat a „hullám” jel különbözteti meg [32]. A fuzzy szám definíciója a következő:

A fuzzy szám egy olyan folytonos halmaza az  $R$  valós számok halmazának, mely normál és konvex egyidejűleg [19]. A normalitás azt jelenti, hogy

$$(90) \quad \exists x \in R : \forall x \tilde{\mu}_A(x) = 1,$$

vagyis a fuzzy halmaz maximális értéke 1. A fuzzy halmaz normál akkor és csak akkor, ha a (90) feltétel teljesül. Egy fuzzy halmazt konvexnek mondunk akkor és csak akkor, ha  $\forall (x, y, z) \in R^3$  úgy, hogy

$$(91) \quad y \in [x, z] : \mu_A(y) \geq \min(\mu_A(x), \mu_A(z)).$$

Szemléletesen kifejezve a konvexitás annyit jelent, hogy a fuzzy szám tagsági függvényének „harang alakúnak” kell lennie.

Az  $L$  és  $R$  jelű függvényeket a fuzzy számok referencia függvényének nevezzük akkor és csak akkor, ha

$$(92) \quad \begin{aligned} L(-x) &= L(x) \\ L(0) &= 1 \end{aligned}$$

$L$  csökkenő függvény a  $[0, +\delta)$  intervallumon.

Az  $A$  fuzzy számot  $L$ - $R$  típusú fuzzy számnak mondjuk akkor és csak akkor, ha

$$(93) \quad \begin{aligned} \mu_{\tilde{m}}(x) &= L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right), \text{ ha } x \leq m; \alpha > 0 \\ \mu_{\tilde{m}}(x) &= R\left(\frac{x-m}{\beta}\right), \text{ ha } x \geq m; \beta > 0 \end{aligned}, \text{ ahol}$$

$L$  a bal oldali,  $R$  pedig a jobb oldali referencia függvénye az  $A$  fuzzy számnak.  $m$  valós szám jelenti a tagsági függvény 1 tagsági értékkel rendelkező független változóját ( $m=x: \mu_A(x)=1$ ),  $\alpha$  és  $\beta$  pedig a jobb és bal oldali szórások. Ha a szórások 0-val egyenlők, akkor az  $A$  szám egy nem-fuzzy szám. Ezt a formulát használva az  $A$  fuzzy szám az  $(m, \alpha, \beta)$  számhármassal adható meg. Ez a formalizmus alkalmas egy „körülbelül  $m$ ” értékű szám fuzzy reprezentációjára [14]. Ezzel a jelölérendszerrel az összeadás, kivonás, szorzás és osztás művelete a következőképpen fejezhető ki:

$$(94) \quad (m, \alpha, \beta)_{LR} \oplus (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m+n, \alpha+\gamma, \beta+\delta)_{LR},$$

$$(95) \quad (m, \alpha, \beta)_{LR} \square (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m - n, \alpha + \gamma, \beta + \delta)_{LR},$$

$$(96) \quad (m, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (n, \gamma, \delta)_{LR} = (mn, m\gamma + n\alpha, m\delta + n\beta)_{LR}, \text{ ha } m, n > 0,$$

$$(97) \quad (m, \alpha, \beta)_{LR} \square (n, \gamma, \delta)_{LR} = \left( \frac{m}{n}, \frac{m\gamma + n\alpha}{n^2}, \frac{m\delta + n\beta}{n^2} \right)_{LR}, \text{ ha } m, n > 0$$

A (96) egyenlet csak viszonylag kis szórások esetén ad megfelelően pontos eredményt, nagyobb szórásoknál a következő kifejezést érdemes használni:

$$(98) \quad (m, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (n, \gamma, \delta)_{LR} = (mn, m\gamma + n\alpha - \alpha\gamma, m\delta + n\beta + \beta\delta)_{LR}, \text{ ha } m, n > 0,$$

### 11.3. Fuzzy relációk és az inverz probléma

Tegyük fel, hogy léteznek  $\tilde{A}$  és  $\tilde{Q}$  fuzzy halmazok, és létezik közöttük  $\tilde{R}_1$  fuzzy reláció, melyet mátrix formában megadhatunk. Létezzon egy másik,  $\tilde{R}_2$  reláció, mely a  $\tilde{Q}$  fuzzy halmaz és egy  $\tilde{B}$ -vel jelzett fuzzy halmaz közötti kapcsolatot jelöli. Ekkor az  $\tilde{A}$  és  $\tilde{B}$  fuzzy halmazok közötti kapcsolatot az  $\tilde{R}$  fuzzy reláció adja meg, melyet a következőképpen lehet meghatározni:

$$(99) \quad \tilde{R} = \tilde{R}_1 \circ \tilde{R}_2, \text{ ahol}$$

◦ az  $\tilde{R}_1$  és  $\tilde{R}_2$  fuzzy relációk min-max kompozícióját jelöli. Az  $\tilde{R}_1$  és  $\tilde{R}_2$  fuzzy relációk max-min kompozícióját a következőképpen lehet meghatározni:

$$(100) \quad \tilde{R}_1 \circ \tilde{R}_2(a, b) = \mu_{\tilde{R}}(a, b) = \max[\min(\mu_{\tilde{R}_1}(a, q), \mu_{\tilde{R}_2}(q, b))], \text{ ahol}$$

$\mu_{\tilde{R}_1}(a, q)$  jelenti az  $\tilde{R}_1$  reláció,  $\mu_{\tilde{R}_2}(q, b)$  az  $\tilde{R}_2$  reláció,  $\mu_{\tilde{R}}(a, b)$  pedig az  $\tilde{R}$  reláció tagsági függvényét [28].

#### 11.3.1. Definíciók

A megoldás értelmezéséhez szükségünk van négy művelet, az  $\alpha$ , a  $\beta$ , a  $\delta$  kompozíciók és a  $\Phi$  halmazok, valamint két tulajdonság a redundancia és a dominancia fogalmának definiálására [28].



**$\alpha$  kompozíció**

Az  $x$  és  $y$  skalár mennyiségek  $\alpha$  kompozícióját  $x \alpha y$ -nal jelöljük és a következőképpen kell kiszámítani:

$$(101) \quad x \alpha y = \begin{cases} 1 & \text{ha } x \leq y \\ y & \text{ha } x > y \end{cases}.$$

Ha adott egy  $m \times n$ -es  $R = [r_{ij}]$  mátrix és  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  sorvektor, akkor az  $R \alpha a = [w_{ij}]$  a következőképpen adható meg:

$$(102) \quad w_{ij} = r_{ij} \alpha a_j.$$

 **$\beta$  kompozíció**

Az  $x$  és  $y$  skalár mennyiségek  $\beta$  kompozícióját  $x \beta y$ -nal jelöljük és a következőképpen kell kiszámítani:

$$(103) \quad x \beta y = \begin{cases} 0 & \text{ha } x < y \\ y & \text{ha } x \geq y \end{cases}.$$

Ha adott egy  $m \times n$ -es  $R = [r_{ij}]$  mátrix és  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  sorvektor, akkor az  $R \beta a = [z_{ij}]$  a következőképpen adható meg:

$$(104) \quad z_{ij} = r_{ij} \beta a_j.$$

 **$\delta$  kompozíció**

Ha adott egy  $m \times n$ -es  $R = [r_{ij}]$  mátrix és  $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  sorvektor, akkor e kettő  $\delta$  kompozícióját  $R \delta b$ -vel jelöljük és a következőképpen kell kiszámítani:

$$(105) \quad R \delta b = [s_{ij}]$$

$$s_{ij} = \left( \min_{k=1}^n (r_{ik} \alpha b_k) \right) \beta (r_{ij} \beta b_j), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

A fenti kifejezésben  $\min_{k=1}^n(r_{ik} \alpha b_k)$  a  $\min(R \alpha b)^T$  sorvektornak az  $i$ -edik eleme és  $(r_{ij} \beta b_j)$  pedig az  $(R \beta b)$   $m \times n$ -es mátrix  $(i,j)$ -edik eleme. Így  $R \delta b$ -t meghatározhatjuk a  $\min(R \alpha b)^T$  sorvektor és az  $(R \beta b)$  mátrix segítségével.

### **$\Phi$ halmazok**

Ha adott  $a=(a_1, a_2, \dots, a_m)^T$  oszlopvektor úgy, hogy  $a_i=\max(a)$  vagy  $0$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), akkor a  $\phi(a)$  oszlopvektorokból álló  $\Phi(a)$  halmazt a következőképpen definiáljuk:

$$(106) \quad \begin{aligned} \Phi(a) &= \{\phi(a)\} \\ \phi(a) &= (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m)^T \\ \phi_i &= 0 \text{ vagy } \max(a) \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad \sum_{i=1}^m \phi_i = \max(a) \end{aligned}$$

Így azt mondhatjuk, hogy ha  $a$ -ban  $k$  darab nullától különböző elem található, akkor  $\Phi(a)$ -ban  $k$  darab  $\phi(a)$  oszlopvektor található. Természetesen  $\Phi(a)$ -t akkor és csak akkor lehet meghatározni, ha  $a_i=\max(a)$  vagy  $0$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ).

Ha adott egy  $m \times n$ -es  $R=[r_{ij}]$  mátrix melyben  $r_j$  jelöli az  $R$  mátrix  $j$ -edik oszlopvektorát és feltételezzük, hogy  $\Phi(r_j)$  létezik minden  $j=1, 2, \dots, n$ -re, akkor a  $\phi(R)$  mátrixok  $\Phi(R)$  halmazát a következőképpen lehet megadni:

$$(107) \quad \begin{aligned} \Phi(R) &= \{\phi(R)\} \\ \phi(R) &= [\phi(r_1), \phi(r_2), \dots, \phi(r_n)] \end{aligned}$$

Ha  $\Phi(R)$ -ben található mátrixok száma  $z$ , akkor

$$(108) \quad \begin{aligned} z &= \prod_{j=1}^n z_j, \text{ ahol} \\ z_j &= \begin{cases} a \text{ nullától különböző elemek száma } r_j \text{ -ben ha } r_j \neq 0 \\ 1 & \text{ha } r_j = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

### **Redundáns vektorok**

Legyen adott egy  $m \times n$ -es  $R=[r_{ij}]$  mátrix és  $b=(b_1, b_2, \dots, b_n)$  sorvektor. A  $\max(\phi_1(R \delta b))^T \in \max(\Phi(R \delta b))^T$  vektort *redundánsnak* mondjuk, ha létezik egy olyan  $\max(\phi_2(R \delta b))^T \in \max(\Phi(R \delta b))^T$  vektor, melyre fennáll, hogy

$$(109) \quad \max(\phi_2(R \delta b))^T \leq \max(\phi_1(R \delta b))^T$$

### **Domináns vektorok**

Legyen  $s_k$  és  $s_l$  az  $S$  mátrix  $k$ -adik és  $l$ -edik oszlopa. Azt mondjuk, hogy  $s_l$  *dominálja* az  $s_k$  oszlopot, ha

$$(110) \quad \begin{aligned} s_{il} \neq 0 &\Rightarrow s_{ik} \neq 0 \text{ és } s_{ik} \leq s_{il}, \quad \forall i \\ s_{il} = 0 &\Rightarrow s_{ik} \text{ tetszőetsz } s. \end{aligned}$$

### **11.3.2. Az inverz probléma megoldása**

A továbbiakban az egyszerűség kedvéért a fuzzy halmazok jelölésekor elhagyjuk a betűjel feletti hullámos vonalat, mivel ezen túl minden esetben fuzzy halmazokról lesz szó. A fentieket figyelembe véve az *inverz probléma* a következőképpen fogalmazható meg [28]:

Legyen  $A$  az  $U = \{u_i | i = 1, 2, \dots, m\}$  fuzzy halmaz részhalmaza úgy, hogy  $A = \{(u_i, a_i) | i = 1, 2, \dots, m\}$ , legyen  $B$  a  $V = \{v_j | j = 1, 2, \dots, n\}$  fuzzy halmaz részhalmaza úgy, hogy  $B = \{(v_j, b_j) | j = 1, 2, \dots, n\}$  és legyen  $R$  fuzzy reláció úgy, hogy  $R = U \times V = \{(u_i, v_j), r_{ij} | i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$ . Az előbbi kifejezésben  $a_i$ ,  $b_j$  és  $r_{ij}$  jelölik az  $u_i$ ,  $v_j$  és  $(u_i, v_j)$ -re vonatkozó tagsági értékeket. Tegyük fel, hogy

$$(111) \quad B = A \circ R, \text{ azaz } b_j = \max_i [\min(a_i, r_{ij})], \quad 1 \leq j \leq n.$$

Ekkor adott  $R$  és  $B$  mellett határozzuk meg  $A$ -t úgy, hogy kielégítse a (111)-es egyenletet. A probléma megoldása a következő egyenlőtlenséggel adható meg:

$$(112) \quad \max(\phi(S^*))^T \leq a \leq \min(R \alpha b)^T, \quad \forall \phi(S^*) \in \Phi(S^*), \text{ ahol}$$

$S^*$  a következőképpen származtatható. Legyen adott egy  $m \times n$ -es  $R=[r_{ij}]$  mátrix, egy  $b=(b_1, b_2, \dots, b_n)$  sorvektor és tegyük fel, hogy  $\exists a : a \circ R = b$ . Ekkor legyen  $S = R \delta b = [s_{ij}]$ . Ha  $S_0$ -nak nevezzük azt a mátrixot, melyet az  $S$  mátrixból úgy nyerünk, hogy annak csak 0-át tartalmazó oszlopvektorait töröljük, akkor belátható, hogy

$$(113) \quad \max(\Phi(S))^T = \max(\Phi(S_0))^T.$$

Jelöljük  $S_k$ -val azt a mátrixot, melyet az  $S_0$  mátrixból úgy nyerünk, hogy annak  $k$ -adik oszlopvektorát töröljük, valamint  $s_k$ -val az  $S_k$  mátrix  $k$ -adik oszlopát. Belátható, hogy ha  $s_k$  egy dominált oszlopvektora  $S_k$ -nak, akkor és csak akkor

$$(114) \quad \begin{aligned} & \max(\Phi(S_k))^T \subset \max(\Phi(S))^T \text{ és} \\ & \exists \phi(S_k) \in \Phi(S_k) : \max(\phi(S))^T \geq \max(\phi(S_k))^T, \forall \phi(S) \in \Phi(S) \end{aligned}$$

A (114) egyenletben szereplő kifejezés jelentősége abban áll, hogy  $S_k$ -ből törölve az  $s_k$  dominált oszlopvektorokat, a

$$(115) \quad \max(\phi(S_k))^T \leq a \leq \min(R \alpha b)^T, \quad \forall \phi(S_k) \in \Phi(S_k)$$

megoldásból kizárunk redundáns vektorokat, így csökkentve a megoldáshalmazt. Jelöljük  $S^*$ -al azt a mátrixot, melyet az  $S_0$  mátrixból úgy nyerünk, hogy annak minden dominált oszlopvektorát töröljük. Ekkor az (114) egyenlet folyományaként azt kapjuk, hogy

$$(116) \quad \begin{aligned} & \max(\Phi(S^*))^T \subset \max(\Phi(S))^T \text{ és} \\ & \exists \phi(S^*) \in \Phi(S^*) : \max(\phi(S))^T \geq \max(\phi(S^*))^T, \forall \phi(S) \in \Phi(S) \end{aligned}$$

Ezen redukció ellenére azonban előfordulhat, hogy redundáns vektorok maradnak a  $\max(\Phi(S^*))^T$  mátrixban.

### 11.3.2.1. A megoldás létezésének szükséges és elégséges feltétele

Sanchez, valamint Pappis és Sugeno alapján az inverz probléma megoldásának szükséges és elégséges feltétele a következő kifejezéssel adható meg:

$$(117) \quad \min(R \alpha b)^T \circ B = b.$$

Ennek részletes bizonyításával itt nem foglalkozunk, mivel erre kimerítő irodalom található a fenti szerzőktől [28].

## Nyilatkozat

Alulírott Balog Endre kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2004.október 25.

.....  
Balog Endre