Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamosmérnöki Tudományok Doktori Iskola

A villámvédelem valószínűséggel súlyozott vonzási tér elméletének továbbfejlesztése

A különleges geometriájú építmények villámvédelme kiemelten a megújuló energiatermelésben

PhD disszertáció

Tóth Zoltán

Témavezető

Dr. Kiss István

habilitált egyetemi docens

Budapest

2021

Egy matematikailag szép elmélet nagyobb valószínűséggel igaz, mint egy ronda, amely egyezik némi kísérleti eredménnyel.

"Paul Adrien Maurice Dirac"

Nyilatkozat

Alulírott, Tóth Zoltán kijelentem, hogy doktori értekezésemet 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, 2021. február 16.

Tóth Zoltán

Tájékoztató

A jelen értekezésről készített hivatalos bírálatok, valamint a doktori munka védéséről készült jegyzőkönyv, a védést követően a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karának Dékáni Hivatalában érhetők el. (Budapest XI., Magyar Tudósok körútja 2. Q épület B szárny mfsz.)

Tartalomjegyzék

Rövidítések jegyzéke **7**

1. fejezet Bevezetés **8**

2. fejezet A megújuló energiatermelés szabványos, a gyakorlatban használt villámvédelmi megoldásai **12**

2.1. A szélerőművek villámvédelmi problémái 13

2.2. A fotovoltaikus erőművek villámvédelmi problémái 15

3. fejezet A gördülő gömb módszer (RSM) alkalmazási problémája lapostetős és magas épületeknél **17**

3.1. A lapos tetők 18

3.2. A szigetelő réteg hatása 19

4. fejezet A laboratóriumi mérések eredményeinek kiterjesztése **21**

4.1. A hagyományos elrendezések továbbgondolása 23

4.2. Módosított, Horváth féle elrendezés a zivatarfelhő töltésének reprezentálásával 24

4.3. A laboratóriumi mérések eredményei 25

4.4. Az átütési feszültség szerepe és fontossága 26

5. fejezet A szélgenerátorlapátokat érő villámcsapások gyakoriságának és hatásainak vizsgálata **28**

5.1. A szigetelő réteg hatása a villámvédelmi felfogók vonzási terére 29

5.2. A szélerőmű lapátjának vonzási tere egyreceptoros és kétreceptoros esetben 32

5.3. A mérési eredmények konklúziója a szélerőművek lapátjain a villámvédelem hatásfokának növelése céljából 36

6. fejezet Nagy kiterjedésű és nagy teljesítményű fotovoltaikus erőművek villámvédelme **37**

6.1. A fotovoltaikus erőművek optimális (biztonságos és gazdaságos) védelme a villámcsapások primer és szekunder hatásai ellen 38

6.2. A fotovoltaikus erőműveknek a speciális geometriából adódó jellegzetes tulajdonságai 42

6.3. A vagyonvédelmi eszközök mint a primer villámvédelem részei 43

6.4. A PMAS számítás eredményei 45

6.5. A kockázat változása a napelem méreteinek függvényében 46

6.6. Javaslat a modellszámítások alapján az új kockázatbesorolási értékekre 49

6.7. Összegzés 51

7. fejezet A tetőszerkezet, mint a villámvédelmi rendszer része 52

7.1. A tetőszerkezet anyaga és a becsapás valószínűsége 53

7.2. Laboratóriumi mérések eredményei 54

7.3. Eredmények összegzése 58

8. fejezet Tézisek 60

8.1. Tézis 1 60

8.2. Tézis 2 63

8.3. Tézis 3 66

Köszönetnyilvánítás 69

Ábrák jegyzéke 70

Táblázatok jegyzéke 75

Irodalomjegyzék 76

Saját publikációk listája 85

Függelék

F-1. Fogalmak rendszerezése az angol szakirodalmi megfelelőivel F-1

F-2. A villámok kialakulása és jellegzetes paraméterei F-2

F-2.1. A zivatarfelhők kialakulása F-2

F-2.2. A villámcsatorna kifejlődése F-7

F-2.2.1. Felfele meginduló kisülés F-10

F-2.3. A villám fizikai tulajdonságai és jellegzetes paraméterei F-11

F-3. Az Elektro-Geometriai Modell F-15

F-4. A valószínűséggel súlyozott vonzási tér elmélet F-17

F-5. Grafikonok F-21

F-6. Táblázatok F-25

F-7. Ábrák F-27

Rövidítések jegyzéke

DEGM .... **D**ynamic **E**lectro-**G**eometric **M**odel
.... ***d**inamikus **e**lektro-**g**eometriai **m**odell*

EGM .... **E**lectro-**G**eometric **M**odel
.... ***e**lektro-**g**eometriai **m**odell*

EPH .... **e**gyen**p**otenciálú **h**álózat

HMKE .... **h**áztartási **m**éretű **k**is**e**rőmű

LPL .... **L**ightning **P**rotection **L**evel
.... *primer villámvédelmi szint*

LPS .... **L**ightning **P**rotection **S**ystem
.... *primer villámvédelmi rendszer*

MM .... **M**esh **M**ethod
.... *rácsháló módszer*

MTBF .... **M**ean **T**ime **B**etween Shielding **F**ailures
.... *védelmi hibák között eltelt átlagos idő*

PAM .... **P**rotection **A**ngle **M**ethod
.... *védőszög módszer*

PMAS .... **P**robability-**M**odualted **A**ttraction **S**pace theory
.... *valószínűséggel súlyozott vonzási tér elmélet*

PV .... **P**hoto**V**oltaic
.... *fotovoltaikus*

RSM .... **R**olling **S**phere **M**ethod
.... *gördülő gömb módszer*

SPD .... **S**urge **P**rotection **D**evice
.... *szekunder villámvédelmi eszköz*

SPS .... **S**ecunder **P**rotection **S**ytem

.... *szekunder villámvédelmi rendszer*

VER .... **v**illamos**e**nergia-**r**endszer

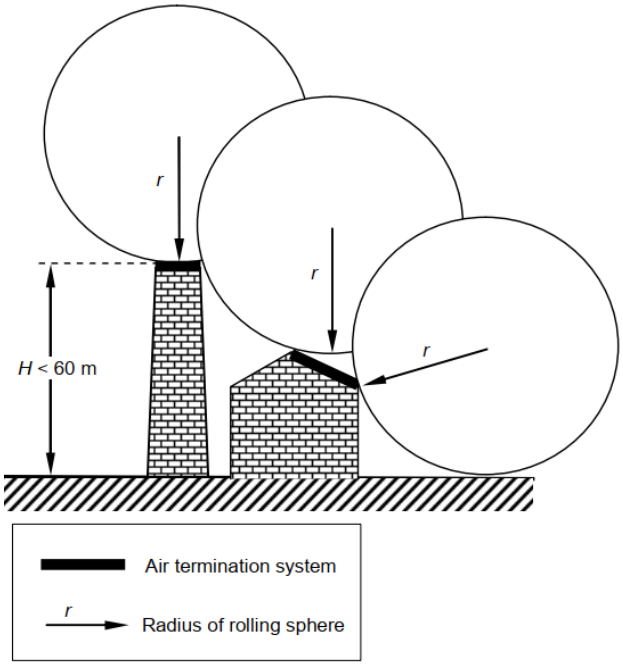
1. fejezet
Bevezetés

Régóta foglalkoztatja az embereket, hogy mi okozhatja a villámokat és azok káros hatásait. Míg kezdetben különböző istenhez vagy istenekhez kötötték, addig a tudományos vizsgálódások megállapították, hogy milyen eredete is van ennek a jelenségnek.

A villám nem más, mint az Isten nyila (...). És ha már egyenesen a Mindenható fáradoznék azon, hogy célba vegyen minket, akkor úgyis minden hiába. Nem igaz? Mert az Isten bizonyára kitűnő sportlövész. Ha puskavégre akar kapni minket, ha pontosan ide akar csördíteni a villámostorával, hát akkor úgyis elkap.
„Száraz Miklós György”

Az ókori görög tudósok munkáit követően Otto von Guericke ismerte fel a XVI. században, hogy a villámok és a dörzsgépekkel létrehozott elektrosztatikus szikrák ugyanannak a fizikai jelenségnek, a villamos kisülésnek különféle formái. **[Horváth, 1974]** Benjamin Franklin 1750-ben feltalálta a villámhárító berendezést. **[Franklin, 1750]** Az épület tetejére egy fém rudat helyezett el, amelyet egy fém levezető sodrony segítségével leföldelt. A villámhárító működését Franklin úgy magyarázta, hogy a földelt fémrúd csúcsán kialakuló villamos kisülés semlegesíti a felhő töltését. A helytelen magyarázat ellenére a villámhárítókat azóta is eredményesen használják szerte a világon. A villámhárító berendezés valójában úgy működik, hogy egyrészt biztonságos becsapási pontot kínál a villámnak, másrészt gondoskodik arról, hogy a rendkívül nagy villámáramot biztonságos úton levezesse a földbe. Ezt a fajta villámvédelmet elsőként 1760-ban alkalmazták Philadelphiában. Érdemes megjegyezni, hogy hasonlót már 1718-ban Reimann János Ádám lejegyzett egy eperjesi 1673-as és egy 1718-as esetről. Ezek a villámok a tetőn lévő fém alkatrészekbe csaptak, és a fémhez csatlakozó

levezetőkön lefolytak a földbe anélkül, hogy bármilyen kár következett volna be az épületben. **[Horváth, 1974]**



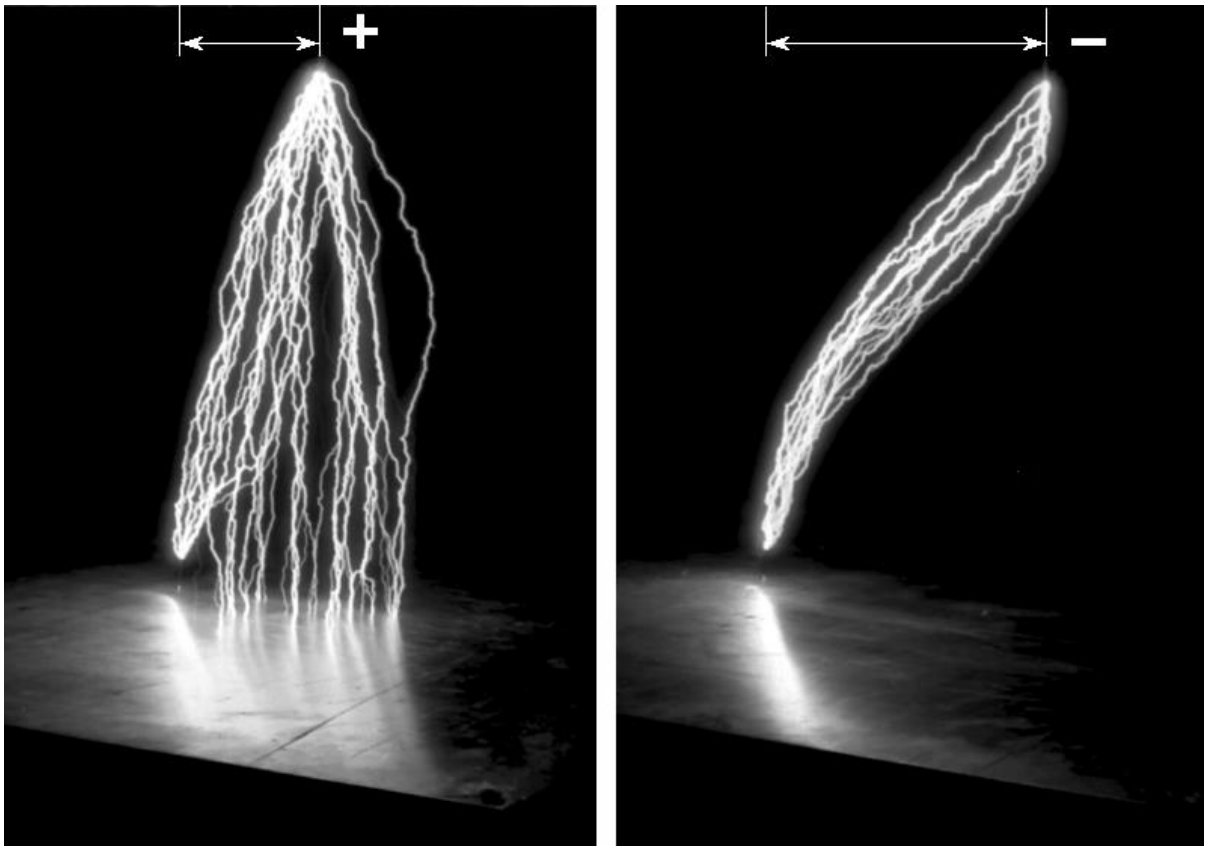
1-1. ábra Gördülő gömb módszer (RSM) alkalmazása a szabvány szerinti értelmezésben (ld. még a 3. fejezetben) **[Horváth, 2008; IEC, 2011]**

A villámkutatással és a villámvédelemmel foglalkozó kutatók évszázadokon keresztül azt az úgynevezett védett teret keresték, amelynek létezését egy villámhárító környezetében feltételezték. A gyakorlati események sora azonban bebizonyította, hogy egy villámhárító környezetében nem definiálható a védett tér. Horváth Tibor professzor úr más irányból közelítette meg a problémát. A védett tér helyett egy objektum, illetve egy villámhárító rendszer vonzási terét határozta meg. Kereste a vizsgált objektumok körülötti tér azon részét, amelyből a villámcsapások a vizsgált objektumot fogják érni. Kutatásai során az elektro-geometriai modellt (EGM) alapul véve azt tűzte ki célul, hogy meghatározza a vizsgált objektumot érő villámcsapások gyakoriságát. **[Horváth, 1960, 1991, 1967, 2012b]** Megalkotta a valószínűséggel súlyozott vonzási tér elméletet (PMAS, **F-3. függelék, 5-10. ábra**), és a felfogók elhelyezésének szerkesztésére és ellenőrzésére megkönnyítésére szolgáló gördülő gömb módszert (RSM, **1-1. ábra**). A gördülő gömb módszert **[Horváth, 1973]** elsőként Dr. Horváth Tibor publikálta 1973-ban, ami 1962 óta része volt a magyar villámvédelmi szabványnak. A gördülő gömb módszert ma már szerte a világban a szakirodalomban és a nemzetközi szabványokban is szerepeltetik. A gördülő gömb módszer egyik legújabb leírását

az IEC 62305 villámvédelmi szabvány is tartalmazza, bár az ott mellékelt ábra (**1-1. ábra**) nem megfelelően, eléggé félreérthető alkalmazásban mutatja be.

A valószínűséggel súlyozott vonzási tér elmélet (PMAS) jelentősen átalakította a korszerű villámvédelmet. Az elmélet alkalmazásával számszerűsíteni tudjuk az adott objektumba becsapó villámcsapások gyakoriságának számítását. Az idő előrehaladtával azonban számos új, megoldatlan probléma került felszínre. A vonzási teret a Horváth–Drechsler kísérlet során mérték ki először **[Horváth, 1960]**, bizonyították a vonzási tér polaritásfüggését (**1-2. ábra**). **[Horváth, 1963]**

A szabványokban meghatározott számítási módok és megadott értékek az alacsony tereptárgyakra vonatkoznak. Magas építmények **[Madsen et al., 2009]** esetén (> 30 m) más értékekkel szükséges számolni. A nagy kiterjedésű objektumok esetén viszont korlátozottan használhatók. A felmerült problémák megoldására a korábbiaktól eltérő metódusok szükségesek.



1-2. ábra A polaritásfüggés jelentőségének bemutatása egy csúcs-sík elektród elrendezés segítségével **[Horváth, 1960]**

Kutatásom célja, hogy a villámvédelmi iskola által kifejlesztett metodikát továbbfejlesztve gazdaságosabb villámvédelmi kialakításokat dolgozzak ki. Megválaszolandó kérdés a villámvédelemben, hogy miként hatnak a védendő objektumok felépítésekor gyakorta alkalmazott szigetelőanyagok a villámvédelemben a vonzási térre.

Kérdés, hogy az egyre terjedő, különböző megújuló energiatermelő egységek telepítésekor milyen peremfeltételek mellett érdemes bárminemű villámvédelem kialakítása. Értve ez alatt a primer (magát az építményt védő), vagy szekunder (az építményen belül lévő berendezések túlfeszültség-védelme) villámvédelmi megoldásokat.

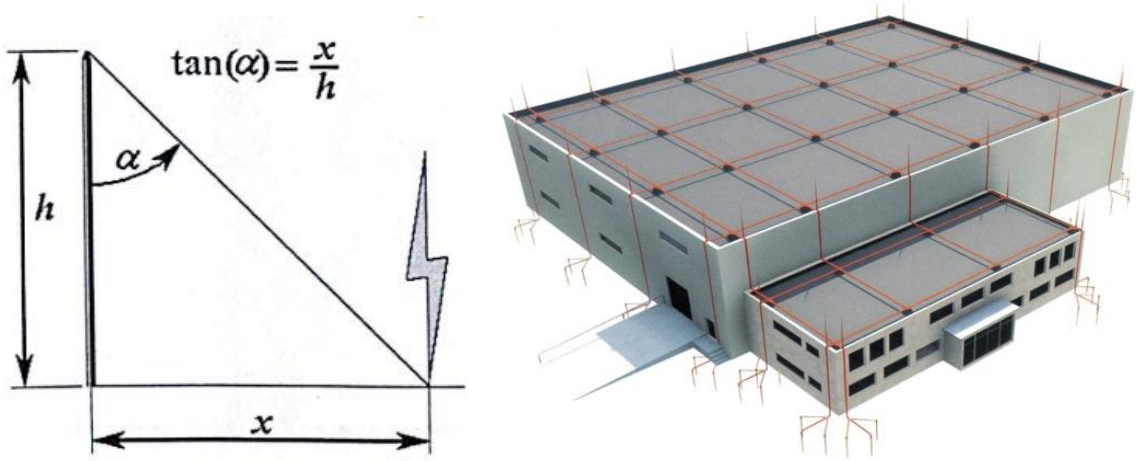
A disszertáció célja az új tudományos eredmények összegzésén túl, hogy egy átfogó és értelmező műként is szolgáljon az olvasója számára a villámvédelem témakörén belül, kitérve az angol nyelvű szakirodalom sokszínű fogalomhasználatára, valamint a magyar szaknyelvi szóhasználatra is.

2. fejezet

A megújuló energiatermelés szabványos, a gyakorlatban használt villámvédelmi megoldásai

A klasszikus villámvédelmet a nemzetközi IEC 62305-ös szabványsorozatban **[IEC, 2011]** (európai uniós direktívaként: MSZ EN 62305) foglaltak írják le. A szabványban és a gyakorlatban három módszer terjedt el, amelyek egyszerűségükkel a tervezési fázist segítik:

1. RSM: gördülő gömb módszer (**1-1. ábra**);
2. PAM: védőszög módszer (**2-1. ábra, bal**);
3. MM: rácsháló módszer (**2-1. ábra, jobb**).



2-1. ábra A védőszög (bal) **[IEC, 2011]** és a rácsháló (jobb) **[Franklin-France, 2019]** módszer

Itt fontos megemlíteni a magyar elődszabványt (MSZ 274 **[Magyar Szabványügyi Testület, 1981]**), amely 2010-ig kötelező érvényű volt. Ezt követően a magyar szabványt az európai direktíva váltotta fel, amelynek alkalmazását az OTSZ[1] írja elő építményekre, illetve épületekre (ideiglenes épületekre és építményekre is). A **2-1. táblázat** a RSM és a MM

[1] 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról II. fejezet 4. § (2) 110.

esetében összegzi az egyes villámvédelmi szinteknek (LPL) megfelelő gördülő gömb sugarakat, illetve rácsházak méreteit. Az utolsó oszlop abból a szempontból érdekes, hogy azt a maximális villámáramot határozza meg, amely az adott védelmi szint esetén még megengedett, és a védelmet ehhez szükséges koordinálni.

2-1. táblázat A gördülő gömb sugarának és a rácsháló méretének maximális értékei az egyes villámvédelmi szintek (LPL) szerint **[IEC, 2011]**

LPS osztály	Védelmi módszer		Maximális villámáram, $I_{0/max}$ [kA] *
	Gördülő gömb sugara, r [m]	Rácsháló mérete, w_m [m]	
I	20	5 × 5	200
II	30	10 ×10	150
III	45	15 ×15	100
IV	60	20 ×20	

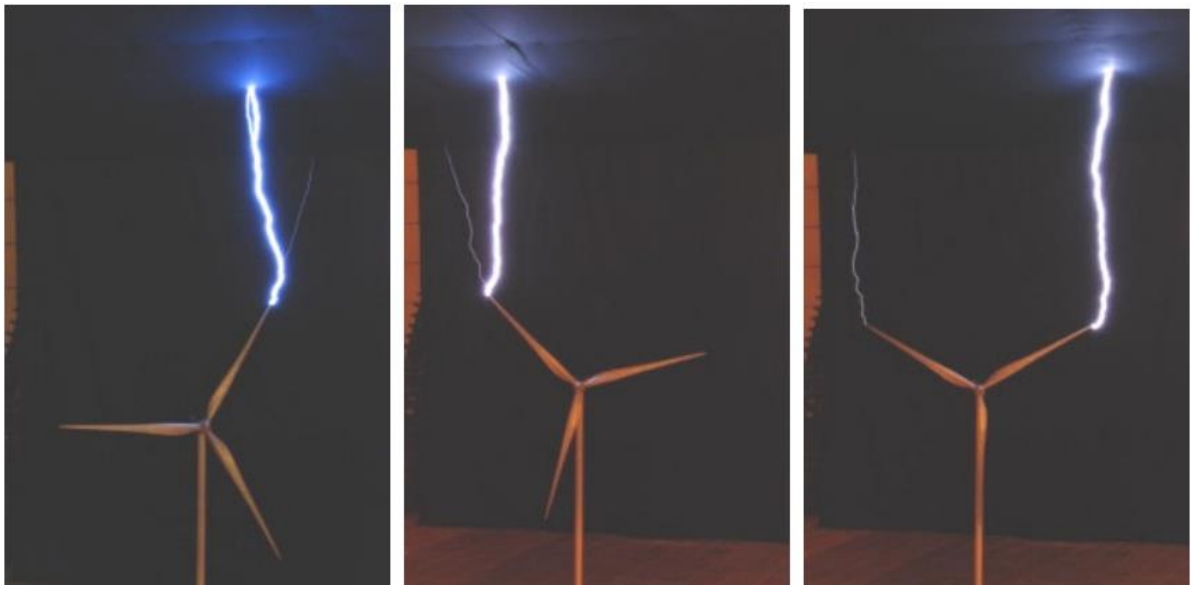
* A legrosszabb eset a legnagyobb $I_{0/MAX}$ áram a lehető legkisebb távolsággal kombinálva.

2.1. A szélerőművek villámvédelmi problémái

A szélerőművek villámvédelmét az IEC 61400-24 **[IEC, 2009]** foglalja szabványi keretekbe. Ez a nemzetközi szabvány írja elő (egyebek mellett), hogy a telepített villámvédelemnek milyen feltételeknek kell megfelelnie. S. F. Madsen egy szabványosítható módszert **[Madsen et al., 2010, 2009]** akart megalkotni korábbi kísérletekre és módszerekre **[Becerra, Cooray, et al., 2005; Becerra & Cooray, 2005; Becerra et al., 2006; Cooray et al., 2004]** alapozva.

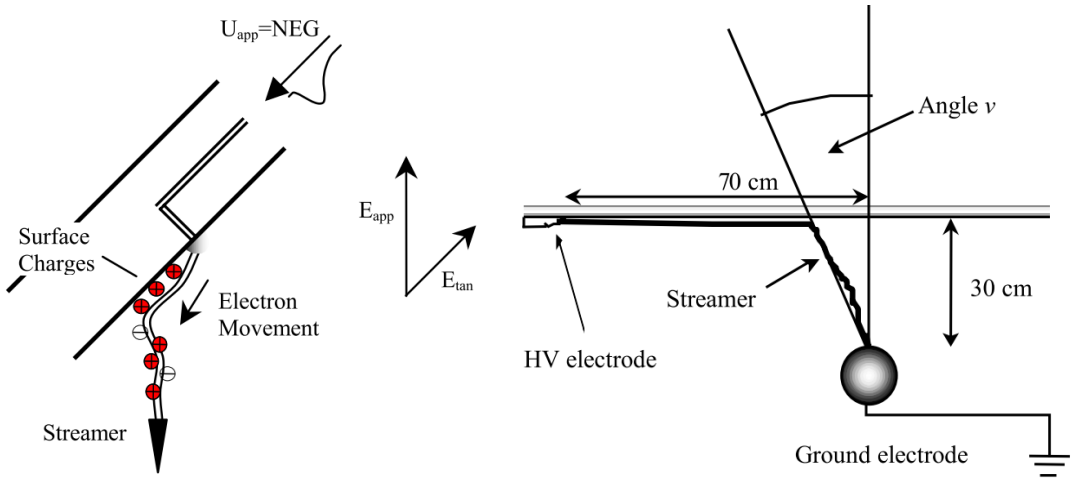
Az előző fejezetben (**2. fejezet)** taglalt módszerek nem alkalmazhatóak szélerőművekre. A gyakorlatban tapasztalt **[Garolera et al., 2016; Madsen et al., 2006]** meghibásodások a módszerek alkalmazhatóságának ellentmondanak, emiatt is volt indokolt egy, az IEC 62305-ből **[IEC, 2011]** kiváló, külön szabvány (IEC 61400-24 **[IEC, 2009]**) megalkotása. A Vestas cég megfigyelései (Vestas Wind System adatok **[Madsen et al., 2006]** és NEDO projekt eredményei **[Ishii et al., 2014; NEDO, 2013]**) is igazolták, hogy nem csak a beépített receptorokat (villámvédelmi felfogó pontokat) éri közvetlen villámcsapás. Egy hibás elgondolás, hogy magát a lapátot soha nem érheti közvetlen villámcsapás, amit igen sok gyakorlati megfigyelés igazol **[Garolera et al., 2016; Ishii et al., 2014; Madsen et al., 2006]**. *Az 1. tézisemben azt fogalmaztam meg, hogy a villamos szigetelőanyagokat ugyanúgy*

figyelembe kell venni a villámvédelmi rendszer kialakítása során, mint a villamos vezető anyagokat, így egyikőjük hatását sem szabad elhanyagolni. A szigetelő rétegeknek és szigetelő anyagú alkatrészeknek – hasonlóan a vezető anyagból készült alkatrészekhez – létezik vonzási tere. Így a szigetelő anyagokból készült részek hatását a vezető anyagú részek vonzási terének geometriai deformációjával szükséges figyelembe venni.



2-2. ábra Kisülés a referencia elektródba, ahol a sík elektród negatív polaritású **[Madsen et al., 2009]**

A **2-2. ábra** szemlélteti azt a kísérleti laboratóriumi elrendezéssorozatot, amit Madsen és munkatársai **[Holboell et al., 2006b]** készítettek. Egy, a valódi szélerőműhöz hasonló anyagú és geometriai felépítésű modellt először a földpotenciálra kötöttek, míg a fölé helyezett fémlemezt az impulzusgenerátor kimenetére kapcsoltak. Az elrendezést különböző lapátállás mellett vizsgálták, tovább forgó üzemmódban is. Ezekben a laboratóriumi kísérletekben az az elgondolás további kérdéseket vet fel, hogy a felfelé meginduló kisüléseket tükörszimmetrikusnak veszik a lefelé meginduló kisülésekhez képest (**2-3. ábra**). **[Holboell et al., 2006b]** Ebben az esetben a mérések során a lapátban lévő levezetőre kapcsolják a feszültséget annak érdekében, hogy azok ellenálló képességét vizsgálják. Ez meglátásom szerint téves elgondolás, és gyakorlati kivitelezés. A laboratóriumi kísérletek hitelességével különböző elrendezések esetén a 4. fejezetben foglalkoztam.



2-3. ábra A szélerőmű lapát irányából meginduló kisülés vizsgálatára létrehozott elrendezés **[Holboell et al., 2006b]**

A legtöbb probléma nem csak abból adódik, hogy a kisülések nem a receptorokat találják el. A receptort érő, és a szigetelt réteg alatt futó levezetőn folyó villámáram keltette Joule-hő roncsolja a lapát anyagát, amely képtelen a hőt a környezetének hírtelen leadni. Így jobb esetben a lapát csak enyhén roncsolódik, vagy öregszik. Rosszabb esetben a villámcsapás tüzet okoz. Ez utóbbi a teljes lapátszerkezet cseréjét eredményezheti, továbbá az adott villamosenergia-termelő egység kieshet a termelői körből.

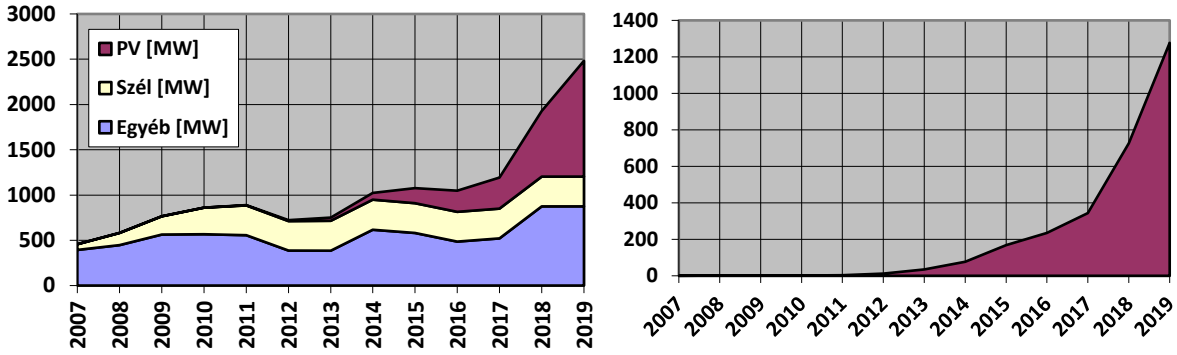
2.2. A fotovoltaikus erőművek villámvédelmi problémái

A megújuló energiákat villamos energiává alakító erőműveknek több fajtája létezik: szélerőmű, fotovoltaikus erőmű, geotermikus erőmű és biomassza erőmű. Magyarországon a szélerőművi kapacitások az utóbbi években nem növekedtek egy korábbi törvényi korlátozás miatt (ld. **2-4. ábra Bal**). Ezzel szemben a fotovoltaikus kapacitások részaránya drasztikusan növekedett az energiamixben, illetve a magyar VER-en belül (ld. **2-4. ábra Jobb**).

A fotovoltaikus erőművek a beépített teljesítményük[2] alapján két csoportra oszthatók:

1. a háztartási méretű kiserőművek (HMKE), amelyek nem engedélykötelesek ($P_{beépített} \leq 50$ kWp), és
2. az engedélyköteles erőművek ($P_{beépített} > 50$ kWp).

[2] A PV erőművek esetében a beépített teljesítmény azt az elméleti maximális teljesítményt jelenti, amely optimális esetben, merőleges dőlési szög mellett fordulhat elő. Ennek mértékegysége kWp, vagyis kilowatt-csúcs



2-4. ábra **Bal:** A magyar VER megújuló energiaforrásból származó kapacitása MW-ban éves bontásban **[IRENA, 2017, 2020]**
Jobb: A magyar VER fotovoltaikus kapacitása MW-ban éves bontásban **[IRENA, 2017, 2020]**

A doktori disszertációm szempontjából az utóbbi erőműtípusok az érdekesek. Ezekről általánosan elmondható, hogy nagy területen helyezkednek el, és általában nagy sík területen, vagy hegy-, vagy domboldalon épülnek. A hagyományos erőmű típusokhoz képest ezeknek a rendszereknek nem szükséges, illetve nem lehetséges szigorú menetrendet követniük. Működésüket, illetve a termelést az időjárás viszontagságai jelentősen befolyásolják. Természetesen e helyzeten kiegészítő akkumulátoros egységek telepítésével változtatni lehet.

A fotovoltaikus erőművek esetében, ellentétben a szélerőművekkel, a klasszikus villámvédelmi tervezőmetódusok alkalmazhatóak. A későbbi fejezetekben bemutatom, hogy a problémákat nem az okozza, hogy ezek az erőműtípusok nagy kiterjedésűek. A gondokat az jelenti, hogy a gazdaságos (a környezeti terhelést csökkentő és emberi léptékben megtérülő), és hatékony primer villámvédelem kialakítása olyan újfajta szemléletet követel meg, amely csak tudományosan alátámasztott kutatási eredmények alapján lehetséges.

3. fejezet

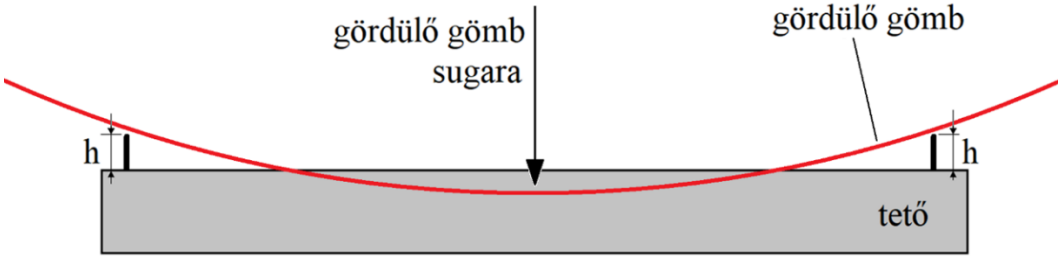
A gördülő gömb módszer (RSM) alkalmazási problémája lapostetős és magas épületeknél

A Dr. Horváth Tibor professzor úr által kifejlesztett gördülő gömb módszer **[Horváth, 1973, 1999, 2012c]** eszközt ad a villámvédelmi szakemberek (tervezők és felülvizsgálók) kezébe a felfogók elhelyezésének szerkesztésére és ellenőrzésére. Az RSM eszközt ad arra, hogy a már adott elrendezésű primer villámvédelmi rendszert gyorsan és szemléletesen ellenőrizni lehessen. Segítségével eldönthető, hogy az adott villámvédelem megfelel-e az adott villámvédelmi védelmi szintnek (LPL). A RSM-et Magyarországon már 1962-ben szabványosították az MSZ 274-ben **[Magyar Szabványügyi Testület, 1981]**. Fontos hangsúlyozni, hogy az RSM egy módszer, és nem elmélet, amely a nemzetközi villámvédelmi szabványnak **[IEC, 2011]** is az egyik legtöbbet használt eszköze mind a mai napig.

A szabványban az **1-1. ábra** szerepel, amely az RSM gyakorlati használatát hivatott bemutatni. Sajnos, ez az ábrázolás megtévesztő, mert azt sugallja, hogy a felfogókat csak a megjelölt részre lehet elhelyezni. Valójában az RSM, mint szerkesztési eljárás a már kialakított felfogórendszer ellenőrzésére szolgál. Az RSM akkor alkalmazható, ha egy, már megtervezett villámvédelmi felfogórendszert kívánunk megvizsgálni. Az RSM szerint a villámvédelmi felfogórendszer akkor megfelelő, ha egy adott sugarú képzeletbeli gömböt úgy lehet minden irányból végig gördíteni az épületen, hogy a gömb soha nem metsz bele az épületbe. A gömb csupán a felfogókkal és a földdel érintkezhet. Ezzel szemben az **1-1. ábra** azt sugallja, hogy az épületen folytonos, összefüggő villámvédelmi felfogórendszernek kellene lennie, nem pedig felfogó rudaknak, vagy hálónak. A legtöbb ehhez a témához kapcsolódó internetes találat is rendre helytelen alkalmazásokat mutat be, de találkozhatunk rossz gyakorlatokkal folyóiratcikkekben **[Adekitan et al., 2020; Heidler et al., 2008]** is.

3.1. A lapos tetők

A kérdéskör a lapostetők esetén válik érdekessé, ha a RSM-et összehasonlítjuk a MM-mel. Tekintsünk egy adott elrendezést lapostetőkön. Az elrendezés (**3-1. ábra**) a tető és a villámvédelmi felfogó hálóra illesztett *R* sugarú gömb síkmetszete.

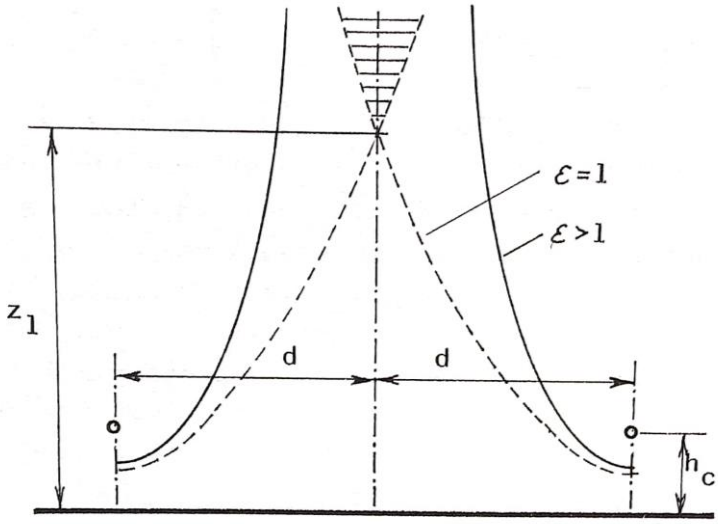


3-1. ábra A rácshálós módszer (MM) kombinálása a gördülő gömb módszerrel (RSM) a gördülő gömb belemetsz a tetőbe

Arevalo és munkatársai hasonló, speciális elrendezést **[Cooray et al., 2010]** vizsgáltak. A különbség a saját vizsgálatomhoz képest, hogy csak egy adott vonal (mértani közép) menti (orientációs[3])pontokból vizsgálták meg I_{max} villámáramokra, és ez alapján vettek észre anomáliát. Horváth Tibor professzor úr, más publikációiban **[Horváth, 1960, 1989, 1991, 2012b]** már felvetette érdekességként, de az objektum tetejének/tetőszerkezetének anyagát nem vette figyelembe ilyen formában: csak vezető és szigetelőkre bontotta a kérdéskört. Meglátásom szerint elengedhetetlen, hogy a szigetelőket további kategóriákra bontsuk, akár hasonlatosan mint az a régi magyar szabványban (MSZ 274 **[Magyar Szabványügyi Testület, 1981]**) más témakörben megjelent a tűzveszélyességi osztály alapján.

Elméletben a PMAS elmélet szerint a pozitív villámok esetében az ellipszis (síkmetszet esetén) – mint a határfelületet burkoló görbe – záródik, de ez azt jelentené, hogy az ellipszisen kívüli, pl. legfelső pontja feletti orientációs pontokból nem a felfogót éri a villámcsapás, ami a fizikai folyamatnak ellentmondana, amint az az alábbi ábrán (**3-2. ábra**) látható. **[Horváth, 1991]** Ennek eredményeként az jön ki, hogy a fémlemezt lényegesen több kisülés érheti. Kérdés, hogy milyen ε paraméter használható a tetőn lévő szigetelő réteg esetén: kisebb vagy nagyobb az adott polaritású esethez képest. Várható, hogy növeli a villámvédelmi felfogórendszer vonzási terét és csökkenti a tetőét, így a PMAS elmélet esetén fontos ε értéke 1 alatt lesz.

[3] Arevalo és munkatársai nem ezzel a kifejezéssel éltek a cikkükben, de ezzel feleltethető meg.



3-2. ábra Az egyes zónák átlapolódása, ha a vonzási tér 50%-os határfelületei nem érintkeznek egymással. **[Horváth, 1991]**

3.2. A szigetelő réteg hatása

A szigetelő réteget minden esetben kritikusan kell kezelni attól függetlenül, hogy nem villamos vezetőről beszélünk. Eső során, bár az esővíz desztillált víznek tekinthető, az a tető felületére érve, az azon megtalálható port oldva már vezetőnek tekinthető, vagy pontosabban nem tekinthető tökéletes, ideális szigetelőnek.

Dr. Horváth Tibor professzor úr korábbi kísérlete az alábbiak szerint nézett ki: egy 4 cm magasságú, 20 cm × 8 cm méretű fémdoboz tetején grafitréteggel borított műanyag lemezt vizsgált. A sarkoknál 4 cm hosszú rudakat helyezett el. A nagyfeszültségű elektród és a doboz teteje közötti távolság 5 cm-ről 20 cm-re történő megváltoztatásakor a következőket figyelte meg:

- negatív polaritás esetén: minden kisülés az egyik rúdba csapott;
- pozitív polaritás esetén: 5 cm-nél 94% az egyik rúdba csapott, 2% a tetőbe (szemléltetést ld. **3-3. ábra**), 2% pedig a rúd és a tető között ágazott el;
- 10 cm felett egyetlen kisülés sem érte el a tetőt;
- a villámvédelmi felfogók védőhatása megnőtt.

3-3. ábra Az 1960-as Horváth kísérlet **[Horváth, 1960]**

E növekedés a tényleges mértékének meghatározása valós esetben nehéz problémát jelent. Abban az esetben, ha a laboratóriumi kísérleteknél az elektródok távolsága a 10 cm-es tartományban van, az eredményeket a gyakorlati méretekre nem lehet kiterjeszteni. **[Beroual et al., 2010; Diaz et al., 2014]** Ezen tartomány felett viszont a tendencia vizsgálható bizonyos tartományok között, megadott pontossággal. Így az ezekből a laboratóriumi eredményekből meghatározható ε értékek csak bizonyos feltételekkel alkalmazhatók.

4. fejezet

A laboratóriumi mérések eredményeinek kiterjesztése

A laboratóriumi mérések elengedhetetlenek ahhoz, hogy az egyes hipotéziseket megfelelő módszerekkel ellenőrizzük. A villámcsatorna kialakulása egy összetett fizikai folyamat, amelynek a leképezése laboratóriumi körülmények között a fizikai korlátok miatt nehézkes. A kísérleteim során nem is cél a teljes kisülési folyamatnak a leképezése, hanem csak a szempontomból fontos, ún. orientációs pontok halmazának a meghatározása valószínűségi és statisztikai alapon. Más szavakkal a laboratóriumi kísérletek célja a villám előkisülés utolsó ugrásának modellezése.

4-1. ábra **Bal:** Felfele meginduló előkisülésből kialakuló főkisülés az Agua vulkán tetején, Guatemalában **[Barrundia, 2019]** és
Jobb: a Párizsi Eiffel-toronyból kiindulva **[Atek, 2009]**

Külön érdekesség a felfelé meginduló előkisülések (a felfelé szétágazó villámok) kérdésköre, amely a hagyományos metodikával (ld. PMAS) nem vizsgálható, illetve gyakoriságuk számítása nem oldható meg. Ebben az esetben az orientációs pont

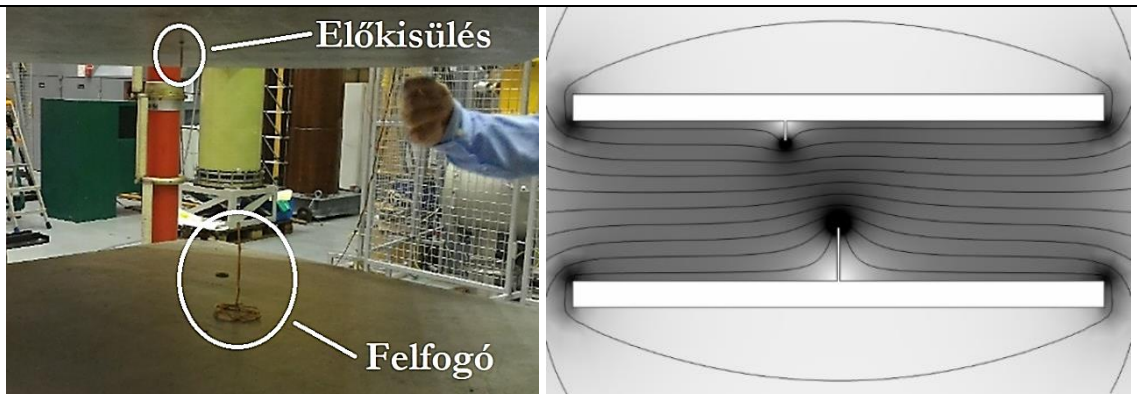
meghatározására szolgáló célobjektum nem egyértelmű: az maga a zivatarfelhőben lévő töltés. A felfelé meginduló villámokról általánosan elmondható, hogy olyan helyen tudnak kialakulni, ahol a zivatarfelhő és a föld között kisebb a távolság. Ilyenkor a villamos térerősség elegendően nagy ahhoz, hogy a földelt pontokból felfelé haladó előkisülési csatorna tud elindulni. Ez a szituáció jellemző lehet a rendkívül magas épületek (>100 m), vagy építmények esetén, illetve magas hegyeken. De felfelé szétágazó villám kialakulhat a téli, alacsonyabban szálló légtömegek esetén fellépő téli zivatarok esetén is.

A felfelé meginduló villámok szimulációjával próbálkozott pl. Madsen és munkatársai **[Madsen et al., 2009; Vogel et al., 2017]**, akik ellentétes polaritású impulzus feszültségek mellett az elrendezés polaritását megfordították, mivel a laborkörülmények között, az eredeti elrendezés szerint – amely a természetes polaritásokkal megegyező lett volna – nem tudtak felfelé meginduló kisüléseket létrehozni. Azt feltételezték, hogy ezek a részkisülések tükörszimmetriát mutatnak. Fontos kiemelni, hogy szemben a hagyományosnak titulált lefelé meginduló előkisülésekkel, a felfelé meginduló előkisülések a felhőkben legtöbbször pozitív tértöltésfelhőt semlegesítenek, azaz úgynevezett pozitív villámcsapások.

A kísérleti jelenség ismert a szakértők között, hiszen a szabványos 1,2/50 µs-os feszültségimpulzus kisülés – hasonlóan a természetbeli megfigyelésekhez – nem minden esetben az objektum és a nagyfeszültségű elektród között alakul ki. Annak érdekében, hogy a lehető legjobb elrendezést megtaláljam, különböző elrendezéseket vizsgáltam meg:

A) sík – sík (elrendezés I);
B) Rogowski – sík (elrendezés II-A);
C) Rogowski tórusszal – sík (elrendezés II-B);
D) Horváth féle elrendezés (elrendezés III).

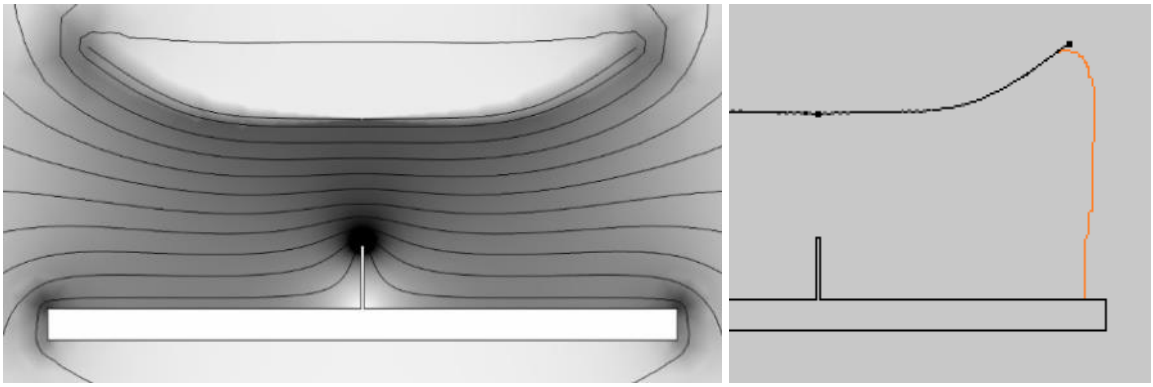
A különböző méréseket az egyes ábrákon mutatom be (**4-2. ábra, bal**; **4-3. ábra, bal**; **4-4. ábra**; **4-5. ábra**). Az **4-2. ábra** (bal oldali) egy tornyot (alul) és egy lefele meginduló előkisülést (felül) reprezentál, ami egy klasszikus elrendezésként értelmezhető, ahol alacsony a felhőmagasság. Ezzel az összeállítással az a probléma, hogy a felhő és az előkisülés csatorna mindig ugyanazon potenciálon van, amely így egy olyan torzított térben jön létre, ami nem a természetben is lezajló folyamatokat követi le. Ennél jobb elrendezés látható az alábbi ábrán (**4-3. ábra, bal**), amely homogén teret hoz létre a felhő és a föld között. A villamos teret csak a felfogó és a kialakuló előkisülés csatorna modell torzítja.



4-2. ábra **Bal:** Mérési elrendezés I (sík–sík felfogóval és az előkisülést reprezentáló elektróddal);
Jobb: Az elrendezés numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

4.1. A hagyományos elrendezések továbbgondolása

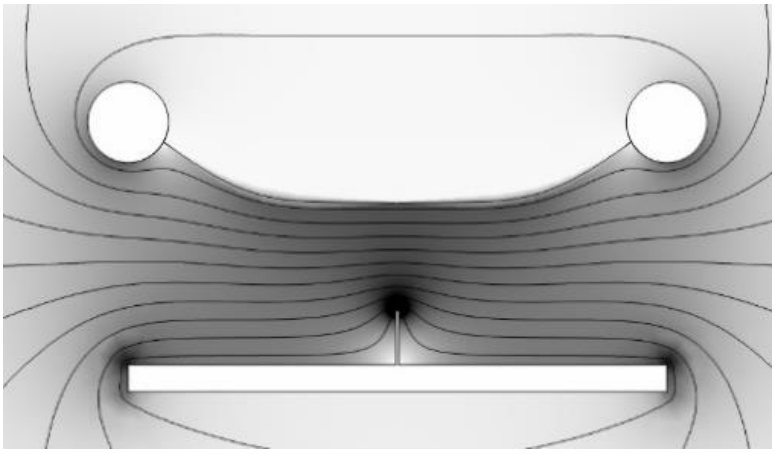
A számítógépes szimulációkban (**4-2. ábra, jobb**; **4-3. ábra, bal**; **4-4. ábra**; **4-5. ábra, jobb**) az impulzus feszültség csúcsának pillanatát szemléltettem. Az ábrákon a potenciálvonalak a feszültséget (*U*), a szürkeárnyalatos paletta pedig a villamos erőtér (*E*) normáját jelöli. A fekete a legmagasabb, míg a fehér a legalacsonyabb értékekhez tartozik.



4-3. ábra **Bal:** Az elrendezés (II A) numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában);
Jobb: A megfigyelés a mérés közben: kisülés a Rogowski elektród széléhez közel **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

A sík elrendezés végességéből adódó hiba (nagy inhomogenitás az elektródok szélein) kiküszöbölése, és a villamos erőtér inhomogenitásának csökkentése érdekében az elektródokat Rogowski–sík elrendezésre cseréltem (**4-3. ábra, bal**). Ebben az esetben a kísérleti eredmények már közelebb álltak a természetben tapasztaltakhoz, illetve az arra épített elméleti

értékekhez, ugyanakkor egy érdekes jelenségnek lehettem szemtanúja. Néhány kisülés a Rogowski elektród szélén a villamos erővonal mentén indult meg a földpotenciálon lévő lemez irányába (**4-3. ábra, jobb**)

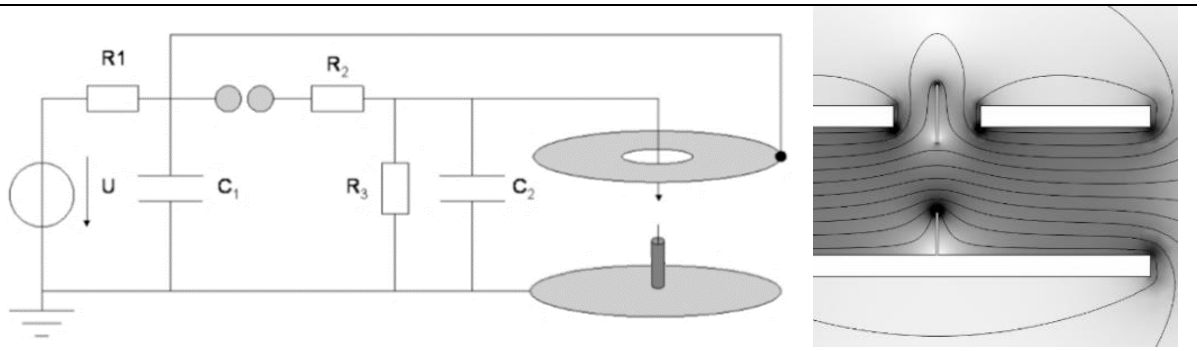


4-4. ábra Az elrendezés (II B) numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

Megfigyelhető volt a villamos erőtér csökkenése a kritikus pontokban (**4-3. ábra**). További javulást lehetett elérni, ha egy tóruszt helyezünk a Rogowski elektród köré (**4-4. ábra**). Bár a modellezett értékek homogénebbek, még mindig jelentős hiányosság áll fent: az elrendezés nem reprezentálja a felhő töltését.

4.2. Módosított, Horváth féle elrendezés a zivatarfelhő töltésének reprezentálásával

Egy további elrendezésben – a Horváth féle elrendezés esetén (**4-5. ábra**) – a felhők töltését a földelt síklemez felett egy sík reprezentálja, amelynek közepén lyuk van (ld. **4.4. fejezet**). A felső síkot az impulzusgenerátor első töltési szakaszához (egyenfeszültség) csatlakoztatjuk. Az impulzusgenerátor kimenetéhez csatlakoztatott elektródot a lyukon keresztül vezetjük át, Ez a lefelé meginduló előkisülést helyettesíti a modellben. Ebben az esetben az egyes síkok szélei ugyan torzítják a villamos erőteret, de külön, potenciálfüggetlen elektródok vannak mind az előkisülés, mind pedig a felhő számára. Mindez egy olyan modellt eredményez, amely már sokkal közelebb áll a természetben tapasztalható elrendezéshez.



4-5. ábra **Bal:** a megkövetelt mérési elrendezés (III) magas épületek szimulálásához; **[Kiss et al., 2014]**
Jobb: Az elrendezés numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

4.3. A laboratóriumi mérések eredményei

A laboratóriumi méréseket a numerikus szimulációkkal párhuzamosan értékeltem ki. Két esetet különböztethettem meg a kisülés helyétől függően (**4-1. táblázat**).

4-1. táblázat A labortóriumi mérések eredménye az egyes elrendezésekre **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

Polaritás	Elrendezés	A kisülések száma	
		A	B
-	sík-sík	23 (92%)	2 (8%)
-	Rogowski-sík	25 (100%)	0 (0%)
+	sík-sík	5 (20%)	20 (80%)
+	Rogowski-sík	0 (0%)	25 (100%)

A: a két elektród között (felfogó és 'előkisülés');

B: másik két pont között

Arra a következtetésre juthatunk, hogy a kisüléseknek a tapasztalt és a várt száma nem hanyagolható el sem pozitív, sem negatív polaritás esetén. A kisülések nagy része az előkisülést reprezentáló elektród és a földelt sík között alakul ki. Voltak viszont olyan esetek is, amikor a kisülések a felfogó talppontjához igen közel léptek fel.

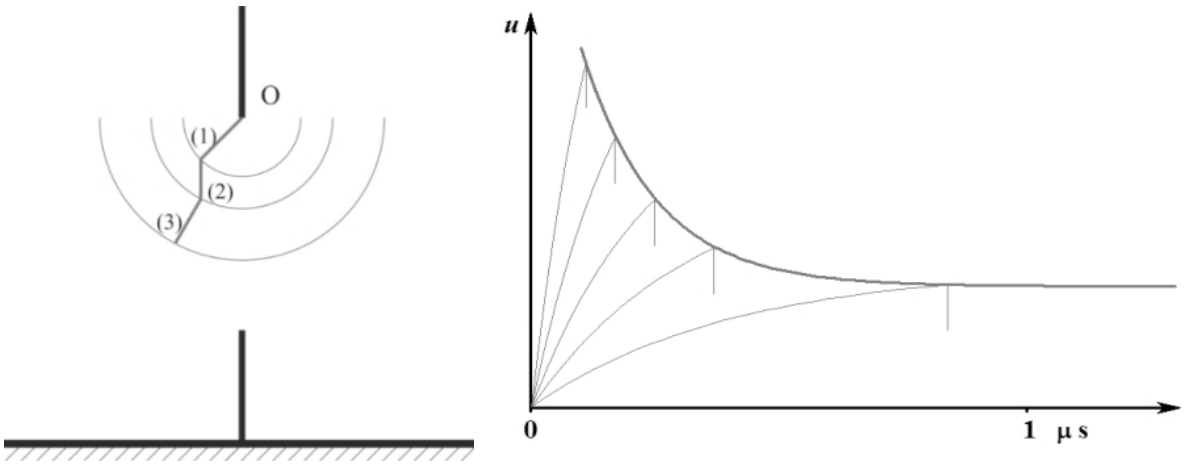
4.4. Az átütési feszültség szerepe és fontossága

Közvetlen kapcsolatot feltételezünk a villámáram és az orientációs távolsága között, amelyet az

$$\frac{I}{I_m} = \left(\frac{r}{r_m}\right)^p \tag{4-1}$$

egyenlet határoz meg, ahol a *p* tekinthető állandónak. A számítás elvégzésének egyszerűsége kedvéért érdemes ennél a hipotézisnél maradni. Vagyis minél nagyobb villámcsatorna áramerőssége, annál nagyobb az orientációs távolság is.

Az alábbi ábrán (**4-6. ábra**) láthatóak a különféle impulzusfeszültségekhez tartozó orientációs pontok (O), ha az átütési feszültség eltér az ideális feszültségtől, azaz az impulzusfeszültség túl nagy az optimálishoz képest. Ebben az esetben az átütés a feszültségimpulzus már az impulzus homlokán következik be, ezért az O orientációs pont az (1), (2) vagy (3) pontba vándorol, és az így kapott mérési eredmények félrevezető következtetések levonását eredményezik. Összefoglalva ez azt jelenti, hogy a laboratóriumi megfigyelés során feljegyzett orientációs pont koordinátái eltérnek a valós koordinátáktól.



4-6. ábra **Bal:** Az orientációs pont 3 különböző pozícióban, amikor az impulzusfeszültség túl nagy az optimálishoz képest **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**
Jobb: Az átütési feszültség az idő függvényében az egyes esetekben (**[Horváth, 1991]** alapján)

Alacsony épület (10 – 20 m) esetén a lefelé meginduló előkisülések a dominánsak, és ebben az esetben a felhő töltése elhanyagolható. Az épület magasságának növekedésével

viszont ez már nem lesz igaz (a felhő töltéseinek hatása már nem lesz elhanyagolható), ezért a III. mérési elrendezést kell alkalmazni, ahol már megjelenik a zivatarfelhő alsó részén elhelyezkedő töltések hatása is (**4-6. ábra**).

5. fejezet

A szélgenerátorlapátokat érő villámcsapások gyakoriságának és hatásainak vizsgálata

A következő fejezetekben korábbi **[Erichsen et al., 2007; Horváth, 1991]** mérések eredményei, továbbá az általam **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** elvégzett kísérleti mérések eredményei alapján vonom le a következtetéseket.

Egy adott villámvédelmi felfogórendszer kiépítése során az adott polaritású villámok aránya meghatározó. Megadható, hogy milyen sűrűn szükséges a felfogókat elhelyezni a megfelelő védelmi szint eléréséhez. A nagyarányú pozitív polaritású kisülések megnövelik annak kockázatát, hogy egyazon villámvédelmi felfogórendszer esetében időben előbb következzen be, hogy a felfogó helyett a védendő objektumba csap a villám. Ennek megfelelően kísérleteimet és számításaimat is ez alapján végeztem el.

A villámok csoportosítását (pozitív és negatív villámok) az előkisülés töltése (illetve az ezzel megegyező polaritású, a felhőben elhelyezkedő semlegesítendő tértöltés) alapján határozzuk meg. A nem szakemberek között általános tévhittel ellentétben a villámáram (a főkisülés árama) mindig a földből a felhő felé folyik, és semlegesíti mind a csatorna töltését, mind pedig a felhőben lévő tértöltést.

Az elvégzett kísérleteim két csoportra bonthatók:

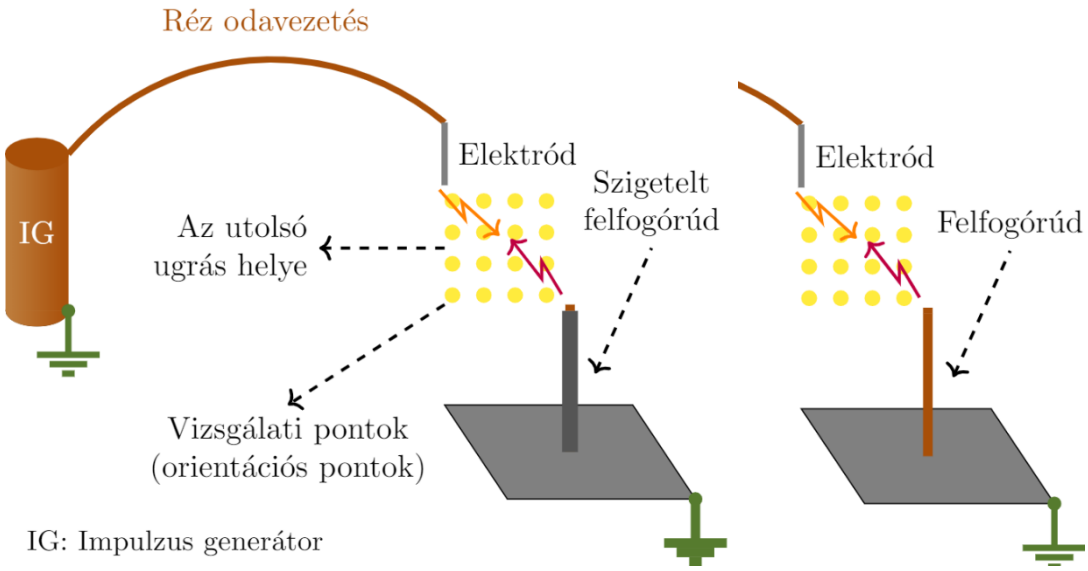
1. egymagában álló felfogó rúdon (**5-1. ábra**), és
2. szélerőmű modellen (**5-6. ábra**)

végzett laboratóriumi mérések. A kísérleti mérésektől annak eldöntését vártam, hogy a földelt elektródok felületén elhelyezkedő szigetelőrétegnek van-e valamilyen térdeformációs hatása a vonzási térre. A két vonzási tér (szigetelő réteggel borított és szigetelő réteg nélküli, csupasz felületű elektródok este) közötti eltérés mértékének meghatározásához egy egyszerűsített – a

mérések szempontjából megfelelő – szélerőmű modellt (**5-6. ábra**) használtam különböző lapátpozíciókat beállítva. **[Palotai, 2016; Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth & Kiss, 2017c]**

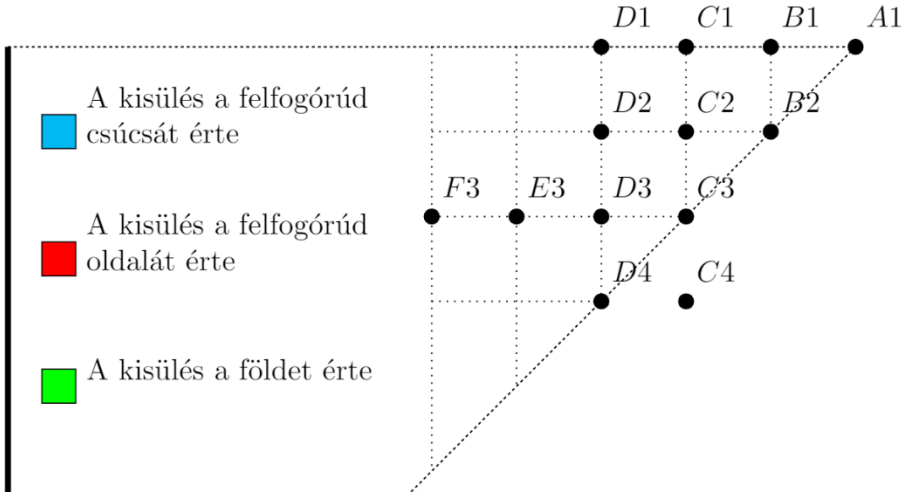
5.1. A szigetelő réteg hatása a villámvédelmi felfogók vonzási terére

A szélerőmű lapátokra vonatkozó kísérletek előtt szükséges volt egy olyan egyszerű elrendezés vizsgálata is, amely csak egy önmagában álló földelt felfogórúdból állt. Ez az összeállítás az alábbi ábrán (**5-1. ábra, jobb**) látható. A felfogó rudak 55 cm magasak, amelyek egy önagában álló, magas objektum vonzási térének meghatározását szolgálták két esetben: szigetelő réteggel és anélkül. Feltételezzük, hogy nem minden kisülés a felfogórúd tetejébe vagy a földbe csap, hanem néhány a felfogó rúd oldalába.

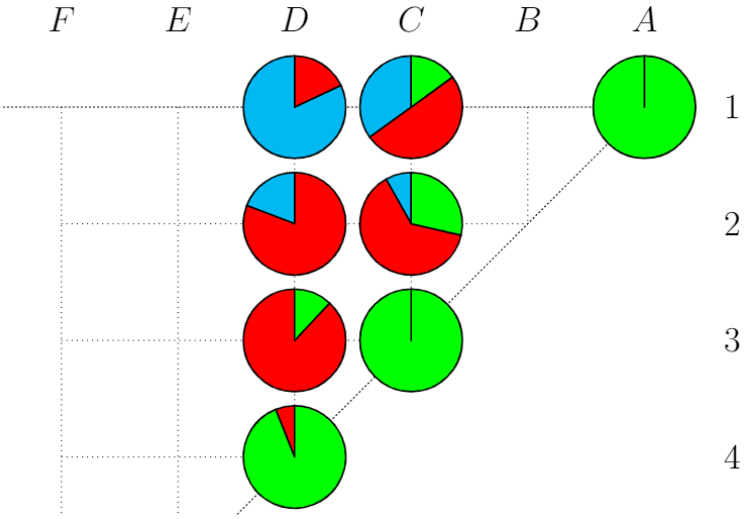


5-1. ábra A mérési elrendezés sematikus ábrája egymagában álló (**bal**) szigetelt és (**jobb**) szigeteletlen felfogórúd esetében **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a; Z. Tóth & Kiss, 2017b, 2017c]**

Néhány orientációs pontot vizsgáltam a három vonzási tér (a felfogórúdrúd csúcsának, a felfogórúd oldalának, és a földnek a vonzási tere) határán (**5-2. ábra**). A célom az volt, hogy megmutassam, hogy van-e különbség a kalkulált (elméleti), és a valós vonzási terek között, illetve, hogy hogyan befolyásolja mindezt a felfogúrúd oldalán elhelyezkedő szigetelő bevonat. Szintén 50 impulzust alkalmaztam mérési pontonként és mindezt pozitív polaritás mellett.

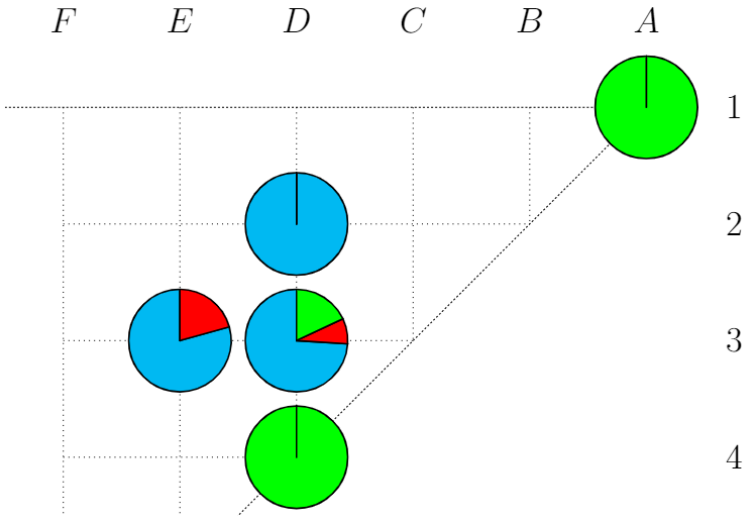


5-2. ábra Az elrendezés koordinátái **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**



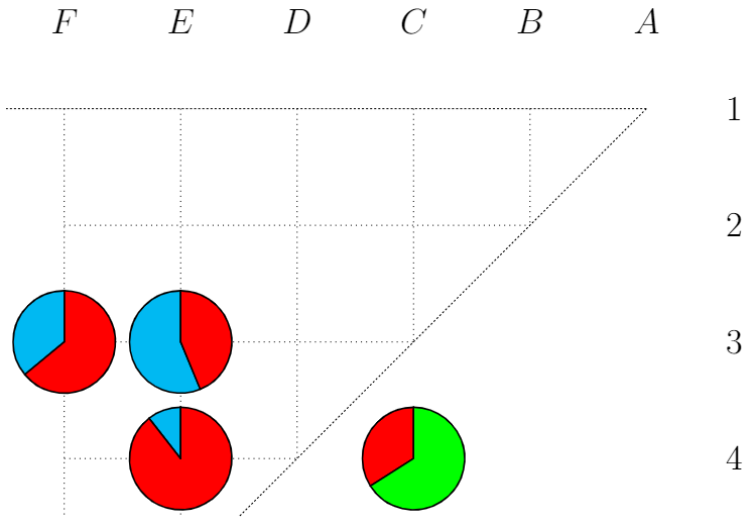
5-3. ábra A kisülések előfordulási gyakoriságai adott orientációs pontból szigetelőréteg nélküli esetben (pozitív polaritás) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

A szigetelő bevonat nélküli esetben a vártnak megfelelően alakult a mérés. A *C1*-es mérési pontban a kisülések száma, amely a rúd oldalát találta el, elég magas (**5-3. ábra**) volt. A szigetelt esetben (**5-4. ábra**) érdekesebb eredmény adódott, a vonzási tér lényegesen eltérően alakult. Azoknak a kisüléseknek az aránya, amelyek a felfogót találták el megnövekedett. A növekedés annál nagyobb volt, minél közelebb volt a földhöz a vizsgált orientációs pont.



5-4. ábra A kisülések előfordulási gyakoriságai adott orientációs pontból szigetelőréteges esetben (pozitív polaritás) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

A harmadik mérési sorozatot (**5-5. ábra**) az elsőhöz hasonlóan végeztem azzal a különbséggel, hogy az impulzusok negatív polaritásúak voltak. Ebben az esetben további mérési pontokban végeztem kísérleteket.



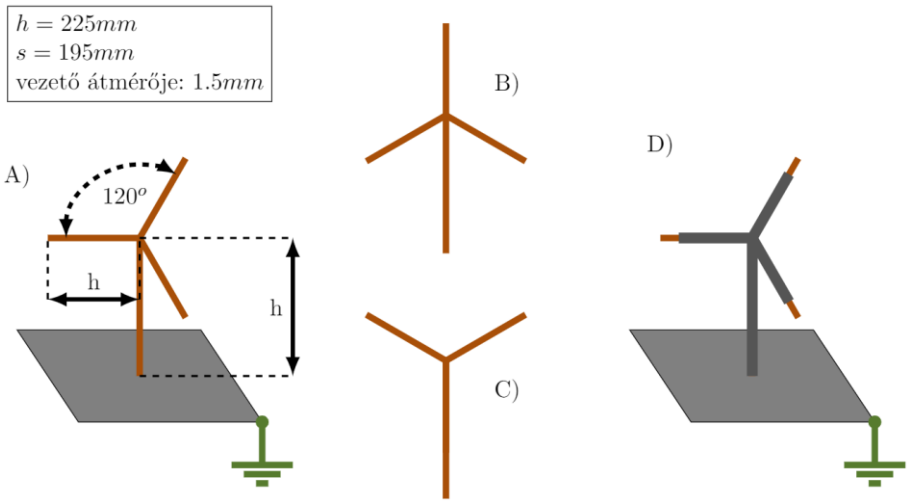
5-5. ábra A kisülések előfordulási gyakoriságai adott orientációs pontból szigetelőréteges esetben (negatív polaritás) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

Megfigyeltem, hogy a vonzási tér a rúd mentén jelentősen csökkent, és a föld vonzási tere is eltorzult. Az *E5*-ös mérési pontban a vonzási tér határán voltam, de nem tapasztaltam kisülést a föld irányába. A *C4*-es pont egyértelműen a föld vonzási terében volt, de számos kisülést detektáltam, amelyek a rúd oldalába csaptak. (**5-5. ábra**)

Az elvégzett kísérletek eredményei bizonyították, hogy a földelt felfogórúd felületén a szigetelőréteg térdeformációt okoz (jelentősen megváltoztatja a vonzási terek határait).

5.2. A szélerőmű lapátjának vonzási tere egyreceptoros és kétreceptoros esetben

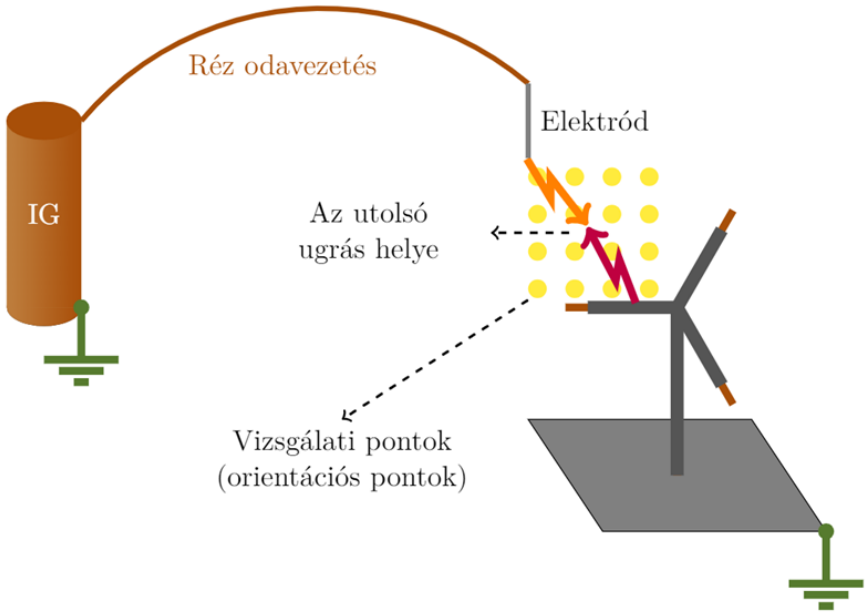
A laboratóriumi vizsgálatokhoz kétféle szélturbina modellt hoztam létre. Az első (**5-6. ábra A-C**) *1,5 mm* átmérőjű rézhuzalból készül. A lapátok hossza *s = 19,5 cm*, a tartóelem magassága *h = 22,5 cm*, és a lapátok végpontjai lekerekítettek. Három különböző lapátpozíciót vizsgáltam (ld.: **5-6. ábra A-C.).** A második típus hasonló volt az elsőhöz, annyi különbséggel, hogy a huzalok szigetelő réteggel rendelkeztek, kivéve a lapátok (huzalszakaszok) végpontjait (**5-6. ábra D.**).



5-6. ábra A szélgenerátor modell mérési elrendezésének sematikus ábrája. Szigetelés nélküli (A, B, C); és szigetelt elrendezés (D) esetek **[Z. Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]**

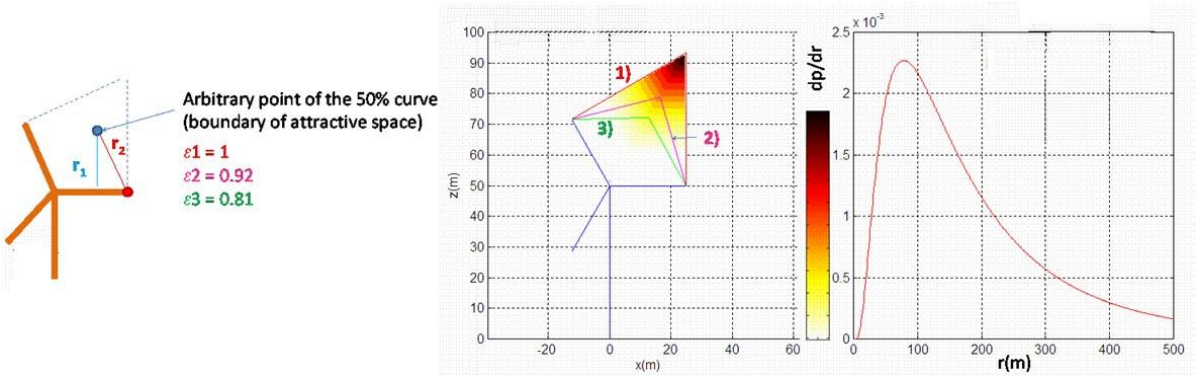
Az előkisülést egy vezető rúddal modelleztem (**5-7. ábra**). A rúd végpontja reprezentálja az orientációs pontot. A méréseket mind pozitív, mind negatív polaritású impulzusokkal elvégeztem, a kapott eredményeket pedig összevetettem a korábban már publikált vizsgálatokkal is. A szélturbina modelleket a fenti fémrúd közelében helyeztem el, a rudat egy szabványos 1,2/50 µs impulzusgenerátorhoz csatlakoztattam (**5-7. ábra**). A rúd és a turbinamodell egymáshoz viszonyított távolságát folyamatosan változtattam az alábbi ábrának (**5-7. ábra**) megfelelően. (A mérések hasonlóak ahhoz, amelyet Dr. Horváth Tibor végzett el a **[Kiss et al., 2014]**-ban.) Minden egyes pozícióban 50 impulzust kapcsoltam az elrendezésre és

azt vizsgáltam, hogy egy adott esetben a kisülés a levegőn keresztül a lapátok végpontjaiba, vagy a lapát felületén máshova csapott-e be.



5-7. ábra A mérési elrendezés sematikus ábrája a szélgenerátor modellre **[Z. Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]**

Csak a geometriát figyelembe véve a vonzási tér határfelülete az **5-8. ábra** 1)-es vonala. A térrészen belüli pontokat – amelyek közelebb vannak a lapátokhoz, mint a felfogó pontokhoz – az 1)-es vonal határolja. A valóságban viszont a határfelületek másképp alakulnak, illetve a határfelületek többek között a polaritástól is függenek.



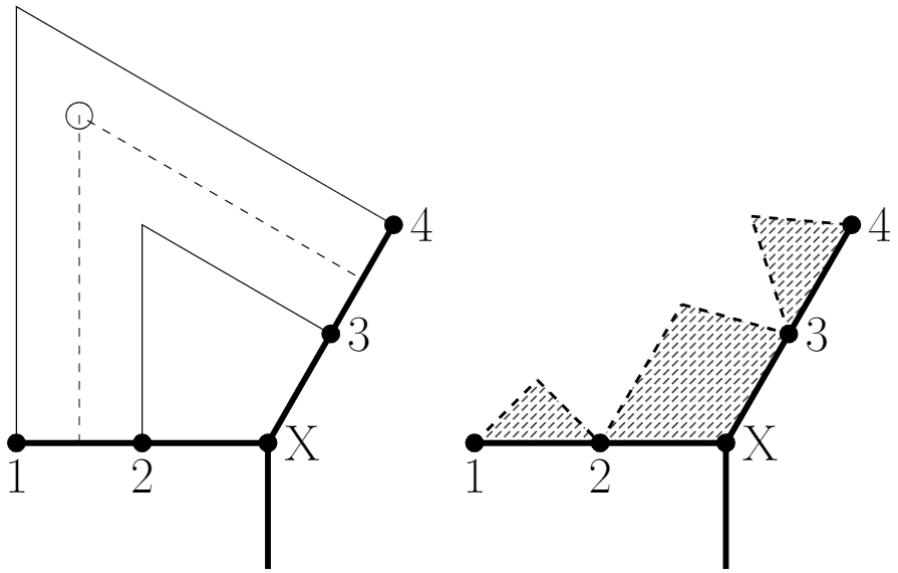
5-8. ábra Egyszerűsített modell a probléma bemutatására; a vonzási tér síkmetszete **[Kiss et al., 2014]**

A megfigyelések azt mutatják, hogy a negatív polaritású kisülések nagyobb számban érik a felfogó receptorokat, mint a lapát más pontjait. A pozitív polaritású kisüléseknél ez fordított. Ez az oka annak, hogy a pozitív polaritású kisülésekre részletesebb kísérletet végeztem.

A vonzási térnek azok a részei, ahol a *dP/dr* értékek nagyok, a lapátok végeihez tartoznak. A laboratóriumi megfigyelések során kapottakhoz hasonló eredményekre jutottam elméleti számításokkal is.

Az **5-8. ábra** a vonzási tér határfelületének változását mutatja pozitív polaritás esetén. A vonzási tér meghatározása során először elhanyagoltam a szélerőmű lapátján a szigetelő réteget, majd ezt követően figyelembe vettem, hogy a lapát felületét szigetelő réteg borítja. Az első esetben (csak vezetőt feltételezve) az **5-8. ábra** 2)-es vonala, a második esetben (a lapát felületét szigetelő réteggel bevonva) a **5-8. ábra** 3)-as vonala jellemzi a vonzási tér határát. Jól látható, hogy a szigetelő réteg jelenléte csökkenti a vonzási teret.

A kapott eredmény jól mutatja, miért a lapátvég közelében jön létre a legtöbb károsodás: itt a legnagyobb annak a valószínűsége, hogy a orientációs pont adott a(z) *dV* térfogatelemben található, és az a lapáthoz van közelebb. Ez az eredmény azt is alátámasztja, hogy a nagyméretű szélgenerátorok esetén nem elegendő a lapátvégeken elhelyezett egyetlen receptor. Ezzel szemben az IEC 61400-24 szabvány **[IEC, 2009]** előírja, hogy hány méterenként kell egy-egy receptort elhelyezni. Ilyen multireceptoros elrendezést vizsgált Madsen és munkatársai **[Birkl et al., 2018; Garolera et al., 2012; Madsen, 2017; Madsen et al., 2009]**.



5-9. ábra A szélerőmű lapátjainak vonzási terének határai (**bal**) csak vezető lapátot feltételezve, illetve (**jobb**) szigetelő réteggel **[Z. Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]**

Egy másik kísérleti összeállítást terveztem meg a kétreceptoros szélturbinás mérésekhez, amely sematikus ábrája az **5-9. ábra** bal oldalán látható. Ebben az esetben szigetelt

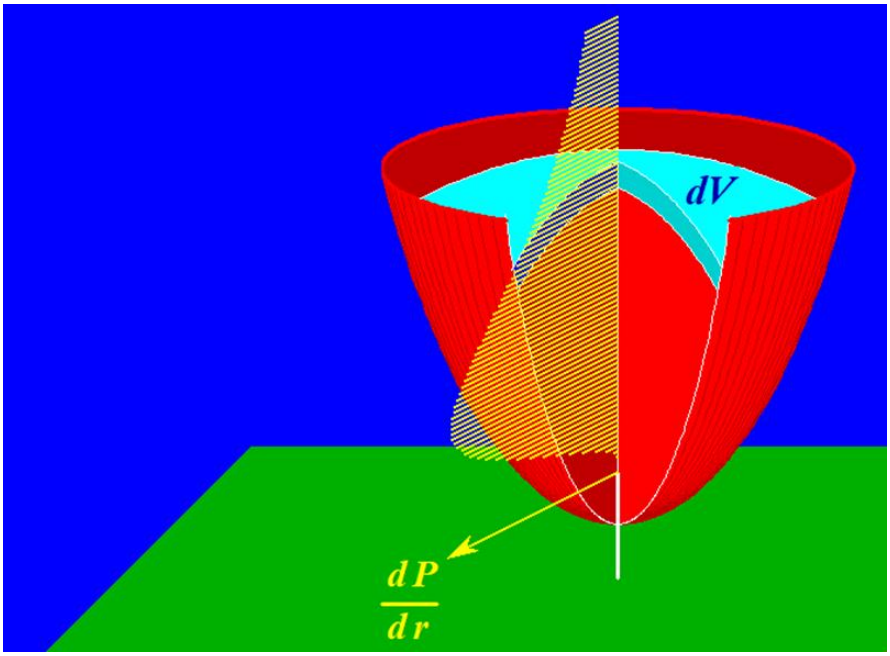
rézvezetékből készítettem el a szélerőmű modelleket, amely felületét megbontottam a lapátok mentén két-két helyen (ld. **5-9. ábra** 1-es, 2-es, 3-as és 4-es pontok).

Amennyiben a modell csak vezetőből áll, úgy az **5-9. ábra** bal oldala vonalakkal jelzett részei lesznek az egyes receptorok vonzási terei, mivel a környező részek is vezetők, így azokhoz is egy-egy hasonló rész fog tartozni. Amennyiben a lapátok szigetelőanyagból készülnek és az egyes pontok (1, 2, 3 és 4) egy-egy receptort képviselnek, úgy a vonzási tereket az 1-2, 2-x, x-3 and 3-4 részek által elkülönített szaggatott vonallal jelzett rész határolja. Az O pont azt a pontot jelzi, amely egyenlő távolságra van a négy ponttól (1, 2, 3 és 4), de az O ponthoz legközelebb a lapát szigetelő anyagú részei vannak.

5-1. táblázat A laboratóriumi mérés eredményei a kétreceptoros szélerőmű modellre **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**

Pontok	**1**		**2**		**X**		**3**		**4**	
Mérés 1	0	0	0	0	0	0	4	0	21	/25
Mérés 2	2	3	3	0	0	0	1	0	16	/25

A mérés során, amelynek eredményeit az **5-1. táblázat** foglalja össze, pozitív polaritás mellett 25-25 db kisülést jegyeztem fel. Azt vizsgáltam, hogy a kisülés a modell mely részébe csapott. Az első sorozatnál 21 db a 25-ből a 4-es pontba, míg 4 db a 3-as pontba csapott. Ebben az esetben, utólag észrevettem, hogy az elektród egy kicsit közelebb volt a 3-as ponthoz.



5-10. ábra A vonzási tér[1] **[Horváth, 1991]**

Korrigálva a mérési elrendezést, megismételve az eredmény a következő lett: 1-esbe 2 db, 2-esbe 3 db, 3-asba 1 db és a 4-esbe 16 db. Mindeközben egy olyan megfigyelést is tettem, hogy 3 db kisülés az 1-es és a 2-es pont közötti szigetelt részre csapott. Ez azt mutatja, hogy a lapátok vonzási tere nem hanyagolható el teljesen. Az **5-9. ábra** bal oldali része szerinti helyzet tapasztalataink alapján ellentétes a laboratóriumi mérések tapasztalataival és eredményeivel.

Figyelembe véve, hogy a receptorok hossza *dx*, a vonalak *dx* széles szakaszokká válnak, de a *dP/dr* értékek integrált értéke az adott térfogatra még mindig túl alacsony eredményt ad. Azonban a vonzási tér módosítása után, amint az a korábbi ábrán (**5-8. ábra**) látható, jobb egyezést kaptam a számított és mért (**5-1. táblázat**) eredményei között. Ebben az esetben a szigetelt lapátok felületének vonzási tere csökken, amint az a **5-9. ábra** jobb oldalán látható.

Megjegyzés: ha a lapátok felületét teljesen elhanyagoljuk (más szavakkal, csak a receptorok léteznek), akkor az ábrázolt keresztmetszeti receptorok vonzási terének határát a szaggatott fekete vonal jelöli **[Erichsen et al., 2007; Madsen et al., 2009]** *(**5-9. ábra, bal**).*

5.3. A mérési eredmények konklúziója a szélerőművek lapátjain a villámvédelem hatásfokának növelése céljából

A szélgenerátorok villámvédelme az MSZ-EN 62305 alapszabványból kiinduló, de attól lényegesen eltérő szabvány előírásain alapszik **[Cotton et al., 2008]**. Vizsgálataink eredményei azt mutatják, hogy a szabvány előírásait alátámasztó elméleti megfontolások és számítási eljárások **[Hannig et al., 2014; Madsen et al., 2009]** továbbgondolása és továbbfejlesztése szükséges. Számos szélturbina olyan különleges villámjelenségeknek van kitéve, mint például a Japán partvidékén tapasztalható téli villámok. Ezek villámvédelmi kérdéseivel külön CIGREÉ munkabizottság (VG4.36) foglalkozik. A szélturbinákat a villámcsapások legnagyobb része a lapátok végeinél (körülbelül azok utolsó egyharmad részénél) éri. A lapát azonban annak ellenére is károsodhat, hogy a villám közvetlenül a felfogókba csap.

Az elvégzett vizsgálatok eredményei jól mutatják, hogy a szélerőmű villámvédelmének kialakítsa során nem elegendő csak a receptorokat figyelembe venni. Feltétlenül szükséges a szélerőműlapátoknál felhasznált szigetelő rétegekkel már a lapát szerkezetének kialakításakor számolni. Így a PMAS elmélet alkalmazása már a villámvédelem tervezésének fázisában megbízható segítséget tud nyújtani.

6. fejezet

Nagy kiterjedésű és nagy teljesítményű fotovoltaikus erőművek villámvédelme

Az utóbbi években a nemzetközi szakirodalomban gyakran találkozhatunk azokkal a kérdésekkel, amelyekben a fotovoltaikus erőművek leginkább költséghatékony villámvédelmi megoldásait keresik. Esetenként a fotovoltaikus erőművek primer villámvédelemének szükségességét is megkérdőjelezik. **[Christodoulou et al., 2016; Hannig et al., 2014; Rousseau et al., 2006]** A megtévesztésre építő, hibás villámvédelmi megoldások mellett tartósan jelen vannak a piacon a hibás fizikai elven alapuló, szerkezetek (pl. radioaktív villámhárítók), esetenként áltudományos próbálkozások. Az utóbbi években jelent meg és rohamosan terjed az ESE (Early Streamer Emission) villámhárító, amely például a francia nemzeti szabvány **[NFC, 2011]** kiegészítésének részévé válhatott. Mindez annak ellenére, hogy az ESE villámhárítók hatékony működése nem bizonyított. Ugyanakkor a nemzetközi szakirodalom sorozatban számol be olyan káreseményekről (tüzekről, rombolásokról) amelyek a felszerelt ESE villámhárítók ellenére sorozatosan bekövetkeztek szerte a világon[4]. A jó marketingnek köszönhetően az internetes keresések nagyszámban első helyen listázzák. Manapság gyakran találkozunk ESE villámhárítókkal a fejlődő országokban, bár számos európai országban, Dél-Amerikában és Ázsiában (pl. Kínában és Malajziában) is gyakran alkalmazzák.

A 6. fejezetben részletesen vizsgálom a nagy kiterjedésű, nagy teljesítményű fotovoltaikus erőművek primer villámvédelmét. Egyebek mellett megállapítom, hogy a fotovoltaikus rendszerek esetében a primer villámvédelem kiépítése – adott körülmények mellett (pl. adott kiterjedés esetén) – nem szükséges. A primer villámvédelem kiépítésének

[4] ESE villámvédelmet szereltek fel például többek között a tokiói parlament épületére, egy görög hídra és Malajziában a PV parkokban és épületeknél is nagy számban használják. Sokan szeretnék igazolni a hatékonyágát, de mindezidáig ez nem sikerült.

elhagyása azonban nem jelentheti azt, hogy a fotovoltaikus erőmű szekunder villámvédelemének kiépítésre sincs szükség. Általánosan megállapítható, hogy a szekunder villámvédelem kiépítésre – még az igen nagy kiterjedésű fotovoltaikus erőművek esetében is – feltétlenül szükség van.

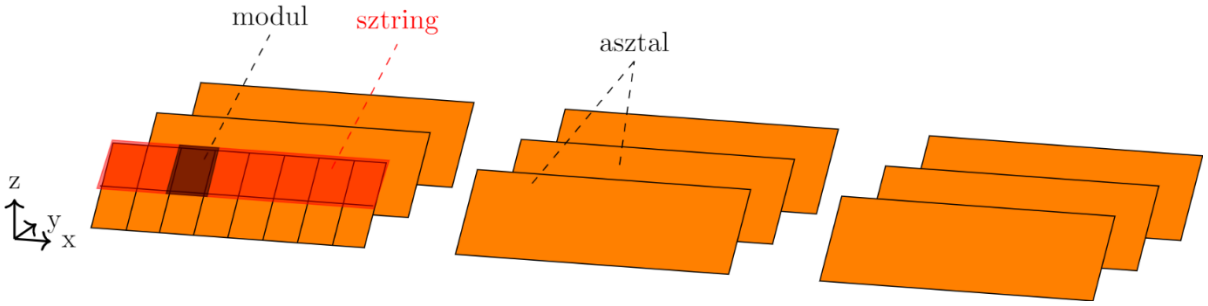
A problémát több irányból is megközelíthetjük.

A) Mekkora valószínűséggel következnek be károk, és azoknak milyen hatásai lehetnek? **[Z. Tóth et al., 2018; Z. Tóth & Kiss, 2017b]**

B) A megoldások szabványossági szempontból megfelelnek-e, vagy szükséges azoknak a felülvizsgálata? **[Rousseau et al., 2012]**

C) Milyen szekunder hatásokkal kell számolnunk, és mekkorák az azok generálta károk? **[Charalambous et al., 2014; Salinas et al., 2018; Zaini et al., 2016]**

A kutatásom során az első két szempontot kiemelten veszem figyelembe oly módon, hogy először a várható kockázatot állapítom meg a PMAS módszer alkalmazásával.



6-1. ábra Egy PV park általános felépítése és részei a kiszolgáló és a vezérlő egységek nélkül **[Zoltán Tóth et al., 2021]**

6.1. A fotovoltaikus erőművek optimális (biztonságos és gazdaságos) védelme a villámcsapások primer és szekunder hatásai ellen

A fotovoltaikus rendszerek a villámvédelem megtervezése szempontjából az IEC 62305-ös szabvány **[IEC, 2011]** alá tartoznak. Ez akkor is igaz, ha esetenként igen nagy kiterjedésű, és nagy teljesítményű fotovoltaikus rendszerekről beszélünk. A szabványból kiindulva vizsgálta meg a kérdést Rousseau és munkatársa **[Rousseau et al., 2014]** is, aki szigorúan a szabványra támaszkodva arra a következtetésre jutott, hogy a szabványt érdemes felülbírálni, de szekunder

villámvédelmi (SPD) szempontból. Ettől merőben eltérő kiindulási pontot veszek alapul: a primer villámvédelem szükségességét vizsgálom.

A **F-27. ábra** a szabvány logikáját mutatja be. Először kiválasztunk egy védelmi szintet (pl. LPS III), amely a kockázatszámítás szempontjából megfelelő lesz. Ez alapján végezzük el a számítást. Ha a feltételezésünk mégsem igaz, a számítást újra el kell végezni egy magasabb védelmi fokozatra (pl. LPS II).

Annak érdekében, hogy a primer és a szekunder villámvédelmek egymással való összefüggését tisztázzuk, emeljünk ki egy-egy példát:

- a P_C érték (**F-3. táblázat**, **F-4. táblázat**), amely a káresemény várható bekövetkezésének valószínűségét jelenti egy belső rendszer esetében, illetve
- a P_B (**F-5. táblázat**), amely a közelben lecsapó villám káros hatása következtében bekövetkező kár valószínűségét jelenti.

Ezek az értékek egymástól függetlenül – az SPS (szekunder villámvédelmi rendszer) és az LPS (primer villámvédelmi rendszer) kockázatát is növelik. Ez azt jelenti, hogy amennyiben nincs kiépítve a primer villámvédelem (LPS), úgy a szekunder védelem szükségessége nő, és fordítva.

$$P_C = P_{SPD} \cdot C_{LD} \tag{6-1}$$

$$P_M = P_{SPD} \cdot P_{MS} \tag{6-2}$$

$$P_{MS} = (K_{S1} \cdot K_{S2} \cdot K_{S3} \cdot K_{S4})^2 \tag{6-3}$$

$$R_1 = R_A + R_B + R_C^a + R_M^a + R_U + R_V + R_W^a + R_Z^a \tag{6-4}$$

$$R_2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z \tag{6-5}$$

$$R_3 = R_B + R_V \tag{6-6}$$

$$R_4 = R_A^b + R_B + R_C + R_M + R_U + R_V^b + R_W + R_Z \tag{6-7}$$

$$R_{B,C,M} = N_D \cdot P_{B,C,M} \cdot L_{B,C,M} \tag{6-8}$$

$$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} \tag{6-9}$$

$$N_G = 0.1 \cdot T_D \tag{6-10}$$

$$L_B = r_p \cdot r_f \cdot h_z \cdot L_F \cdot \frac{n_z}{n_t} \cdot \frac{t_z}{8760} \tag{6-11}$$

$$L_C = L_O \cdot \frac{n_z}{n_t} \cdot \frac{t_z}{8760} \tag{6-12}$$

ahol P_B annak valószínűsége, hogy a védendő objektumba csapó villám fizikai károkat okoz;

P_C annak valószínűsége, hogy a védendő objektumba csapó villám a belső rendszerekben meghibásodást okoz;

P_M annak valószínűsége, hogy a védendő objektum közelébe csapó villám a belső rendszerekben meghibásodást okoz;

P_{MS} belső rendszereknél, amelyek felszerelése nem felel meg a vonatkozó termékszabványokban megadott ellenállóképességnek vagy feszültségszintnek, $P_M = 1$ értéket kell feltételezni. Amennyiben az SPD rendszer megfelel az IEC 62305-4-nek, akkor a $P_M = P_{MS}$;

P_{SPD} az IEC 62305-4 szabványnak megfelelő koordinált SPD rendszertől és a villámvédelmi szinttől (LPL) függ, amelyre az SPD-ket tervezték;

C_{LD} olyan tényező, amely attól függ, hogy az árnyékolás, a földelés és a szigetelés milyen körülményektől függ a belső rendszerben;

^{a} kizárólag robbanásveszélyes szerkezeteknél, valamint kórházaknál vagy egyéb épületeknél, ahol a belső rendszerek meghibásodása azonnal veszélyezteti az emberi életet;

^{b} csak azokra a tulajdonságokra, ahol az állatok elveszthetnek;

N_X az éves veszélyes események száma (X helyettesítendő);

P_X a szerkezet károsodásának valószínűsége (X helyettesítendő);

L_X a bekövetkező, várható veszteség (X helyettesítendő);

T_D a zivataros napok száma évente;

r_t olyan tényező, amely csökkenti az emberi élet veszteségét a talaj vagy a padló típusától függően;

r_p olyan tényező, amely csökkenti a fizikai károsodás miatti veszteséget, a tűz következményeinek csökkentésére hozott rendelkezések függvényében;

r_f olyan tényező, amely csökkenti a fizikai károsodás miatti veszteségeket, a tűz vagy a szerkezet robbanásveszélyétől függően;

h_z olyan tényező, amely növeli a fizikai károsodás miatti veszteséget, ha különleges veszély áll fenn;

n_z a zónában lévő személyek száma;

n_t a struktúrában lévő személyek teljes száma;

t_z az az idő órákban évente, amelyen a személyek tartózkodnak a zónában;

K_{S1} figyelembe veszi a szerkezet, az LPS vagy más pajzsok szűrési hatékonyságát az LPZ 0/1 határnál;

K_{S2} figyelembe veszi a szerkezeten belüli pajzsok szűrési hatékonyságát az LPZ X/Y határon (X > 0, Y > 1);

K_{S3} figyelembe veszi a belső vezetékek jellemzőit;

K_{S4} figyelembe veszi a védendő rendszer impulzusálló ellenállását.

Fontos megemlíteni, hogy van még egy kockázati tényező, az R_M (belső rendszerek meghibásodásának kockázata az objektum közelébe csapó villám esetén), ami a P_M-en keresztül közvetlenül befolyásolja az LPS telepítését. Ez a tényező egy belső rendszer meghibásodásának valószínűségével súlyozza az értékeket. Ezen értékek előre meghatározottak, szabványosítottak. A kockázati tényezők helytelen vagy indokolatlanul szigorúbb felvétele adhat ki egy nagyobb LPS szintet.

A szabvány 4 részre bontható aszerint, hogy a védendő objektum milyen célt szolgál, és hogy a kiépítendő villámvédelmi rendszer (LPS+SPS) – tekintettel annak fontosságára – megtérüljön. Ennek megfelelően beszélhetünk az alábbiakról:

1. R_1, emberi élet elvesztésének kockázata ($R_T < 10^{-5}$ [5]);
2. R_2, közszolgáltatás kiesésének kockázata ($R_T < 10^{-3}$ [6]);
3. R_3, kulturális örökség elvesztésének kockázata ($R_T < 10^{-4}$ [7]);
4. R_4, gazdasági érték elvesztésének kockázata ($R_T < 10^{-3}$ [8]).

Az R_1 kockázati tényezőt a vizsgált esetekben rendre figyelembe vették, azonban itt fontos megemlíteni, hogy villámvédelmi szempontból csak az az eset kockázatos, ha a kezelőszemélyzet zivataros időben az erőmű területén tartózkodhat. Ennek szabályozása esetén az R_1 kockázati tényező figyelmen kívül hagyható.

[5] elfogadható kockázat; maximális határérték R_1 esetén, amelynél nagyobb nem lehet az adott LPL alkalmazása esetén

[6] elfogadható kockázat; maximális határérték R_2 esetén, amelynél nagyobb nem lehet az adott LPL alkalmazása esetén

[7] elfogadható kockázat; maximális határérték R_3 esetén, amelynél nagyobb nem lehet az adott LPL alkalmazása esetén

[8] elfogadható kockázat; maximális határérték R_4 esetén, amelynél nagyobb nem lehet az adott LPL alkalmazása esetén

Az R_2 tényező vizsgálata triviálisnak tűnhet, viszont ehhez a hatályos energiaszabályozási előírásokhoz kell nyúlnunk. A hagyományos erőmű típusokhoz képest a PV rendszereknek nem szükséges szigorú menetrendet követniük. (A termelést az időjárás viszontagságai olyan mértékben befolyásolják, hogy ez nem is lenne lehetséges.) Egy PV erőmű esetleges kiesése – már csupán az erőmű teljesítménye miatt – sem jár akkora következménnyel, hogy valójában a közműkiesés lehetőségével számolni kelljen.

Az R_3 elhagyható, mivel egy fotovoltaikus erőmű nem számít kulturális örökségnek, illetve várható élettartamuk (30-40 év) utáni leszerelésüket követően – amennyiben lehetséges – várhatóan teljesen újrahasznosítják. Ezzel szemben egy igen régi erőmű (pl. a Kelenföldi erőmű) a villamos energetika szakmatörténeti és építészeti jelentőségű kiemelkedő emlékének számít.

Az R_4 tényező összetettebb, sokrétű gazdasági és mérnöki számítást igényel. Akkor térül meg a villámvédelem kiépítése mint beruházás, ha egy adott villámvédelmi rendszer bekerülési költségének és a védelem ellenére várható károknak az összege kisebb, mint a villámvédelem nélkül várható valamennyi kár. A számítást a védendő objektum tervezett élettartamára el kell végezni, és a villámvédelem kiépítésére szóló döntést a megtérülés alapján kell meghozni. A gazdasági alapú döntés további részletezése nem része a disszertációmnak.

6.2. A fotovoltaikus erőműveknek a speciális geometriából adódó jellegzetes tulajdonságai

A fotovoltaikus erőművek a hagyományos épületekhez és más épített objektumokhoz képest egy speciális elrendezésként értelmezhetők. Egyrészt ezek az erőművek nagy alapterületet foglalnak el, másrészt a területen viszonylag alacsony építmények helyezkednek el. Az erőmű beépített teljesítményével arányosan az elfoglalt alapterület nő. A telepítéskor az erőmű nagy kiterjedése miatt figyelembe kell venni változékony terepviszonyokat, a talaj dőlésszögét, a talaj villamos tulajdonságait, illetve az egyes részobjektumok által vetett (fény)árnyékolás hatását.

Speciális az elrendezés abból a szempontból is, hogy hasonló részegységekből épül fel. Ezen egységek alkotnak nagyobb halmazokat, illetve ezek között a korábban felsoroltak miatt

változó, de leginkább hasonló távolságok vannak. Ha összevetjük egy ténylegesen (a részegységek közötti távolságokkal) kialakított naperőmű esetét egy elméleti (az egyes napelemtáblák között térközök nélküli) esettel, azt az eredményt kapjuk, hogy a térközök elhanyagolható mértékben növelik meg egy lehetséges villámcsapás bekövetkezését. A fotovoltaikus erőművekben ugyanis az elemek összefüggő rendszerének szélei vannak kitéve leginkább a megnövekedett villámvédelmi kockázatnak.

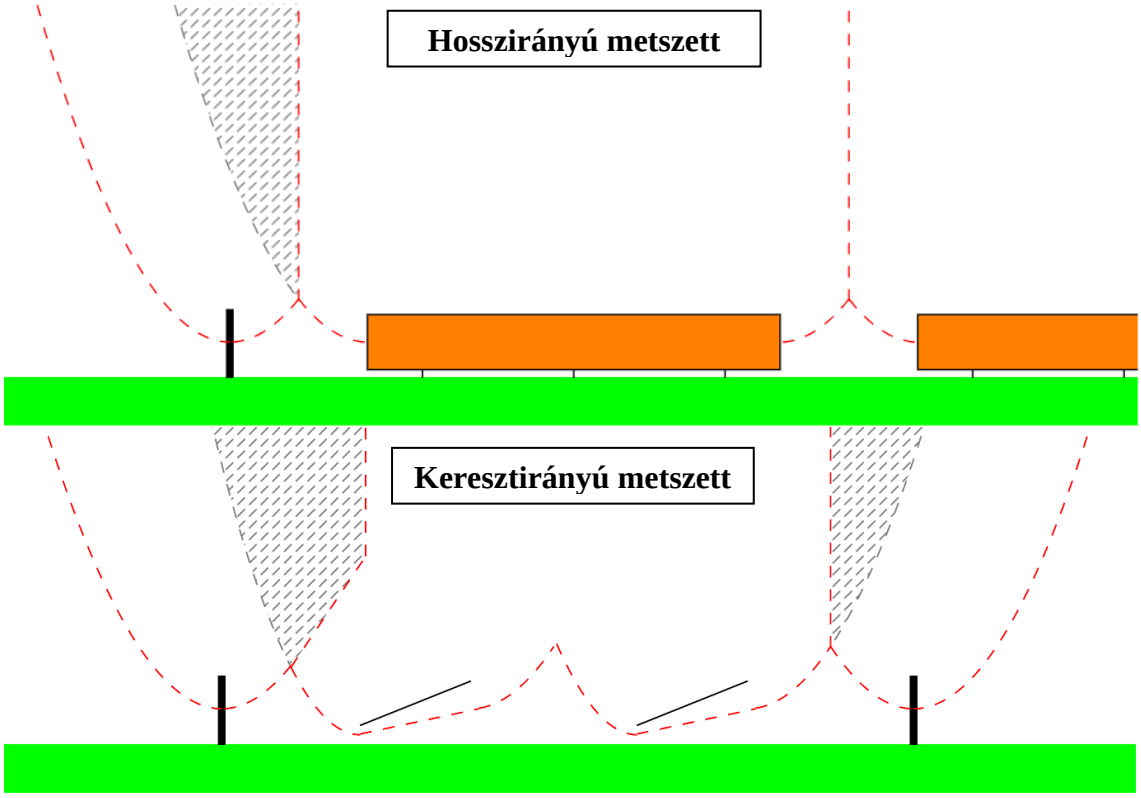
Csak a szabványosított eljárásokat vizsgálva a primer villámvédelem kiépítésének szükségessége nem kérdőjelezhető meg. A szabvány szerint a telepített villámvédelmi felfogók rendszerét vizsgálják mind az első, mind pedig a periodikus felülvizsgálatok során, amikor arra a kérdésre kell választ adni, hogy a kiépített rendszer megfelel-e az elvárt védelmi szintnek. Ezen vizsgálatok nem veszik figyelembe az erőmű területén, illetve annak környezetében minden valóságos esetben megtalálható objektumokat (pl. a vagyonvédelmi kerítést, a vagyonvédelmi kamerákat tartó oszlopokat, a világítási oszlopokat). Ezeket az építményeket azonban fel lehetne használni primer villámvédelmi felfogóként, és így a kockázati szint lejjebb lenne sorolható. Ezt támasztják alá a PMAS elmélet alapján végzett számítások is. E gondolatmenet alapján egy módosított számítási metodika választ tud adni arra a kérdésre, hogy az adott elrendezésre nézve szükséges-e primer villámvédelem, illetve, ha igen, akkor milyen védelmi szintet érdemes alkalmazni esetleg eltérve a szokásos gyakorlattól.

A fotovoltaikus erőművekben a fotovoltaikus panelek mellett egyéb, az esetleg fellépő túlfeszültségekre érzékeny rendszerek sérülése okozhat jelentős károkat. Ezeknek az eszközöknek, berendezéseknek és rendszereknek a szekunder villámvédelmét feltétlenül ki kell építeni.

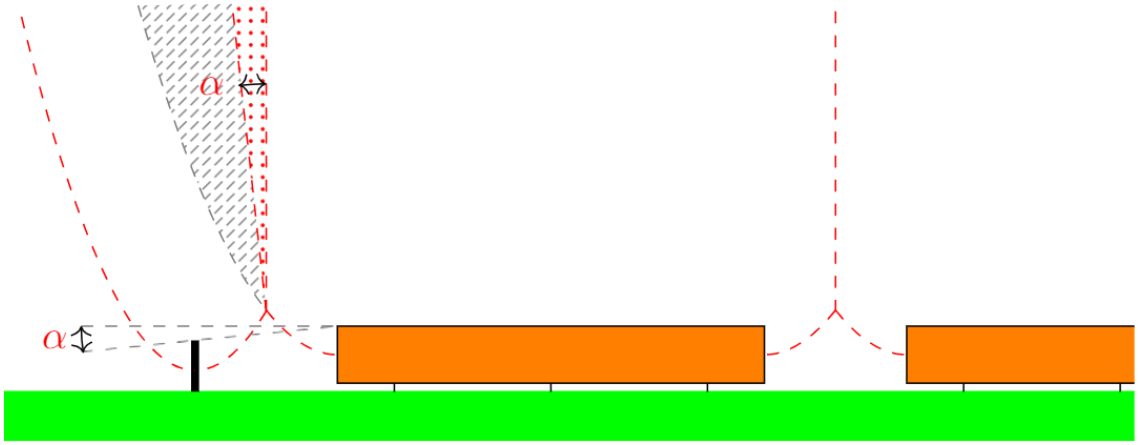
6.3. A vagyonvédelmi eszközök mint a primer villámvédelem részei

A vonatkozó nemzetközi szabványok egyértelműen előírják a primer villámvédelem kiépítését. A szabványos vizsgálatok azonban nem veszik figyelembe az erőmű környezetében megtalálható objektumokat, amelyeket primer villámvédelmi felfogóként figyelembe véve a kockázati szint csökkenthető lenne.

A PMAS elmélet **[Horváth, 1960]** alapján kidolgozott módosított számítási metodika szerint eldönthető, hogy szükséges-e primer villámvédelem, illetve, ha igen, akkor milyen védelmi szintet érdemes kiépíteni. A kapott eredmény esetenként jelentősen eltérhet a jelenleg szokásos gyakorlattól.



6-2. ábra A vagyonvédelmi kerítés hatása a vonzási térre azonos kerítés és PV asztal magasság esetén (a PMAS 50%-os burkológörbéjének grafikus megjelenítése ε = 1 esetre) **[Zoltán Tóth et al., 2021]**



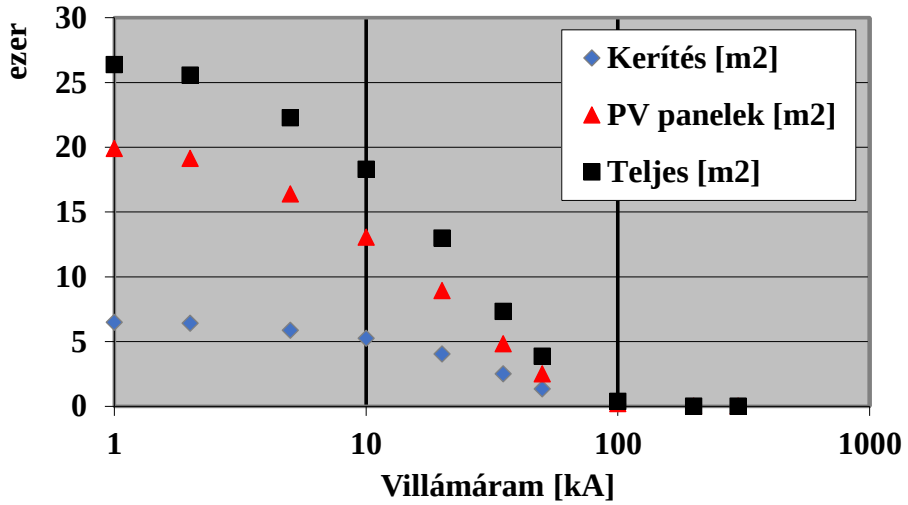
6-3. ábra A vagyonvédelmi kerítés hatása a vonzási térre nem azonos kerítés és PV asztal magasság esetén (a PMAS 50%-os burkológörbéjének grafikus megjelenítése ε = 1 esetre) **[Zoltán Tóth et al., 2021]**

A fotovoltaikus erőművek esetében nem csupán a fotovoltaikus panelek, hanem egyéb, az esetleg fellépő túlfeszültségekre érzékeny rendszerek (elektronikák, védelmek, hajtások és mérőrendszerek) sérülése jelentős járulékos költségeket okozhat. A biztonságos üzemelés érdekében ezen modulok szekunder villámvédelemmel való ellátása mindenképpen szükséges.

6.4. A PMAS számítás eredményei

Számításokat végeztem annak vizsgálatára, hogy milyen hatással van a villámvédelemre az erőműben a PV asztalokat körülvevő kerítés. Kiszámítottam, hogy mekkora a valószínűsége egy-egy adott áramerősségű villám becsapásának az adott térrészekre. A teret két részre bontottuk:

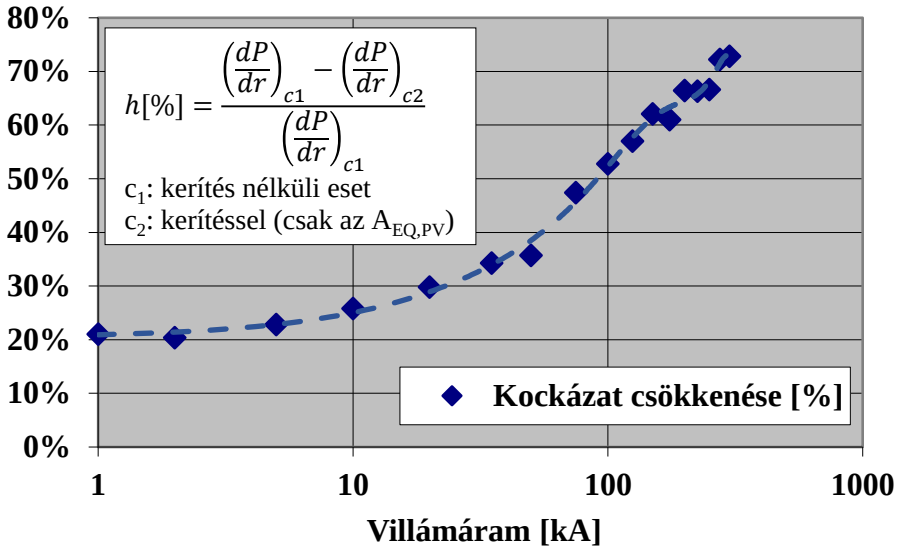
- kerítés és
- PV asztalok (összes).



6-4. ábra A PMAS számítás eredményei egy képzeletbeli 8×12 asztalból álló PV park esetén **[Z. Tóth, Kiss, et al., 2020]**

A számítások eredménye az (**6-4. ábra**) ábrán látható. A számítást úgy is elvégeztem, hogy a kerítést figyelmen kívül hagytam. Az eredményeket összehasonlítását a **6-5. ábra** mutatja.

Jól látható, hogy a két eset között jelentős az eltérés. A kisebb villámáram értékek esetében a kerítés által okozott kockázatcsökkenés közel 20%-os, de a nagyobb, de ritkábban előforduló áramértékek felé haladva ez az érték 60% fölé emelkedik.



6-5. ábra A PMAS számítás eredményei egy képzeletbeli 8×12 db asztalból álló PV parkra; a kerítés által okozott kockázatcsökkenés százalékos értéke **[Z. Tóth, Kiss, et al., 2020]**

6.5. A kockázat változása a napelem méreteinek függvényében

A PMAS számítást a szabályos, ismétlődő elemekből álló napelemes rendszerekre elvégezve egyfajta trendet lehet kiolvasni. A szabványra visszatérve (**2-1. táblázat**) azt láthatjuk, hogy az adott villámvédelmi osztályokra meghatároznak egy olyan maximális villámáramot, amelyre az adott fokozat esetén számolni szükséges. Ez a gyakorlatban nem azt jelenti, hogy annál nagyobb villámáramok ne fordulhatnának elő. A nagy áramok azonban csak igen ritkán következnek be. Ezek a rendszer szempontjából elhanyagolható anyagi károkkal, esetleg kiesésekkel járnak, amelyek vagy elviselhető mértékűek, vagy maga a beépítendő védelmi rendszer sokkal többe kerülne.

A **F-23. ábra** azt szemlélteti, hogy az adott blokkméretű elrendezés esetében, kerítés nélkül mekkora egyenértékű terület tartozik az adott villámáramok előfordulása esetén az adott elrendezéshez. Míg a **F-24. ábra** ugyanezt csak a PV erőmű területére normálva. Láthatjuk, hogy a park méretét növelve, míg a **F-23. ábra** alapján az A_{eq} növekszik ezzel arányosan, addig a **F-24. ábra** esetén ez megfordul, és azt látjuk, hogy a területre normálva csökken. Képzeljük el, hogy a PV park végtelen kiterjedésű, akkor azalábbi összefüggés igaz lesz:

$$A_{eq}[m^2] = A_{PV}[m^2] \tag{6-13}$$

Vagyis elméletileg pont ugyanannyi villámcsapás éri a PV parkot, mint érné ugyanazt a területet, ha nem lenne ott az erőmű. Ez egy elég erős kijelentés, de ne feledjük el, hogy ilyen rendszer csak elméletben létezhet. Nem véletlen, hogy a disszertációban is csak véges kiterjedésű rendszerekkel foglalkozom. Ez a gondolatmenet előrevetíti a mögöttes bonyolult fizikai folyamatokat, és az azokból következő PMAS számítás eredményeit is. Más szóval azt, hogy milyen értékhez fogunk közeledni, kell közeledni a valós, gyakorlati helyzetekben is.

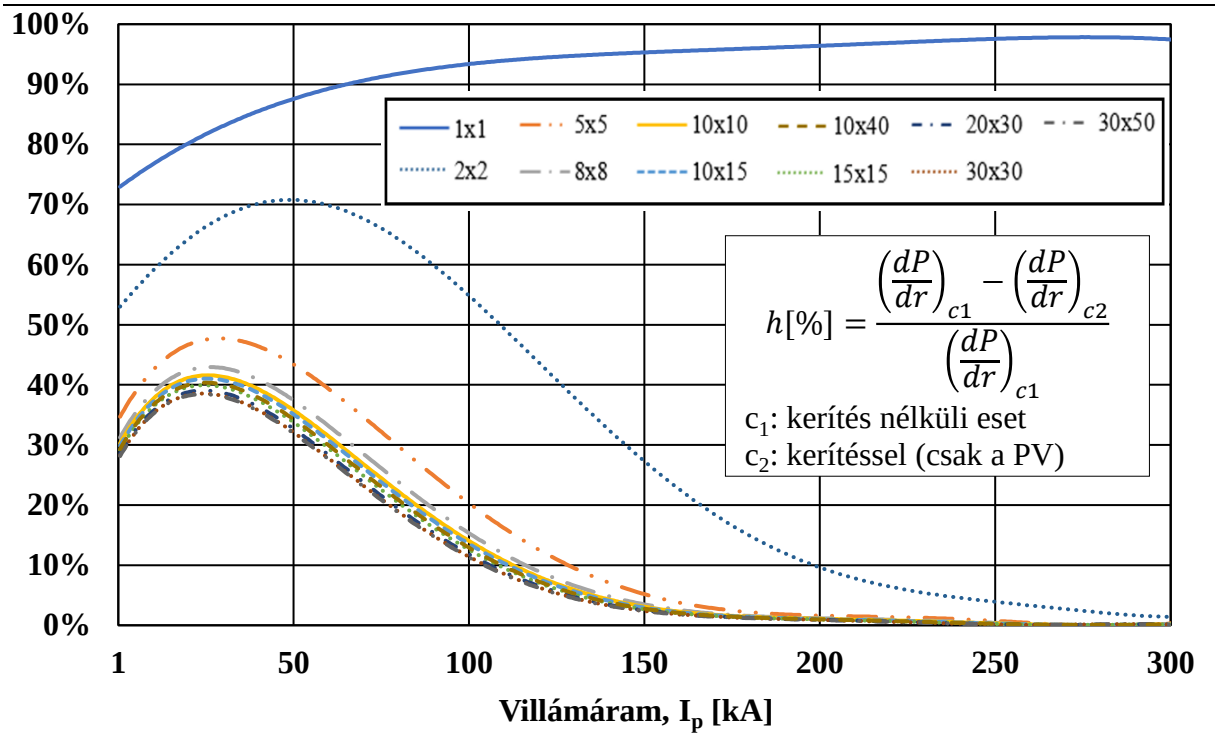
Visszatérve az eredeti gondolatmenetre, a szabványban megtalálható áramértékek, mint határértékek esetében élni kell egyfajta határértékkel, ami alatt/felett nem tekintjük az adott osztályba sorolandónak a részértéket. Ezt a legegyszerűbb akár az előfordulási gyakorisághoz kötni az alábbiak szerint:

$$f = {}^{1}/_{N_G \cdot A_{eq}} \left[\frac{év}{villámcsapás}\right] \geq 10^C \tag{6-14}$$

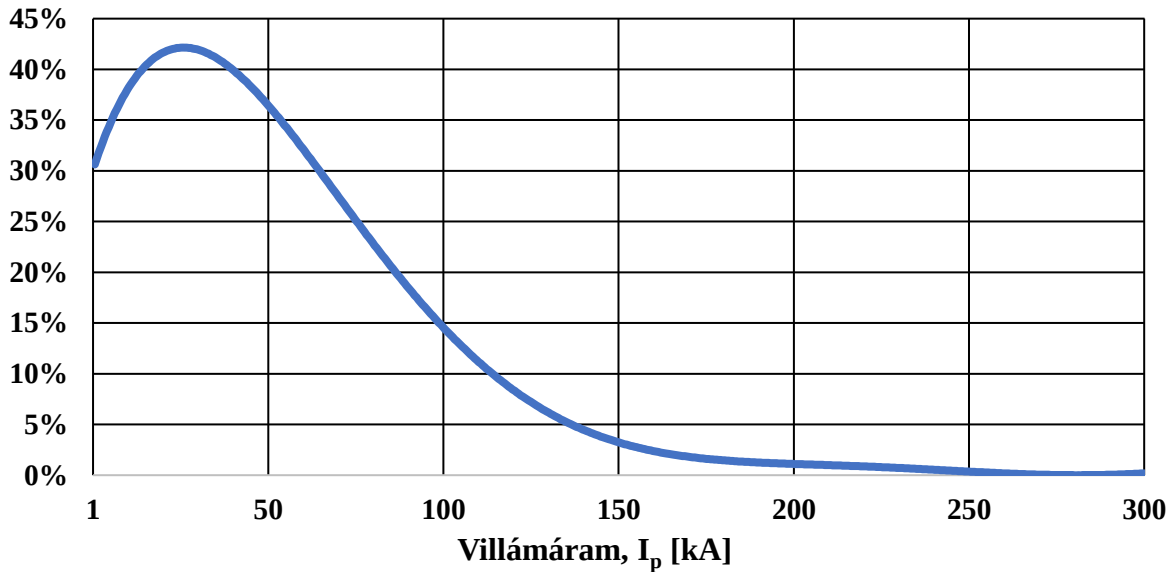
ahol C az osztálybesorolástól függő változó (LPL I: 5, LPL II: 4, LPL III-IV: 3).

A következőkben nézzünk meg még két – az eredményeket bemutató – grafikont (**F-25. ábra**, **F-26. ábra**). Az előbbiekhez hasonlóan a **F-25. ábra** az A_{eq} értéket, míg a **F-26. ábra** a normált értékeket mutatja. Itt most az abszcisszán a blokkméretek szerepelnek és az egyes görbék az adott villámáramok eloszlásához tartoznak. Mint korábban, itt is ugyanazt a tendenciát láthatjuk.

A következőkben (**6-6. ábra**) a blokkméreteket változtatva az egyes villámáramcsúcsok eloszlásának függvényében ábrázoltam a vagyonvédelmi kerítés nélküli esethez képest a PV parkba csapó villámok számát a kerítéssel végzett számításokhoz arányosítva, százalékos alakban. Az így kapott értékekből megállapítom, hogy a nagyobb PV parkoknál a kisebb villámáramok esetén (I_p < 50 kA) a változás mértéke -30% és -40% közötti, míg I_p < 100 kA esetén is -10% és -15% között mozog, I_p < 150 kA esetén pedig -5% és -8% közötti.



6-6. ábra A PMAS számítás eredményeinek különbsége %-ban (a PV panelba csapás csökkenése) különböző méretű PV parkokra a villámáram csúcsértékének függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]**



6-7. ábra A PMAS számítás eredményeinek, különbségének határértéke **[Zoltán Tóth et al., 2021]**

A **6-7. ábra** a korábbi számításoknak azt az elméleti határértékét ábrázolja, amely megadja, hogy mekkora az védőhatása mindazon rendszereknek/objektumoknak, amelyek nem a PV erőmű közvetlen részei, hanem pl. a vagyonvédelemhez tartoznak. Fontos ismételten

kiemelni, hogy a gyakorlat azt mutatja, hogy a villámvédelmi számítások során nem veszik figyelembe az erőmű területén, illetve annak környezetben minden valóságos esetben megtalálható objektumokat (pl. a vagyonvédelmi kerítést, a vagyonvédelmi kamerákat tartó oszlopokat, a világítási oszlopokat). Ezeket az építményeket azonban fel kellene használni primer villámvédelmi rendszer részeként.

6.6. Javaslat a modellszámítások alapján az új kockázatbesorolási értékekre

A számításaim alapján, illetve a fokozatok szabványban megfogalmazott követelményei (**6-1. táblázat**) alapján javaslatot teszek a fotovoltaikus erőművek primer villámvédelmére. A **6-1. táblázat** első oszlopa a villámvédelmi fokozatot tartalmazza, mellette rendre:

- A legkisebb villámáramcsúcs, amely maximum bejuthat a rendszerbe. Az ennél kisebb áramértékekhez tartozó gördülő gömb sugara – ami az orientációs távolsággal azonos – kisebb, mint az adott védelmi szinthez (LPL) előírt sugár.
- A legnagyobb villámáramcsúcs, amelyet a védelmi szint (LPL) alkalmazása esetén a védelmi eszközöknek (villámvédelmi felfogó, levezető, túlfeszültségvédelem stb.) el kell viselnie. Ezen áramértékre rendeltetésszerűen kell működnie a védelemnek. Ez költségoldalról jelent plusz terhet.

A korábbi fejezetekben bemutattam a kockázatszámítás négy kockázati tényezőjét (6.1. fejezet). Megállapítottam, hogy R_1 és R_3 számítása elhagyandó. R2 érték számítás a jelenlegi szabályozás mellett nem áll fenn, míg az R_4 minden esetben elvégzendő, amennyiben rendelkezésre állnak az adatok egy komplex gazdasági számításhoz. Gazdasági kockázat a fajlagosan drágább elektronikai (szabályozás, inverter) és erősáramú berendezések (konverter, transzformátor) szekunder villámvédelme, illetve az ezeknek helyet szolgáló épületek esetleges primer villámvédelemmel történő felszerelése. A PV asztalok ahogyan az a 6.2. fejezetben tárgyalva volt, speciálisnak tekinthetők villámvédelem szempontjából. Amennyiben vagyonvédelmi kerítéssel elkerített a telep, és ez a kerítés a fotovoltaikus asztalokhoz kellően közel helyezkednek el, úgy egy esetleges közvetlen villámcsapás esetén bekövetkező olyan esetek száma, amely az asztalokba csap csökken. Kerítés nélküli esetben is elmondható, hogy a villámoknak jobban kitett részek az asztalok szélei, amelyek a PV park szélein találhatóak.

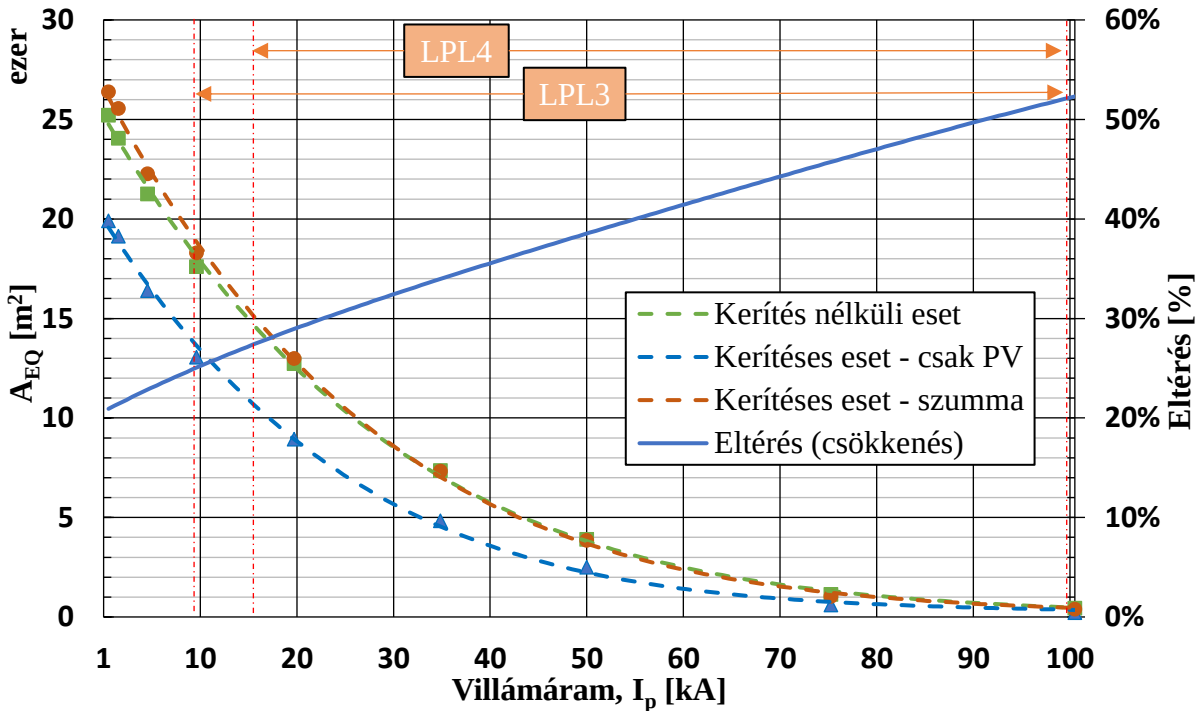
6-1. táblázat A villámáramok az egyes LPL-nek megfelelően az IEC 62305-1 Table 3 és Table 4 alapján **[IEC, 2011]**

LPL	Legkisebb villámáram*, $I_{csúcs}$ [kA] (> P [%])	Legnagyobb villámáram**, $I_{csúcs}$ [kA]
IV	16 (84)	100
III	10 (91)	100
II	5 (97)	150
I	3 (99)	200

*** A legkisebb villámáram. P = X% a valószínűsége az ennél nagyobb az előforduló villámáramoknak**

**** Az a villámáram, amire tervezni szükséges**

A **6-1. táblázat**ból kiolvashatjuk továbbá, hogy a PV parkok esetében leggyakrabban alkalmazott villámvédelmi szintek (LPL III és IV) legmagasabb megengedett villámárama egységesen 100 kA. Ez a korábban már említettek szerint azt jelenti, hogy ezen áramértéket a primer eszközöknek el kell viselniük. Vagyis az LPL III-as fokozat kiépítése, amely szigorúbb követelményeket támaszt a levezető keresztmetszetére és anyagára vonatkozóan, felesleges és tudományosan nem megalapozott PV parkok esetében. A PV modulok nem tekinthetők sem finomelektronikai eszközöknek, sem a jelenkori és jövőbeli árukat tekintve érzékeny eszközöknek.



6-8. ábra A PMAS számítás eredményei és a két eset különbségei %-ban egy 8×12 asztalból felépülő PV parkra a villámáram csúcsértékének függvényében, jelölve a villámvédelmi szinteket **[Zoltán Tóth et al., 2021]**

A **6-8. ábra** azt mutatja, hogy a két esetben, ha figyelembe vesszük a vagyonvédelmi kerítést vagy sem, miként módosul a szumma A_{EQ} (egyenértékű terült, N_G = 1 esetben. Az eltérés minimálisnak (<5%) mondható, ám ugyanez a csak a PV parkot érő villámcsapások száma[9] esetében a 10 és 16 kA közötti tartományban 25% körüli, ami elegendő ahhoz már, hogy ne kelljen kiépíteni egy magasabb besorolási szintű LPS-t.

6.7. Összegzés

A káresetek elkerülése és a hatékony villámvédelem érdekében kimutattam, hogy a vagyonvédelmi kerítéseket, a biztonsági kamerákat tartó oszlopokat, a világítási oszlopokat, és más, nem elhanyagolható objektumokat a primer (külső) villámvédelmi rendszerek részének kell tekintenünk. Ilyen módon a számításaim és esetvizsgálataim eredményei szerint a villámvédelmi szint az LPL III-ról egy osztályt csökkenthet LPL IV-re, amely a leggyakrabban használt besorolás.

Megállapítottam továbbá, hogy amennyiben a PV erőmű (mérete, alapterülete, illetve teljesítménye alapján) egy adott határ alatt van, nem szükséges a primer védelemét kiépíteni. Ezt a mérethatárt PMAS számítás elvégzésével lehet igazolni. Ezekben az esetekben számítást kell végezni az erőmű területén, illetve környezetében elhelyezkedő objektumok (pl. a vagyonvédelmi rendszerekhez tartozó tárgyak) vonzási terének meghatározása céljából is. Konkrét határ azért nem adható, mert az földrajzi koordinátákra jellemző N_G érték függvényben is változik.

[9] A villámcsapások száma és az A_{EQ} között az N_G teremt kapcsolatot: $N = N_G \cdot A_{EQ}$.

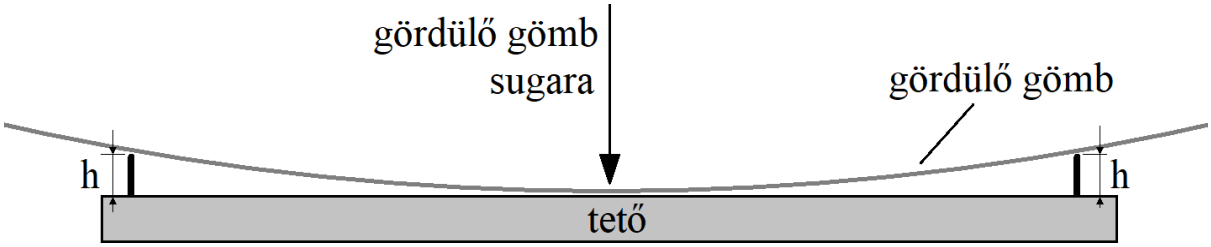
7. fejezet
A tetőszerkezet, mint a villámvédelmi rendszer része

A villámvédelemben a rácsháló módszer (MM) főleg a lapostetős szerkezeteknél terjedt el. Korábban abból a feltételezésből indultak ki, hogy a rácsháló egy Faraday-kalitkaszerű elrendezést alkotva védi a védendő objektumot. Mint azt korábban (**2. fejezet)** már kifejtettem, a védett tér – szabvány szerinti fogalom – mint olyan nem létezik. Pontosan nem definiálható, csupán, a tervezést segítő, kreált fogalom. Az objektumok védelmi szintjét növelni tudjuk azáltal, hogy növeljük azon éveknek az átlagos számát (átlagos becsapásmentes időszak), amely megmutatja, hogy hány évente éri becsapás a védendő objektumot (a villámvédelmi felfogón kívüli részeket) a kiépített villámvédelem ellenére.

A rácsházlót a RSM-mel vizsgálva érdekes következtetésre juthatunk. Két esetet érdemes megkülönböztetni:

1. szigetelő anyagból készült tetőszerkezetet, és
2. vezető anyagból készült tetőszerkezetet.

A vezető anyagból készült tetőszerkezet esetén a probléma megoldása egyszerű: a tetőt az EPH-ba (egyenpotenciálú hálózat) be kell kötni. Így a tető a villámvédelmi rendszer szerves részét fogja alkotni. Érdekesebb a kérdés a szigetelő anyagból készült tetőszerkezetek esetében. függően attól, hogy gyúlékony, vagy sem. A nálunk is bevezetett nemzetközi szabvány **[IEC, 2011]** nem tesz különbséget a gyúlékony anyagok szerint, miközben meghatározza a villámvédelmi felfogó háló magasságát (a villámcsapás hatására megolvadó fémolvadék lehűlésének idejétől függ). A következő ábrákon (**7-1. ábra, 3-1. ábra**) egy-egy klasszikus elrendezés keresztmetszetét mutatom be. Egyik esetben (**7-1. ábra**) a gördülő gömb nem metsz bele a tetőszerkezetbe, míg a másik esetben (**3-1. ábra**) belemetsz a tetőszerkezetbe. Az utóbbi ábrát (**3-1. ábra**) tekintve további kérdést vet fel, ha a villámvédelmi felfogóhálót közvetlenül a tetőre helyezzük el, vagy a tető és a háló távolsága minimális (<10 cm).



7-1. ábra A rácshálós módszer kombinálása a gördülő gömb módszerrel, keresztmetszeti nézet

7.1. A tetőszerkezet anyaga és a becsapás valószínűsége

A tetőszerkezet anyagával a **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2019]** cikkemben foglalkoztam először. A téma kibontása során különítsünk el két esetet:

1. száraz zivatar és
2. nedves zivatar.

Utóbbi esetben a folyamatos eső miatt egy vezető réteg alakul ki a tető felszínén. Itt érdemes megjegyezni, hogy bár az esővíz desztillált víznek tekinthető, ám a tetőre érve az arra rárakódott szennyeződést oldva már nem az. Ez az eset egy vezető sík-rács elrendezéssel jól modellezhető. Amennyiben ebből a felvetésből indulunk ki, akkor a szélerőművek esetében alkalmazott gondolatmenetet követve, a vonzási terek síkmetszete vonalszerűek lesznek, amelyek merőlegesek a vízszint síkhoz viszonyítva. (Magának a rácshálónak is a vonzási tere egy vonallal lesz leírható a rács belseje felé; a szélein azonban a megszokott vonzási tér alakját veszi fel.)

A villámvédelmi rácshálót közvetlenül a tetőre is felhelyezhetjük, amennyiben annak anyaga nem gyúlékony. A rácsháló szigetelt vagy szigeteletlen tartószerkezetre is kerülhet. Ezekben az esetekben a rácsháló vonzási terének keresztmetszete egy pont-vonal elrendezés vonzási terét adná. Ezen elrendezés esetén előfordulhat, hogy az adott rács közepén a tetőbe csapó villámok valószínűsége lesz a nagyobb. Ez azt jelenti, hogy a tetőbe csapó villámok száma arányaiban nagyobbak lesznek.

A tapasztalatok viszont nem ezt mutatják. Az utóbbi 100 évben a villámvédelmi felfogóhálók jól működtek. Ennek egy nagyon speciális probléma szeletével foglalkozott Arevalo és munkatársai **[Arevalo et al., 2016]** is.

7.2. Laboratóriumi mérések eredményei

A rácshálóval foglalkozó különböző kutatók vizsgálati eredményei nem összehasonlíthatóak egy az egyben, mivel az egyes kutatók más-más módon adták közre az eredményeket. Arevalo és munkatársai **[Arevalo et al., 2016]** a számításait a legnagyobb I_{max} villámáramra végezte el. Az eredmények hasznosak, de nem tartalmaznak információt a villámcsapások számáról arra az esetre, ha $I \leq I_{max}$.

Horváth Tibor professzor úr cikke **[Horváth, 2006]** viszont egy százalékos értéket ad meg, amely megmutatja, hogy a villámcsapások mekkora része éri el a tetőt a villámvédelmi felfogó helyett. Ez jó eszköz a különböző villámvédelmi felfogók összehasonlítására. Fontos, hogy figyelembe kell venni az adott területen érvényes N_g villámsűrűséget (izokeraunikus szintet). Ha két terület N_g értékei eltérnek egymástól, a védett objektumot érő villámcsapások száma (és a villámvédelem ellenére a védett objektumot érő villámcsapások közötti átlagos idők (MTBF)) is különbözni fognak annak ellenére, hogy a rácshálók hatékonysága megegyezik egymással. (Nyilvánvaló, hogy az MTBF tízszer kisebb, ahol N_g = 10, mint N_g = 1 esetén, pedig a villámvédelmi felfogórendszer hatékonyságának százalékos értéke azonos.)

Horváth professzor úr **[Horváth, 2006]** a számítás eredményét olyan formában ábrázolja, amely tartalmazza a védendő objektumba csapó villámcsapások közötti átlagos időt. A százalékos értékre való konvertálásához a következő számítást kell elvégezni:

$$N = {}^{1}/_{MTBF} \tag{7-1}$$

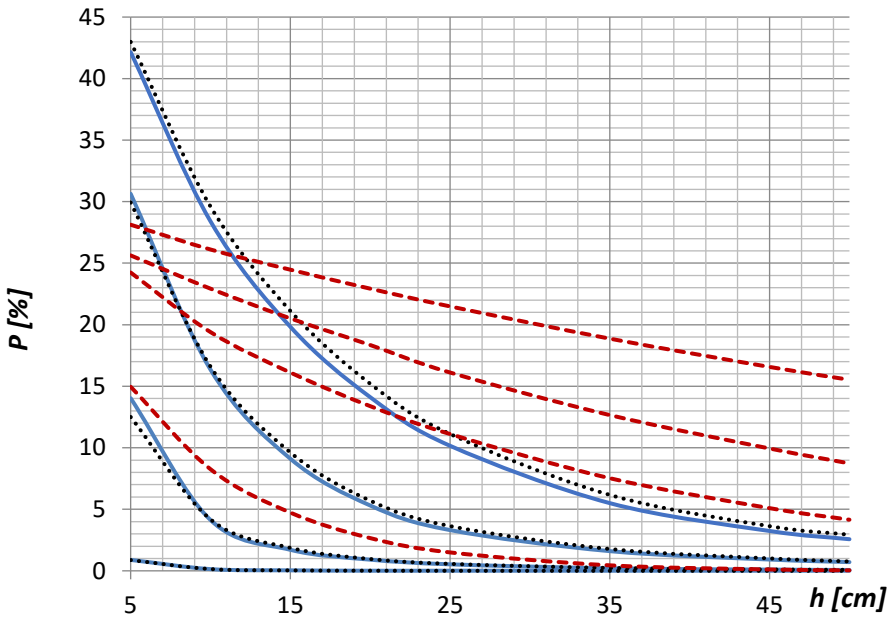
$$N^* = N_g A \tag{7-2}$$

$$P = 100\, {}^{N}/_{N^*} \tag{7-3}$$

ahol N, N^* a villámcsapások gyakorisága (villámcsapás/év);
N_g az izokeraunikus szint (villámcsapás/év/km^2);
A a tető területe (m^2) és
P a villámcsapás valószínűsége.

Itt A jelöli a tető felületét, 40 m × 40 m. A számítás eredményei az alábbi ábrán (**7-2. ábra**) láthatók. A háló mérete az alsó görbétől a legmagasabbig 5 m × 5 m, 10 m × 10 m, 20 m × 20 m, illetve 40 m × 40 m. Az abszcissza a háló magasságát ábrázolja cm-ben, míg az

ordináta a hatékonyságot adja meg. A kék, folytonos görbe Kern és munkatársainak **[Kern et al., 2012]** eredményei alapján; a piros, szaggatott görbék Horváth professzor úr számításai **[Horváth, 2012b]** alapján. A fekete, pontozott görbe értékei a saját számítás eredménye. Elméletileg, ezeknek és a kék folytonos görbéknek azonosnak kellene lennie, viszont a számítás felbontása a vonzási térre különböző. A kérdés ezeknél a számításoknál, hogy mikor ad elegendő pontosságot a DGEM, és mikor szükséges PMAS-t használni annak érdekében, hogy a hiba minimális legyen.



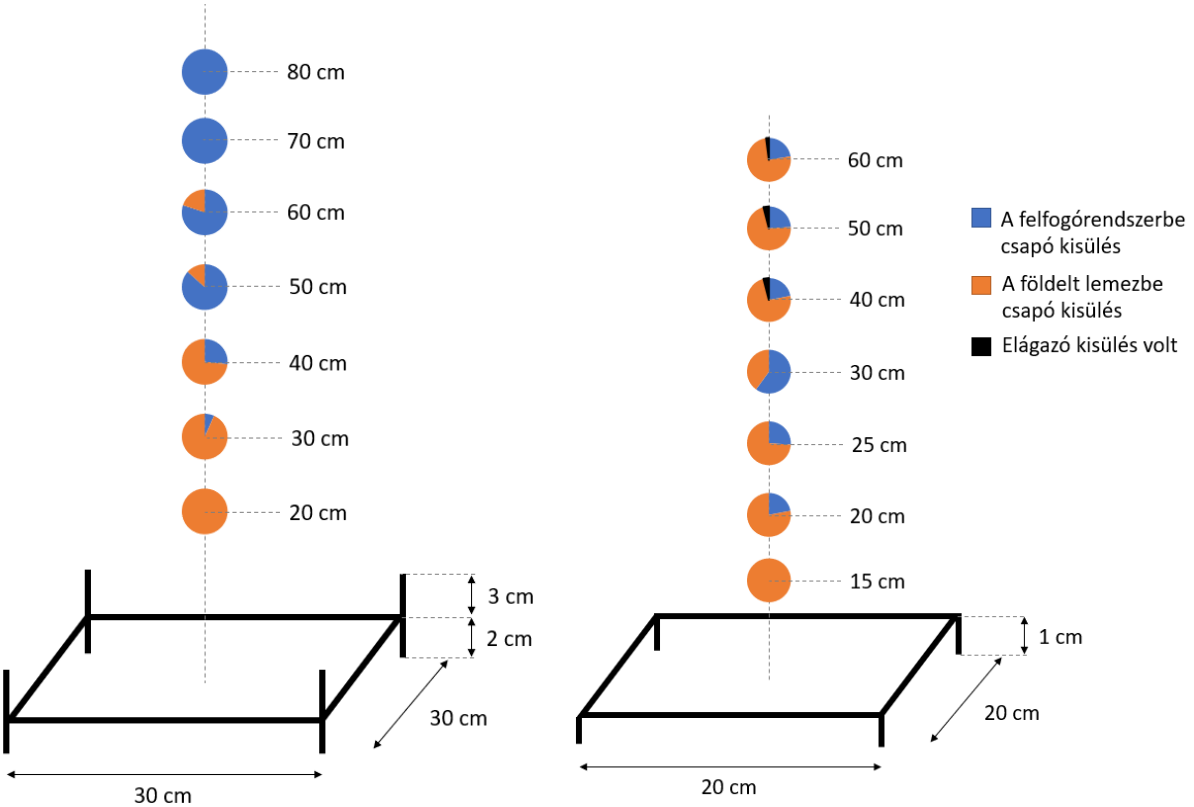
7-2. ábra A 40 m ×40 m-es rácsháló́ra végzett számítások eredményei **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2019; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]**

Érdekes megfigyelni, hogy a vörös és a többi görbe között jelentős különbség mutatkozik. Ennek három fő oka van:

1. Horváth professzor úr **[Horváth, 2012b]** az épület más magasságát vette figyelembe, mint Kern és munkatársai **[Kern et al., 2012]** (10 m helyett 20 m).
2. Különböző sűrűségfüggvényt alkalmaztam **[Horváth, 2012b]** szerint, mint a szabvány **[IEC, 2011]** szerint.
3. A vonzási térnek más a határa **[Horváth, 2012b]** mint **[Kern et al., 2012]**. Ez a különbség nagyobb rácsháló esetén válik szignifikánssá, mert a *b* értékek valós eloszlásának átfedése (nem az egyszerűsített vonzási terek esetén) nem hanyagolható el. Ennek részletesebb elemzése a **[Horváth, 1991]** publikációban található.

A fent említett hatás szemléltetésére laboratóriumi mérést végeztem egy villámvédelmi felfogórendszer segítéségével, amely négy vezetőt tartalmazott egy négyzet oldalain és négy felfogórudat a csúcsain (ld. **7-3. ábra**).

A bemutatott elrendezést egy lapos fémlemezre állítottam. A nagyfeszültségű elektródot úgy helyeztem el, hogy a végpontja a négyzet középpontja fölé kerüljön. Az eredményeket a **7-3. ábra** mutatja. A lemez és a nagyfeszültségű elektród végpontja közötti távolságok a diagramok mellett láthatók.

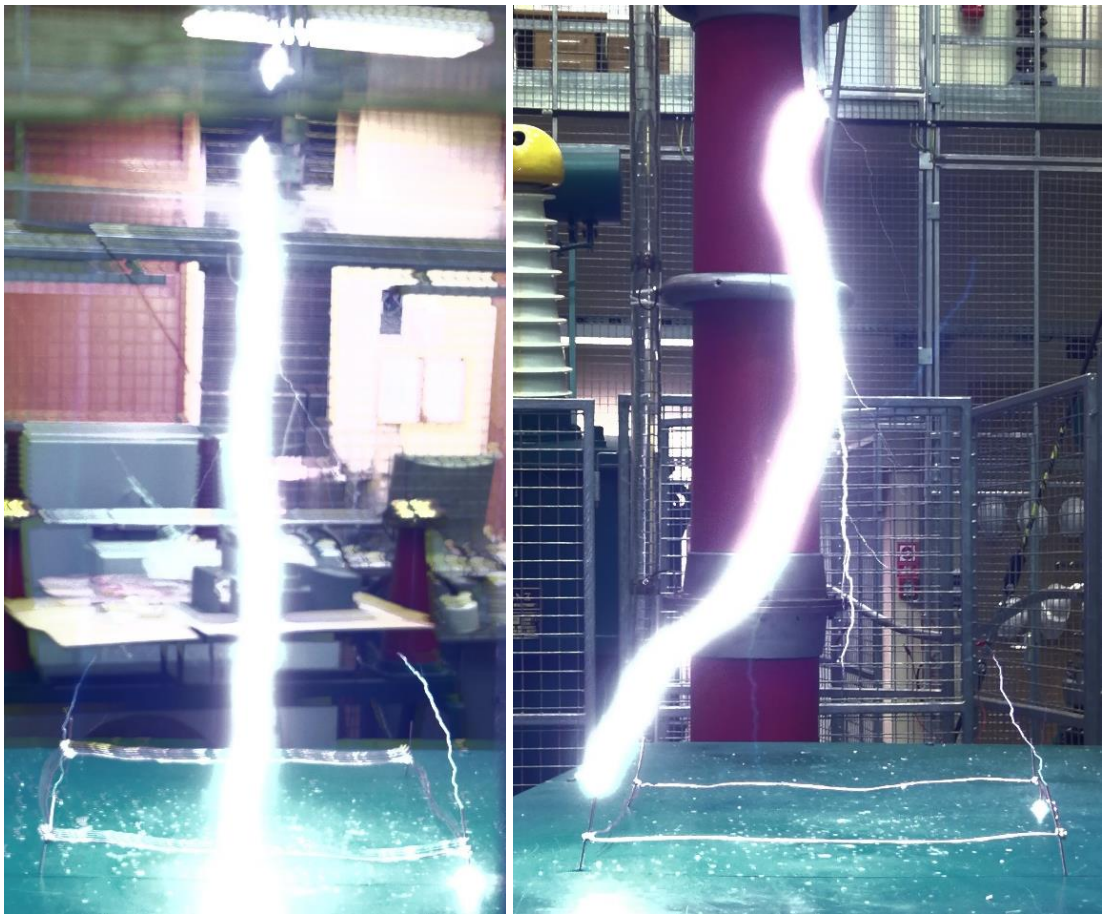


7-3. ábra A rácshálókon végzett laboratóriumi mérések eredményei **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2020; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]**

Az alábbi ábrán (**7-4. ábra**) két fénykép látható a mérésekről. Megfigyelhető, hogy több ellenkisülés alakult ki, illetve még a lefelé meginduló előkisüléseknek is lehetnek elágazásai, de a csatornák találkozása egy orientációs pontban történt.

Ha figyelembe vesszük, hogy melyik távolság rövidebb: a földelt lemez és a nagyfeszültségű elektród közötti, vagy a villámvédelmi felfogó és a nagyfeszültségű elektród közötti távolság (a vonzási tér határa parabola, ha az $\varepsilon = 1$), akkor a $b = 0{,}5$ görbe legmagasabb pontja körülbelül 24,5 cm a bemutatott elrendezésben. A tetőbe csapó villámcsapások aránya még a nagyfeszültségű elektród végpontjának 40 cm magasságában is

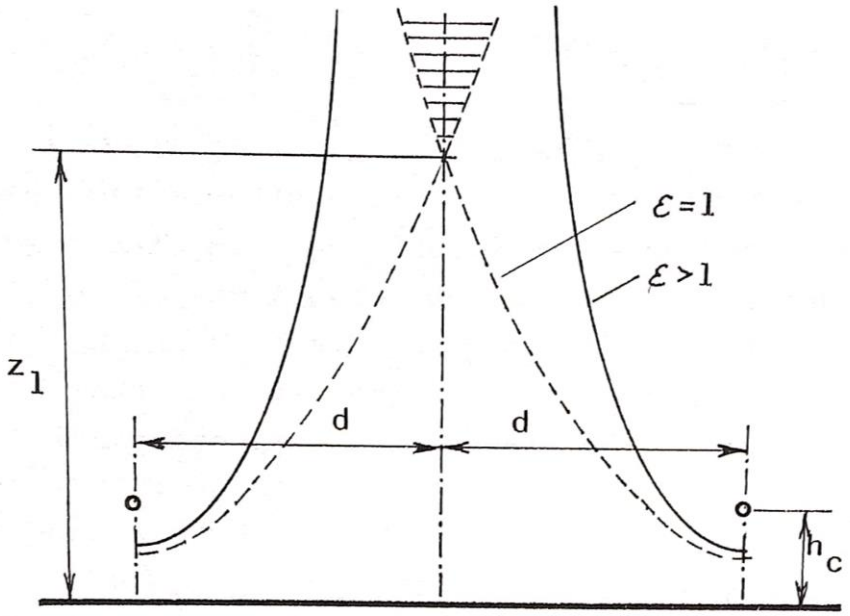
meghaladta az 50%-ot, így a villámvédelmi felfogórendszer vonzási tere kisebb volt, míg a tetőt reprezentáló lemezé magasabb. Ezt a helyzetet a **7-6. ábra** szemlélteti.



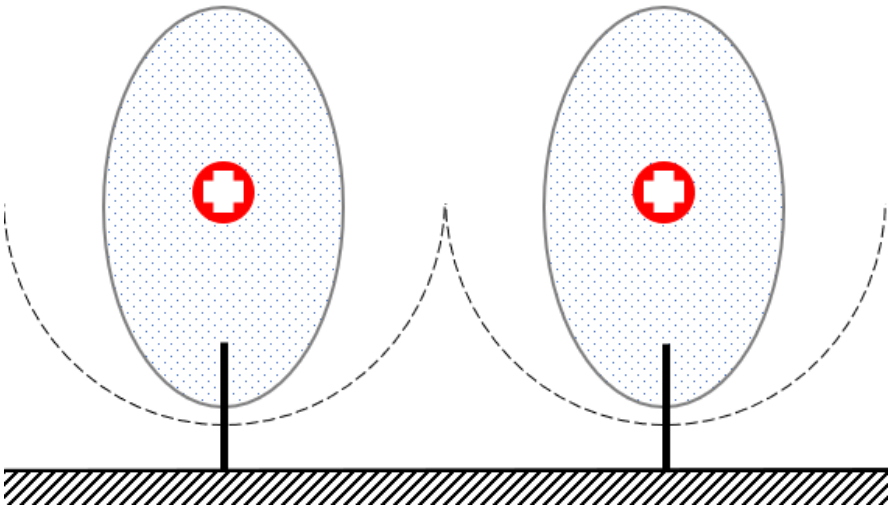
7-4. ábra Néhány érdekes fotó a lefelé meginduló előkisülés csatornáról és a felfelé meginduló ellenkisülésekről **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2020; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]**

Elméletileg egy ellipszis bezárható, de a számításhoz a rövid tengely fölötti szakasza kicserélhető, amint azt a **7-5. ábra** mutatja. Ennek eredményeként a fémlemez lényegesen több kisülést kap, és ez a vörös görbék szignifikánsan magasabb valószínűségi értékeihez vezet (**7-2. ábra**).

A fémlemez műanyag, szigetelő réteggel történő letakarása megnöveli a villámvédelmi felfogórendszerbe csapó kisülések számát. Amint arra Horváth rámutatott, ebben az esetben a nagyfeszültségű elektród végpontjának sokkal alacsonyabban kell lennie ahhoz, hogy kisülést hozzon létre. Ezek a kisülések a szigetelő felület mentén a földelt elektródok talppontjáig futnak. Ezt figyelembe lehet venni az ε paraméter csökkentésével, aminek következtében kevesebb kisülés éri a tetőt.



7-5. ábra A vonzási terek viszonya, ha az 50%-os határvonalak nem metszik egymást **[Horváth, 1991]**



7-6. ábra A vonzási tér határvonalai pozitív polaritás esetén Horváth (folytonos vonal) és Kern (szaggatott vonal) szerint **[Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]**

7.3. Eredmények összegzése

A különböző struktúrákban a várható kisülések száma nem csak a geometriai elrendezéstől függ. Hasznos eszköz a tervezési folyamatban, hogy a villámvédelmi felfogórendszer tervezését geometriai adatokra alapozzuk, de a hatékonyságának meghatározásához további tényezőket is figyelembe kell venni. Ezen tényezők egyike a védendő tárgy anyaga.

A tisztán vezető anyagú tetőszerkezet esetére laboratóriumi kísérleteket végeztem, illetve elkészítettem a vezető anyagú tetőkre alkalmas modelleket. A megalkotott modellek segítségével elvégzett vizsgálatok (számítások és laboratóriumi mérések) eredményei megmutatták, hogy a tisztán szigetelőnek és a tisztán vezetőnek tekintett elrendezés hibás elgondolás, jelentősen eltér a gyakorlati tapasztalatoktól. A tetők anyagát – amennyiben nem tisztán, jó vezető – minden esetben szükséges valamilyen geometriai tényezővel figyelembe venni.

8. fejezet

Tézisek

8.1. Tézis 1

A hatályos nemzetközi szabványok és a bennük lévő ajánlások csak a szélgenerátorlapátok fém szerkezeti elemeivel foglalkoznak (értelmezésük szerint a villámcsapás csak a felfogót fogja érni), de a gyakorlat azt mutatja, hogy a lapátok szigetelő felületei az azokat közvetlenül érő villámcsapásoktól is gyakran megsérülnek.

A vonzási tér vizsgálatával foglalkozó kutatók általános felfogásával szemben kimutattam, hogy a szélgenerátorok villámvédelmének tervezése során nem elegendő csak a szélerőmű lapátjának fémes szerkezeti részeit figyelembe venni.

Igazoltam, hogy a szélerőműlapátoknál felhasznált szigetelő anyagokat is figyelembe kell venni a lapát szerkezetének, és villámvédelmének kialakításakor. Részletesen vizsgálni kell az alkalmazott szigetelőanyagok villamos anyagjellemzőit, és azoknak a környezettől függő változásait.

Tézishez kapcsolódó saját publikációk

Konferenciaelőadások

[Z. Tóth et al., 2016], [Z. Tóth & Kiss, 2017c], [Z. Tóth & Kiss, 2017a], [Z. Tóth, Kiss, et al., 2017]

Konferenciacikkek

[Z. Tóth & Kiss, 2017c], [Z. Tóth & Kiss, 2017a], [Z. Tóth, Kiss, et al., 2017]

Folyóiratcikkek

[Z. Tóth & Kiss, 2017b], [Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]

Következtetéseimet korábbi **[Horváth, 1991; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]** mérések és azok eredményei, továbbá az általam **[Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a; Z. Tóth & Kiss, 2017c]** elvégzett kísérleti mérések eredményei alapján vontam le. Egy adott villámvédelmi felfogórendszer kiépítése során az adott polaritású villámok aránya meghatározó. Ezekből határozható meg, hogy megfelelő védelmi szint eléréséhez milyen sűrűn szükséges a felfogókat a szigetelő lapáton elhelyezni. Ha a nagyarányú pozitív polaritású villámok nagyobb arányban fordulnak elő, megnövekszik annak kockázata, hogy ugyanolyan villámvédelmi felfogórendszer esetében a védelem hatásossága kisebb legyen. A polaritásfüggéssel a gyakorlatban nem foglalkoznak. Ez az adott területen alkalmazható villámvédelmi szabályozások és a gyakorlat eltérését eredményezi. Kísérleteimet a polaritásfüggést figyelembe véve végeztem el az alábbi elrendezésekre:

- egymagában álló felfogó rúdon (**5-1. ábra**) és
- szélerőmű modellen. (**5-6. ábra**)

A kísérleti mérésektől azt vártam, hogy a szigetelőrétegnek valamilyen térdeformációs hatása van. A két vonzási tér közötti eltérés mértékének meghatározásához egy egyszerűsített, a mérések szempontjából megfelelő szélerőmű modellt (**5-6. ábra**) használtam különböző lapátpozíciót beállítva.

A kísérleteimet egymagában álló rúdra is elvégeztem, amely egy önmagában álló, magas objektum vonzási terének meghatározását szolgálta két esetben: szigetelő réteggel és anélkül. Megfigyeltem (**5-4. ábra**, **5-5. ábra**), hogy a vonzási tér a rúd mentén jelentősen csökkent, és a föld tere is eltorzult.

Korábbi méréseket **[Birkl et al., 2018; Garolera et al., 2012; Madsen, 2017; Madsen et al., 2009]** figyelembe véve végeztem méréseimet a szélerőmű modellre. Kétféle szélturbina modellt hoztam létre a laboratóriumi vizsgálatokhoz. A vonzási tér határfelülete a szigetelőanyagot is figyelembe véve jelentősen eltér, ha csak a geometriát vesszük figyelembe villámvédelmi szempontból.

Megfigyelések **[Holboell et al., 2006a; Madsen et al., 2006]** azt mutatják, hogy a negatív polaritású kisülések nagyobb számban érik a felfogó receptorokat, mint a lapát más pontjait, szemben a pozitív polaritású esettel. Emiatt részletesebb kísérlet a pozitív polaritású kisülésekre készítettem. A vonzási tér nagy dP/dr értékű részei a lapát végéhez tartoznak. A laboratóriumi megfigyelések során kapott eredményekhez hasonlatos eredményre jutottam az elméleti számításokkal is. A szigetelő réteg jelenléte csökkenti a vonzási teret.

A **[Kiss et al., 2014]**-ben kapott eredmények jól mutatják, miért a lapátvég közelében jön létre a legtöbb károsodás: itt a legnagyobb annak a valószínűsége, hogy az orientációs pont adott *dV* térfogatelemben található, amely a lapáthoz van közelebb. Ez az eredmény azt is alátámasztja, hogy a nagyméretű szélgenerátorok esetében nem elegendő a lapátvégeken elhelyezett egyetlen receptor. Multireceptoros elrendezést vizsgáltak Madsen és munkatársai **[Garolera et al., 2012]**.

Amennyiben a modell csak vezetőből áll, úgy az **5-9. ábra** vonalakkal jelzett részei lesznek az egyes receptorok vonzási terei, mivel a környező részek is vezetők, így azokhoz is egy-egy hasonló rész fog tartozni. Amennyiben a lapátok szigetelőanyagból készülnek, és az egyes pontok (1, 2, 3 és 4) egy-egy receptort képviselnek, úgy a vonzási tereket az 1-2, 2-x, x-3 és 3-4 részek által elkülönített szaggatott vonallal jelzett rész határolja. Az O pont azt a pontot jelzi, amely egyenlő távolságra van a négy ponttól (1, 2, 3 és 4), de a legközelebbi részek a lapát szigetelő anyagú részei.

Figyelembe véve, hogy a receptorok hossza *dx*, a vonalak *dx* szélességű szakaszokká válnak, de a *dP/dr* értékek integrált értéke az adott térfogat számára még mindig túl alacsony eredményt ad. A vonzási tér módosítása után jobb illeszkedést kaptam a számított és mért (**5-1. táblázat**) eredmények között. Ebben az esetben a szigetelt lapátok felületének vonzási tere csökken, amint az az **5-9. ábra** jobb oldalán látható.

Már a lapát szerkezetének kialakításakor sem elegendő csak a szélerőmű lapátjának fémes szerkezeti részeit figyelembe venni. Szükséges vizsgálni a szélerőműlapátoknál felhasznált szigetelő anyagokat (a szigetelőanyagból készült, vagy szigetelő réteggel borított részeket) is. Ez azt jelenti, hogy a szélerőműveknél a PMAS alkalmazása teszi lehetővé a szigetelő rétegek figyelembevételét már a tervezési fázisában.

8.2. Tézis 2

Valószínűséggel súlyozott vonzási tér elméleten alapuló számítási módszert dolgoztam ki, alacsony magasságú, de nagy alapterületű fotovoltaikus erőművek villámcsapás okozta kockázatának számítására, amely a meglévő, szabványos, esetenként túlzott igényeket előíró módszereknél pontosabb eredményt szolgáltat. Kimutattam, hogy a számítás során nem hanyagolhatók el a fotovoltaikus erőmű területén, vagy annak közvetlen környezetében lévő, a PV asztalokkal összemérhető magasságú objektumok (vagyonvédelmi elemek pl. a kerítés, a kamerákat tartó, és a világítási oszlopok), azokat a primer villámvédelem részének kell tekinteni.

Tézishez kapcsolódó saját publikációk

Konferenciaelőadások
[Z. Tóth, Kiss, et al., 2017], **[Z. Tóth, Kiss, et al., 2020]**
Konferenciacikkek
[Z. Tóth, Kiss, et al., 2017], **[Z. Tóth, Kiss, et al., 2020]**
Folyóiratcikkek
[Z. Tóth et al., 2018], **[Zoltán Tóth et al., 2021]**

A fotovoltaikus erőművek részaránya évről-évre közel exponenciálisan növekszik. Ez megköveteli a fokozott üzembiztonságot. Csak így biztosítható, hogy miközben a villamosenergia-piacban a PV erőművek részaránya növekszik, a villamosenergia-ellátás biztonsága is növekedjen. A biztonságos üzemelés egyik meghatározó feltétele a fotovoltaikus erőművek korszerű és gazdaságos villámvédelme. A fotovoltaikus erőművek esetében, ellenben a szélerőművekkel, a klasszikus villámvédelmi tervezőmetódusok alkalmazhatóak. A hatékony villámvédelem célja, hogy miközben a keletkező károk mértékét csökkentjük, ne növekedjenek drasztikusan a költségek, hiszen a műszaki és gazdasági szempontból egyaránt optimális villámvédelem nem gátolja, hanem segíti a PV erőművek gyors elterjedését.

A nemzetközi szakirodalomban az elmúlt években többször találkozhattunk azzal a felvetéssel, hogy gazdasági szempontok alapján elhagyható-e a villámvédelem. **[Christodoulou et al., 2016; Hannig et al., 2014; Rousseau et al., 2004]** Ebben a témában

saját publikáció, és könyvrészlet (folyóiratcikk) is megjelent. **[Z. Tóth et al., 2018; Z. Tóth & Kiss, 2017b]**.

A problémakört több irányból közelíthetjük meg:

A) mekkora valószínűséggel következik be kár, és annak milyen hatásai lehetnek; **[Z. Tóth et al., 2018; Z. Tóth & Kiss, 2017b]**
B) szabványossági szempontból megfelel-e a megoldás (ha nem, akkor nem a szabványt kell-e felülvizsgálni); **[Rousseau et al., 2012]**
C) elemezni kell a szekunder hatásokat, és az azok által okozott károkat. **[Charalambous et al., 2014; Salinas et al., 2018; Zaini et al., 2016]**

Kutató munkám során az első két szempontot kiemelten vettem figyelembe. Vizsgálataimban első lépésként a várható kockázatot állapítottam meg a PMAS módszer alkalmazásával.

A fotovoltaikus erőművek a hagyományos épületekhez, és más épített objektumokhoz képest speciális elrendezésként értelmezhetők. Egyrészt viszonylag alacsony építményekről beszélhetünk, másrészt az erőmű alapterülete rendkívül nagy lehet. (A beépített teljesítménnyel arányosan az elfoglalt alapterület növekszik.) Speciális a PV erőmű elrendezése abból a szempontból is, hogy sorozatosan ismétlődő, hasonló egységekből épül fel, és az erőmű szélei vannak kitéve leginkább a villámcsapások okozta megnövekedett kockázatnak.

Jelenleg mind az első, mind pedig az időszakos villámvédelmi felülvizsgálatok során a telepített villámvédelmi felfogók rendszerét vizsgálják, és nem veszik figyelembe az erőmű területén, illetve annak közvetlen környezetben megtalálható, a védendő PV asztalokkal összemérhető magasságú minden egyes objektumot. A PMAS elméleten alapuló számításokkal igazoltam, hogy a vagyonvédelmi kerítést, és a további vagyonvédelmi elemeket primer villámvédelmi felfogóként kell figyelembe venni. Ezáltal a teljes fotovoltaikus erőműre a villámcsapások okozta kockázati szint csökkenthető.

A PMAS számítást az adott, szabályos, ismétlődő elemekből álló napelemes rendszerekre elvégezve egyfajta trendet lehet kiolvasni. A szabványban megtalálható áramértékek, mint határértékek esetében élni kell egyfajta határértékkel, ami alatt/felett nem tekintjük az adott osztályba sorolandónak a részértéket. Ezt a legegyszerűbb akár az előfordulási gyakorisághoz kötni a 6-14 egyenlet szerint.

A következőkben (**6-6. ábra**) a blokkméreteket változtatva az egyes villámáramcsúcsok eloszlásának függvényében ábrázoltam a vagyonvédelmi kerítés nélküli esethez képest a PV parkba csapó villámok számát a kerítéssel végzett számításokhoz arányosítva, százalékos alakban. Az így kapott értékekből megállapítom, hogy a nagyobb PV parkoknál a kisebb villámáramok esetén (I_p < 50 kA) a változás mértéke -30% és -40% közötti, míg I_p < 100 kA esetén is -10% és -15% között mozog, I_p < 150 kA esetén pedig -5% és -8% közötti.

A **6-7. ábra** a korábbi számításoknak azt az elméleti határértékét ábrázolja, amely megadja, hogy mekkora a védőhatása mindazon rendszereknek/objektumoknak, amelyek nem a PV erőmű közvetlen részei, hanem pl. a vagyonvédelemhez tartoznak.

Számítással igazoltam, hogy a gyakorlatban is felhasználható akár a szabványba beültetve a PMAS módszer speciális alkalmazása révén meghatározott villámvédelmi szinteknek megfelelően egy általános, a PV erőművekre vonatkozó rész. A számításoknak és esetvizsgálatok eredménye, hogy a villámvédelmi szint az LPL III esetében egy osztályt csökkenthető LPL IV-re.

Bizonyos esetekben a primer védelem nem szükséges egy adott mérettartomány alatt, ezért a PMAS-számítást ezekben az esetekben minden esetben el kell végezni a vagyonvédelmi objektumok vonzási terének meghatározása céljából, illetve abban az esetben, ha a PV erőmű mérete elég nagy ahhoz, hogy szükségessé váljon. Ebben az esetben ugyanazt az eljárást kell alkalmazni, mint a villámvédelmi felfogórudak esetében is.

8.3. Tézis 3

A hatályos nemzetközi szabvány korlátozást ad a villámvédelmi felfogó háló magasságára abban az esetben, ha az épületek teteje gyúlékony anyagú. Ezzel szemben sem a szabványban, sem a nemzetközi szakirodalomban nincsen megszorítás a felfogó háló magasságára vonatkozóan akkor, ha az épület teteje nem gyúlékony anyagból készül.

Laboratóriumi mérésekkel és szimulációkkal kimutattam, hogy a felfogó hálók kialakítása során a kockázatszámítás elvégzésekor a tető anyaga nem hanyagolható el, még abban az esetben sem, ha az nem tűzveszélyes (nem könnyen gyúlékony) anyagú.

Kimutattam, hogy a felfogó hálóknak az RSM (gördülő gömb módszer) alapján való méretezése szigetelő, nem gyúlékony tetőknél helytelen eredményre vezet. Szigetelő anyagú tetőkre megállapítottam és bizonyítottam, hogy a felfogó hálók kockázatának számítását a gördülőgömb szerkesztési módszer alkalmazása helyett a valószínűséggel súlyozott vonzási tér elmélet szerint kell elvégezni.

Tézishez kapcsolódó saját publikációk

Konferenciaelőadások

[Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a], **[Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]**, **[Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019b]**, **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2019]**

Konferenciacikkek

[Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]

Folyóiratcikkek

[Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a], **[Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019b]**, **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2019]**

A villámvédelemben a rácshálós módszer főleg a lapostetős szerkezeteknél terjedt el. Korábban abból a feltételezésből indultak ki, hogy a rácsháló egy Faraday-kalitkaszerű elrendezést alkotva védi a védendő objektumot. A rácshálót a gördülő gömb módszer (RSM) segítségével vizsgálva érdekes következtetésre juthatunk. A vezető anyagból készült tetőszerkezetet be kell kötni az egyenpotenciálú hálózatba (EPH), így a tető a villámvédelmi rendszer szerves részét fogja alkotni. Szigetelő anyagból készült tetőszerkezet esetén más helyzet alakul ki attól függően, hogy a tető gyúlékony anyagból készült-e, vagy sem. A korábbi magyar szabvány (MSZ 274 **[Magyar Szabványügyi Testület, 1981]**) meghatározta a

rácsháló magasságát annak anyagától függően. Ezzel szemben a nálunk is bevezetett nemzetközi szabvány **[IEC, 2011]** , bár nem tesz különbséget határozottan gyúlékony és nem gyúlékony tetőanyag között, de – a villámcsapás hatására megolvadó fémolvadék lehűlésének idejétől függően – meghatározza a villámvédelmi felfogóháló magasságát.

A villámvédelmi rácsházlót közvetlenül a tetőre is felhelyezhetjük, amennyiben annak anyaga nem gyúlékony. A rácsháló szigetelt vagy szigeteletlen tartószerkezetre is kerülhet. Ezekben az esetekben a rácsháló vonzási terének keresztmetszete egy pont-vonal elrendezés vonzási terét adná. Ezen elrendezés esetén előfordulhat, hogy az adott rács közepén a tetőbe csapó villámok valószínűsége lesz a nagyobb. Ez azt jelenti, hogy a tetőbe csapó villámok száma arányaiban nagyobbak lesznek. A tapasztalatok viszont nem ezt mutatják. Az utóbbi 100 évben a villámvédelmi felfogóhálók jól működtek.

A fenti ábrán (**7-2. ábra)** a kék, folytonos görbe Kern és munkatársainak **[Kern et al., 2012]** eredményei alapján; a piros, szaggatott görbék Horváth professzor úr számításai **[Horváth, 2012b]** alapján. A fekete, pontozott görbe értékei a saját számítás eredménye. Saját eredményeimet összehasonlítottam a korábbi vizsgálatok **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2019; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]** eredményeivel. A kérdés ezeknél a számításoknál, hogy mikor ad elegendő pontosságot a dinamikus elektro-geometriai modell (DEGM), és mikor kell a valószínűséggel súlyozott vonzási tér elméletet (PMAS) használni, annak érdekében, hogy a hiba minimális legyen. Az ábrán (**7-2. ábra**) piros és a többi görbe között jelentős különbség mutatkozik. Ennek három fő oka van:

1. Horváth professzor úr **[Horváth, 2012b]** az épület más magasságát vette figyelembe, mint Kern és munkatársai **[Kern et al., 2012]** (10 m helyett 20 m).
2. Különböző sűrűségfüggvényt alkalmaztam **[Horváth, 2012b]**, mint a szabvány **[IEC, 2011]**.
3. A vonzási térnek más a határa **[Horváth, 2012b]** mint **[Kern et al., 2012]** szerint. Ez a különbség nagyobb rácsháló esetén válik szignifikánssá, mert a *b* értékek valós eloszlásának átfedése (nem az egyszerűsített vonzási terek esetén) nem hanyagolható el. Ennek részletesebb elemzése a **[Horváth, 1991]** publikációban található.

A fent említett hatás szemléltetésére laboratóriumi mérést végeztem egy villámvédelmi felfogórendszer segítéségével, amely négy vezetőt tartalmazott egy négyzet oldalain (ld. **7-3. ábra jobb**), és másik esetben négy felfogórudat a csúcsain (ld. **7-3. ábra bal**).

A különböző struktúrákban a várható kisülések száma nem csak a geometriai elrendezéstől függ. A tervezési folyamatban hasznos, ha a villámvédelmi felfogórendszer tervezését geometriai adatokra alapozzuk, de a hatékonyság meghatározásához további tényezőket is figyelembe kell venni. Ezen tényezők egyike a védendő tárgy anyaga.

A tisztán vezető anyagú tetőszerkezet esetére laboratóriumi kísérleteket végeztem. Az elvégzett modellillesztés szemléletessé tett, hogy a tisztán szigetelőnek és a tisztán vezetőnek tekintett elrendezés hibás elgondolás, amely így jelentősen eltér a gyakorlati tapasztalatoktól. A tetők anyagát – amennyiben nem tisztán jó vezető – minden esetben szükséges valamilyen geometriai tényezővel figyelembe venni.

Köszönetnyilvánítás

Doktori disszertációm végén szeretném megköszönni mindazoknak a segítségét, akik segítették doktori tanulmányaimat, és dolgozatom elkészültét.

Mindenekelőtt köszönöm segítségét témavezetőmnek, Dr. Kiss István habilitált egyetemi docensnek, hogy doktori jogviszonyom alatt kutatási témámat vezette, segítette és felügyelte.

Disszertációm megírásához elengedhetetlen volt a BME Nagyfeszültségű Laboratóriumának eszközparkját használnom, amelyet Dr. Németh Bálint egyetemi docens, laborvezető a kutatásaimhoz rendelkezésemre bocsátotta. Köszönöm számára csoportvezetőként nyújtott támogatását doktoranduszi éveim alatt.

Köszönetemet fejezem ki Prof. Dr. Berta István professzor emeritusznak, a BME Nagyfeszültségű Technika és Berendezések korábbi csoportvezetőjének, aki mindig nyitott ajtókkal várt bármilyen témáról is volt szó, és aki disszertációm megírásában is töretlenül segített.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni a fent fel nem sorolt kollégáimnak, oktatóimnak és mindazoknak, akik segítettek tanulmányaimban és doktori disszertációm megírásában.

Ábrák jegyzéke

1-1. ábra Gördülő gömb módszer (RSM) alkalmazása a szabvány szerinti értelmezésben (ld. még a 3. fejezetben) **[Horváth, 2008; IEC, 2011]** 9

1-2. ábra A polaritásfüggés jelentőségének bemutatása egy csúcs-sík elektród elrendezés segítségével **[Horváth, 1960]** 10

2-1. ábra A védőszög (bal) **[IEC, 2011]** és a rácsháló (jobb) **[Franklin-France, 2019]** módszer 12

2-2. ábra Kisülés a referencia elektródba, ahol a sík elektród negatív polaritású **[Madsen et al., 2009]** 14

2-3. ábra A szélerőmű lapát irányából meginduló kisülés vizsgálatára létrehozott elrendezés **[Holboell et al., 2006b]** 15

2-4. ábra **Bal:** A magyar VER megújuló energiaforrásból származó kapacitása MW-ban éves bontásban **[IRENA, 2017, 2020]** **Jobb:** A magyar VER fotovoltaikus kapacitása MW-ban éves bontásban **[IRENA, 2017, 2020]** 16

3-1. ábra A rácshálós módszer (MM) kombinálása a gördülő gömb módszerrel (RSM) a gördülő gömb belemetsz a tetőbe 18

3-2. ábra Az egyes zónák átlapolódása, ha a vonzási tér 50%-os határfelületei nem érintkeznek egymással. **[Horváth, 1991]** 19

3-3. ábra Az 1960-as Horváth kísérlet **[Horváth, 1960]** 20

4-1. ábra **Bal:** Felfele meginduló előkisülésből kialakuló főkisülés az Agua vulkán tetején, Guatemalában **[Barrundia, 2019]** és **Jobb:** a Párizsi Eiffel-toronyból kiindulva **[Atek, 2009]** 21

4-2. ábra **Bal:** Mérési elrendezés I (sík–sík felfogóval és az előkisülést reprezentáló elektróddal); **Jobb:** Az elrendezés numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** 23

4-3. ábra **Bal:** Az elrendezés (II A) numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában); **Jobb:** A megfigyelés a mérés közben: kisülés a Rogowski elektród széléhez közel **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** 23

4-4. ábra Az elrendezés (II B) numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** 24

4-5. ábra **Bal:** a megkövetelt mérési elrendezés (III) magas épületek szimulálásához; **[Kiss et al., 2014] Jobb:** Az elrendezés numerikus szimulációja (E és U az impulzus csúcsának pillanatában) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** 25

4-6. ábra **Bal:** Az orientációs pont 3 különböző pozícióban, amikor az impulzusfeszültség túl nagy az optimálishoz képest **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a] Jobb:** Az átütési feszültség az idő függvényében az egyes esetekben (**[Horváth, 1991]** alapján)..... 26

5-1. ábra A mérési elrendezés sematikus ábrája egymagában álló (**bal**) szigetelt és (**jobb**) szigeteletlen felfogórúd esetében **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a; Z. Tóth & Kiss, 2017b, 2017c]** 29

5-2. ábra Az elrendezés koordinátái **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**..... 30

5-3. ábra A kisülések előfordulási gyakoriságai adott orientációs pontból szigetelőréteg nélküli esetben (pozitív polaritás) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** 30

5-4. ábra A kisülések előfordulási gyakoriságai adott orientációs pontból szigetelőréteges esetben (pozitív polaritás) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**..... 31

5-5. ábra A kisülések előfordulási gyakoriságai adott orientációs pontból szigetelőréteges esetben (negatív polaritás) **[Z. Tóth et al., 2016; Z. Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]**..... 31

5-6. ábra A szélgenerátor modell mérési elrendezésének sematikus ábrája. Szigetelés nélküli (A, B, C); és szigetelt elrendezés (D) esetek **[Z. Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]**..... 32

5-7. ábra A mérési elrendezés sematikus ábrája a szélgenerátor modellre **[Z. Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]**..... 33

5-8. ábra Egyszerűsített modell a probléma bemutatására; a vonzási tér síkmetszete **[Kiss et al., 2014]** 33

5-9. ábra A szélerőmű lapátjainak vonzási terének határai (**bal**) csak vezető lapátot feltételezve, illetve (**jobb**) szigetelő réteggel **[Z. Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]** 34

5-10. ábra A vonzási tér **[Horváth, 1991]** 35

6-1. ábra Egy PV park általános felépítése és részei a kiszolgáló és a vezérlő egységek nélkül **[Zoltán Tóth et al., 2021]** 38
6-2. ábra A vagyonvédelmi kerítés hatása a vonzási térre azonos kerítés és PV asztal magasság esetén (a PMAS 50%-os burkológörbéjének grafikus megjelenítése $\varepsilon = 1$ esetre) **[Zoltán Tóth et al., 2021]** 44
6-3. ábra A vagyonvédelmi kerítés hatása a vonzási térre nem azonos kerítés és PV asztal magasság esetén (a PMAS 50%-os burkológörbéjének grafikus megjelenítése $\varepsilon = 1$ esetre) **[Zoltán Tóth et al., 2021]** 44
6-4. ábra A PMAS számítás eredményei egy képzeletbeli 8×12 asztalból álló PV park esetén **[Z. Tóth, Kiss, et al., 2020]** 45
6-5. ábra A PMAS számítás eredményei egy képzeletbeli 8×12 db asztalból álló PV parkra; a kerítés által okozott kockázatcsökkenés százalékos értéke **[Z. Tóth, Kiss, et al., 2020]** 46
6-6. ábra A PMAS számítás eredményeinek különbsége %-ban (a PV panelba csapás csökkenése) különböző méretű PV parkokra a villámáram csúcsértékének függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]** 48
6-7. ábra A PMAS számítás eredményeinek, különbségének határértéke **[Zoltán Tóth et al., 2021]** 48
6-8. ábra A PMAS számítás eredményei és a két eset különbségei %-ban egy 8×12 asztalból felépülő PV parkra a villámáram csúcsértékének függvényében, jelölve a villámvédelmi szinteket **[Zoltán Tóth et al., 2021]** 50
7-1. ábra A rácshálós módszer kombinálása a gördülő gömb módszerrel, keresztmetszeti nézet 53
7-2. ábra A 40 m ×40 m-es rácshálóra végzett számítások eredményei **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2019; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]** 55
7-3. ábra A rácshálókon végzett laboratóriumi mérések eredményei **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2020; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]** 56
7-4. ábra Néhány érdekes fotó a lefelé meginduló előkisülés csatornáról és a felfelé meginduló ellenkisülésekről **[Z. Tóth, Kálecz, et al., 2020; Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]** 57
7-5. ábra A vonzási terek viszonya, ha az 50%-os határvonalak nem metszik egymást **[Horváth, 1991]** 58
7-6. ábra A vonzási tér határvonalai pozitív polaritás esetén Horváth (folytonos vonal) és Kern (szaggatott vonal) szerint **[Z. Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]** 58

F-1. ábra Frontzivatarok, amikor egy hidegfront utolér egy melegfrontot **[Horváth, 2014]** F-3
F-2. ábra Hőzivatar és domborzati zivatar **[Horváth, 2014]**..... F-3
F-3. ábra A Lenard-Simpson elmélet **[Horváth, 2014]** F-4
F-4. ábra A felhőzetben a Lenard-Simpson modellnek megfelelő töltés-szétválasztódás **[Horváth, 2014]**..... F-4
F-5. ábra Mason-Latham elmélet **[Horváth, 2014]**..... F-5
F-6. ábra A töltések eloszlása a zivatarfelhőben **[Horváth, 2014]** F-6
F-7. ábra Zivatarfelhő 11 km-es magasságból **[Borja, 2018]** F-6
F-8. ábra Részkisülések kialakulása az ionoszféra és a föld közötti villamos erőtér miatt fellépő villamos megosztás hatására **[Horváth, 2014]** F-7
F-9. ábra A részkisülések kezdődő kisüléssé, előkisüléssé fejlődése **[Horváth, 2014]** F-7
F-10. ábra Az előkisülés és az ellenkisülés fejlődése**[Horváth, 2014]**..... F-8
F-11. ábra A villám főkisülése, és az elágazó becsapás **[Horváth, 2014]** F-8
F-12. ábra A többszörös villámok aránya (>2) az egyszeres villámokhoz képest (=1) százalékos értékében **[Horváth, 2014; Rakov et al., 2013]** F-9
F-13. ábra Boys-féle felvétel a villámcsatorna fejlődéséről **[Horváth, 2014]**..... F-9
F-14. ábra Boys-féle kép a Monte San Salvatore villámfigyelő állomás 1953-as felvételén, 1953 **[Horváth, 2014]**..... F-10
F-15. ábra Felfele meginduló előkisülés fejlődése főkisüléssé **[Horváth, 2014]** F-11
F-16. ábra A felfele meginduló villámok aránya a magasság függvényében **[Horváth, 2014]** F-11
F-17. ábra A (1) negatív első, a (2) negatív gerely- és a (3) pozitív kisülés csúcsáramának eloszlása **[IEC, 2011]**..... F-13
F-18. ábra A villámsűrűség Magyarországon (villám/km^2/év) **[Belügyminisztérium, 2020]**..... 14
F-19. ábra A vonzási szög nagyfeszültségű távvezetékre **[Horváth, 1991]** F-16
F-20. ábra A vonzási tér **[Horváth, 1991]** alapján..... F-17
F-21. ábra A vonzási tér **[Horváth, 1991]** F-18
F-22. ábra A vonzási tér határfelülete a különböző polaritású villámok esetén..... F-20
F-23. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra nézve. Az egyenértékű terület a villámáram csúcsértékének előfordulásának függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]** F-21

F-24. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra az egyenértékű terület normált értéke a villámáram csúcsértékének függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]** F-22

F-25. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra az egyenértékű terület a blokkok számának függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]**..... F-23

F-26. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra az egyenértékű terület normált értéke a blokkok függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]** F-24

F-27. ábra Az IEC szabvány folyamatábrája a megfelelő védelmi szint kiválasztásához **[IEC, 2011]** F-27

Táblázatok jegyzéke

2-1. táblázat A gördülő gömb sugarának és a rácsháló méretének maximális értékei az egyes villámvédelmi szintek (LPL) szerint **[IEC, 2011]** 13

4-1. táblázat A labortóriumi mérések eredménye az egyes elrendezésekre **[Tóth et al., 2016; Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** 25

5-1. táblázat A laboratóriumi mérés eredményei a kétreceptoros szélerőmű modellre **[Tóth et al., 2016; Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]** 35

6-1. táblázat A villámáramok az egyes LPL-nek megfelelően az IEC 62305-1 Table 3 és Table 4 alapján **[IEC, 2011]** 50

F-1. táblázat A villámáram jellemző értékeinek előfordulási gyakorisága **[Horváth, 1991; IEC, 2011; Rakov et al., 2013]** F-12

F-2. táblázat A villámáram és a fajlagos energiasűrűség szórása és középértéke a kisülés fajtájától függően **[Horváth, 1991; IEC, 2011; Rakov et al., 2013]** F-13

F-3. táblázat A P_{SPD} valószínűség értéke az LPL függvényében, amelyre az SPD-ket tervezték (IEC 62305 - Table B.3 alapján) **[IEC, 2011]** F-25

F-4. táblázat A C_{LD} tényezők értékei az árnyékolás, a földelés és az elszigetelés körülményeitől függően (IEC 62305 - Table B.4 alapján) **[IEC, 2011]**..... F-25

F-5. táblázat A P_B valószínűségi érték, amely függ a fizikai károk csökkentését szolgáló védelmi intézkedésektől (IEC 62305 - Table B.2 alapján) **[IEC, 2011]** F-26

Irodalomjegyzék

Adekitan, A. I., & Rock, M. (2020). The impact of space point definition on dynamic electro-geometrical model of lightning strike probability. *Electric Power Systems Research*, *184*(August 2019), 106336. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106336

Arevalo, L., & Cooray, V. (2016). The Mesh Method in Lightning Protection Analyzed from a Lightning Attachment Model. *33th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.

Atek, H. (2009). *Upward Lightning from The Eiffel Tower*. http://meteorologistblog.blogspot.com/2009/05/did-lightning-really-hit-eiffel-tower.html

Barrundia, A. (2019). *Upward lightning in Guatemala*. Upward Lightning on Guatemala Mountain Captured in Striking Video. https://www.independent.ie/world-news/and-finally/upward-lightning-on-guatemala-mountain-captured-in-striking-video-38377871.html

Bartholy, J., Pongracz, R., Torma, C., Pieczka, I., Kardos, P., & Hunyady, A. (2009). Analysis of regional climate change modelling experiments for the Carpathian Basin. *International Journal of Global Warming*, *1*(1/2/3), 238. https://doi.org/10.1504/IJGW.2009.027092

Becerra, M., & Cooray, V. (2005). A simplified model to represent the inception of upward leaders from grounded structures under the influence of lightning stepped leaders. *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*.

Becerra, M., & Cooray, V. (2006). A Simplified Physical Model to Determine the Lightning Upward Connecting Leader Inception. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *21*(2), 897–908. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.859290

Becerra, M., Cooray, V., & Abidin, H. Z. (2005). Location of the vulnerable points to be struck by lightning in complex structures. *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*.

Belügyminisztérium, O. K. F. (2020). *Tűzvédelmi Műszaki Irányelv. Villamos berendezések, villámvédelem és elektrosztatikus feltöltődés elleni védelem* (TcMI 7.4:2020.01.22.).

Berger, K. (1955). Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947 …1954 auf dem Monte San Savatore, Bull. *Schweizeriches Elektrotechnischen Vereins*, *46*, 405–424.

Beroual, A., Rakotonandrasana, J., & Fofana, I. (2010). Predictive dynamic model of the negative lightning discharge based on similarity with long laboratory sparks ☍ Part 2: validation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *17*(5), 1562–1568. https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5595558

Birkl, J., Plumer, J. A., Madsen, S. F., & Montanya, J. (2018). Lightning Protection of Wind Turbines. *34th International Conference on Lightning Protection*, 0–5.

Borja, S. (2018). *Santiago Borja's Webpage - Cumulonimbus from an Airplane*. https://www.santiagoborja.com/

Browning, K. A., & Mason, B. J. (1963). Production of ice crystals and electric charge by splintering of freezing droplets in thunderclouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *89*(379), 139–144. https://doi.org/10.1002/qj.49708937911

Charalambous, C. A., Kokkinos, N., Christofides, N., Ab Kadir, M. Z. A., & Gomes, C. (2014). A simulation tool to assess the lightning induced over-voltages on dc cables of photovoltaic installations. *32nd International Conference on Lightning Protection*, 1571–1576. https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973380

Christodoulou, C. A., Ekonomou, L., Gonos, I. F., & Papanikolaou, N. P. (2016). Lightning protection of PV systems. *Energy Systems*, *7*(3), 469–482. https://doi.org/10.1007/s12667-015-0176-2

CIGRE WG C4.407. (2013). *Lightning parameters for engineering applications (TB 549)*.

Cooray, V., Fernando, M., Arevalo, L., & Becerra, M. (2010). Interaction of multiple connecting leaders issued from a grounded structure simulated using a self consistent leader inception and propagation model (slim). *30th International Conference on Lightning Protection*, 1–5. https://doi.org/10.1109/ICLP.2010.7845803

Cooray, V., Rakov, V., & Theethayi, N. (2004). The relationship between the leader charge and the return stroke current – Berger's data revisited. *27th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, *5*, 1–6.

Cotton, I., Sorensen, T. S., Plumer, J. A., Montanyà, J., Krogh, T. H., Hermoso, B., Birkl, J., Gehlhaar, T., McNiff, B., Bertelsen, K., Peesapati, V., & Montany, Ã. J. (2008). The update of IEC 61400-24 lightning protection of wind turbines. *29th International Conference on Lightning Protection of Wind Turbines*.

Csernátony-Hoffer, A. (1961). Nagy elektródközök átütése laboratóriumban. *Elektrotechnika*, *54*, 455–467.

Dehn+Söhne, G. (2017). *Blitzplaner* (4th ed.).

Diaz, O., Cooray, V., & Arevalo, L. (2014). Sensitivity analysis of leader channel models used in long air gap positive discharge modelling. *32nd International Conference on Lightning Protection*, 564–567. https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973188

Erichsen, K., Bertelsen, H. V., Skov Jensen, M. V. R., & Madsen, S. F. (2007). Application of Numerical Models to Determine Lightning Attachment Points on Wind Turbines. *International Conference on Lightning and Static Electricity, ICOLSE 2007*.

Franklin-France. (2019). *Meshed Cage*. https://franklin-france.com/en/foudre/meshed-cage/

Franklin, B. (1750). *Franklin's letter to Peter Collinson*. https://www.fi.edu/history-resources/franklins-lightning-rod

Garolera, A. C., Holboell, J., & Madsen, S. F. (2012). Lightning attachment to wind turbine surfaces affected by internal blade conditions. *31st International Conference on Lightning Protection*, 7. https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344374

Garolera, A. C., Madsen, S. F., Nissim, M., Myers, J. D., & Holboell, J. (2016). Lightning Damage to Wind Turbine Blades From Wind Farms in the U.S. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *31*(3), 1043–1049. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2370682

Golde, R. H. (1973). *Lightning Protection* (1st ed.). Edward Arnold(Publishers) Ltd.

Hannig, M., Hinrichsen, V., Hannig, R., & Brocke, R. (2014). An analytical consideration on the striking probability and the total amount of strikes to simple structures according to standardized regulations. *32nd International Conference on Lightning Protection*, 1151–1158. https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973339

Heidler, F., Zischank, W., Flisowski, Z., Bouquegneau, C., & Mazzetti, C. (2008). Parameters of lightning current given in iec 62305 – background , experience and outlook. *29th International Conference on Lightning Protection*, *June*, 1–22.

Holboell, J., Madsen, S. F., Henriksen, M., Bertelsen, K., & Erichsen, H. V. (2006a). Discharge Phenomena in The Tip Area of Wind Turbine Blades and Their Dependency on Material and Environmental Parameters. *Lightning Protection (ICLP), 2006 International Conference On*, 1503–1508.

Holboell, J., Madsen, S. F., Henriksen, M., Bertelsen, K., & Erichsen, H. V. (2006b). Discharge phenomena in the tip area of wind turbine blades and their dependency on material and environmental parameters . *28th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1503–1508.

Horváth, T. (1960). *Villámhárítók védőhatásának vizsgálata kismintán (Investigation of the protective effect of lightning rods on a small sample)*.

Horváth, T. (1963). Eine neue Methode zur theoretischen Ermittlung der Wahrscheinlichkeit von Blitzeinschlag sowie des Schutzeffektes. *7. Internationale Blitzschutzkonferenz*.

Horváth, T. (1965). *Villámvédelem*. Műszaki Könyvkiadó.

Horváth, T. (1973). Die Pflichtigkeit Blitzableiter zu bauen nach den ungarischen Vorschriften. *12. Internationale Blitzschutzkonferenz*.

Horváth, T. (1974). A villámhárító - Valóság és Tévhitek. *Élet És Tudomány*, *29*(26).

Horváth, T. (1989). Computation of the lightning stroke probability and the effectiveness of the air termination. *Journal of Electrostatics*, *23*, 305–322. https://doi.org/10.1016/0304-3886(89)90058-2

Horváth, T. (1991). Computation of lightning protection. In *Cargese Lectures in Physics*. John Wiley & Sons Inc.

Horváth, T. (1997). *Villámvédelem*. Magyar Elektrotechnikai Egyesület.

Horváth, T. (1999). A new method for design of the air termination system of high voltage open air stations. *International Conference on Electric Power Engineering, PowerTech Budapest 1999, September*, 237. https://doi.org/10.1109/PTC.1999.826669

Horváth, T. (2008). False Application of the Rolling Sphere Method. *29th International Conference on Lightning Protection, June*, 10.3.1-10.3.9.

Horváth, T. (2014). *Understanding Lightning and Lightning Protection: A Multimedia Teaching Guide*. John Wiley & Sons, Ltd. http://doi.wiley.com/10.1002/9780470030875.ch21

Horváth, T. (2012a). Concept of standardizing the lightning protection of structures. *31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012)*, 1–7. https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344229

Horváth, T. (1967). Die Einschlagwahrscheinlichkeit als ein Ausdruck des Schutzeffektes der

Blitzschutzeinrichtungen. *9th International Blitzschutz Konferenz*, 4.

Horváth, T. (2012b). Estimation of interception efficiency using the probability modulated attraction volume. *31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012)*, 8. https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344228

Horváth, T. (2006). Interception efficiency of lightning air termination systems constructed with rolling sphere method. *28th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, *1*, 555–560.

Horváth, T. (2012c). The protected space proved to be an undefined term. *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1–7. https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344227

Horváth, T., & Pankasz, L. (1978). Ermittung der Wahrscheinlichkeiten von Nahe- und Seiteneinschläge bei Fernsehturm Moskau durch Modellversuche. *13. Internationale Blitzschutzkonferenz*.

IEC. (2009). *IEC 61400-24 Ed. 1.0 (CDV): Wind turbines – Part 24: Lightning Protection*.

IEC. (2011). *IEC/EN 62305:2011 - Lightning Protection*.

IRENA. (2017). *Renewable Capacity Statistics 2017*. https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2017.pdf

IRENA. (2020). *Renewable Capacity Statistics 2020*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf

Ishii, M., Saito, M., Natsuno, D., & Sugita, A. (2014). Lightning incidence on wind turbines in winter. *32nd International Conference on Lightning Protection*, 1734–1738. https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973409

Kern, A., Schelthoff, C., & Mathieu, M. (2012). Calculation of interception efficiencies for mesh-type air-terminations according to IEC 62305-3 using a dynamic electro-geometrical model. *31st International Conference on Lightning Protection*. https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344202

Kiss, I., Németh, B., Horváth, T., & Berta, I. (2014). Improved method for the evaluation of shielding effect of objects near medium voltage transmission lines. *32nd International*

Conference on Lightning Protection, 1780–1785. https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973417

Madsen, S. F. (2017). Design and Verification Methods for Wind Turbines, Ensuring Safe Operation During Lightning Exposure. *4th International Symposium on Winter Lightning (ISWL)*, 6.

Madsen, S. F., Bertelsen, K., Krogh, T. H., Erichsen, H. V., Hansen, A. N., & Lonbaek, K. B. (2010). Proposal of new zoning concept considering lightning protection of wind turbine blades. *30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 108–117. https://doi.org/10.1109/ICLP.2010.7845849

Madsen, S. F., & Erichsen, H. V. (2009). Numerical model to determine lightning attachment point distributions on wind turbines according to the revised IEC 61400-24. *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*, 13.

Madsen, S. F., Holboell, J., Henriksen, M., Bertelsen, K., & Erichsen, H. V. (2006). New test method for evaluating the lightning protection system on wind turbine blades. *28th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.

Magyar Szabványügyi Testület. (1981). *MSZ 274:1981 Villámvédelem*.

Mezősi, G., Bata, T., Meyer, B. C., Blanka, V., & Ladányi, Z. (2014). Climate Change Impacts on Environmental Hazards on the Great Hungarian Plain, Carpathian Basin. *International Journal of Disaster Risk Science*, *5*(2), 136–146. https://doi.org/10.1007/s13753-014-0016-3

Miki, T., Saito, M., Shindo, T., Tanaka, D., Asakawa, A., Motoyama, H., Ishii, M., Suzuhigashi, Y., & Taguchi, H. (2014). Upward and downward lightning observed at Tokyo Skytree: Overall observation results of current waveform and charge transfer. *32nd International Conference on Lightning Protection*, *July*, 1594–1599. https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973384

Montanyà, J., Salvador, A., Van Der Velde, O., Pineda, N., Fabró, F., Williams, E., & López, J. A. (2017). Winter , moderate and deep convection thunderstorms in northeastern Spain . Favorable conditions for the triggering of uppward lightning from wind turbines. *4th International Symposium on Winter Lightning*, 3–7.

Napolitano, F., Tossani, F., Borghetti, A., Nucci, C. A., & Rachidi, F. (2019). Estimation of the expected annual number of flashovers in power distribution lines due to negative and

positive lightning. *Electric Power Systems Research*, *176*, 105956. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105956

NEDO. (2013). *NEDO offshore wind energy progress Edition II*. http://www.nedo.go.jp/content/100534312.pdf?from=b

Newman, M. C., & Strojan, C. (1998). *Risk Assessment: Logic and Measurement*. Ann Arbor Press.

NFC. (2011). *NFC 17 102 :2011 - Protection Against Lightning - Early Streamer Emission Lightning Protection Systems*.

Palotai, R. (2016). *Szélgenerátorokat érő villámcsapások laboratóriumi modelljeinek megbízhatósági vizsgálata*. BME.

Prinz, H. (1965). *Feuer, Blitz und Funke*. Verlag F Bruckmann.

Rakov, V. A. (2003). A review of positive and bipolar lightning discharges. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, *84*(6), 767–776.

Rakov, V. A., Borghetti, A., Bouquegneau, C., Chisholm, W., Cooray, V., Cummins, K., Diendorfer, G., Heidler, F., Hussein, A., Ishii, M., Nucci, C. A., Piantini, A., Pintro, O., Qie, X., Rachidi, F., Saba, M. M. F., Shindo, T., Schulz, W., Thottappillil, R., … Zischank, W. (2013). Lightning Parameters for Engineering Applications. *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 119.

Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning Physics and Effects*. Cambridge University Press.

Rousseau, A., & Gruet, P. (2006). Application of IEC 62305-2 in France on various plants Proposals for improvements. *28th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1235–1239.

Rousseau, A., & Gruet, P. (2004). Practical High Frequency Measurement of a Lightning Earthing System. *27th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 5.

Rousseau, A., & Guthrie, M. (2012). Direct Lightning Withstand of Corrugated Stainless Steel Tubing for Gas. *31st International Conference on Lightning Protection*.

Rousseau, A., & Kern, A. (2014). How to deal with environmental risk in IEC 62305-2. *32nd International Conference on Lightning Protection*, 521–527. https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973180

Salinas, E., Yamamoto, K., Severo, L., & Pinhel, A. (2018). Some examples of EMI/EMC in wind power systems and large solar parks. *IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, 423–427. https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393813

Tóth, Z., Kálecz, G., Kiss, I., & Berta, I. (2019). Evaluation of the estimation methods for lightning interception efficiency of air-termination mesh. *CIGRE SCIENCE & ENGINEERING Power Systems*, *16*, 24–28.

Tóth, Z., Kálecz, G., Kiss, I., & Berta, I. (2020). Evaluation of the Estimation Methods for Lightning Interception Efficiency of Air-Termination Mesh. *ELECTRA, N° 016 Dec*, 24–28.

Tóth, Z., & Kiss, I. (2017a). Magas építmények villámvédelme esetén felmerülő problémák. In *VII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó* (p. 8). Magyar Elektrotechnikai Egyesület.

Tóth, Z., & Kiss, I. (2017b). Szélturbinák villámvédelmének különleges kérdései (Specific Questions related to the Lighting Protection of Wind Turbines). *Elektrotechnika*, *2017/7-8*, 8–11.

Tóth, Z., & Kiss, I. (2017c). Evaluation of striking frequency in case of wind turbines with multiple receptors. *4th International Symposium on Winter Lightning (ISWL)*, 6.

Tóth, Z., Kiss, I., Kálecz, G., & Németh, B. (2020). A fotovoltaikus, megújuló erőművek primer villámvédelmi kérdései - A PV erőművek az IEC 62305 szabvány és a PMAV szempontjából. *X. Mechwart András Ifjúsági Találkozó*, 49–53. https://doi.org/10.5281/zenodo.4054032

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2017). Effect of near wind turbines on the risk of lightning stroke on overhead lines. *International Colloquium on Lightning and Power Systems*.

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2018). Some Significant Problems of Lightning Protection in Flexible Energy Systems. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 521, pp. 293–299). https://doi.org/10.1007/978-3-319-78574-5_28

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2019a). Problems of the simulation and modeling the lightning protection of high structures. *Pollack Periodica*, *14*(2), 223–234. https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.20

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2019b). Case study to determinate the angle-dependence during the risk determination in lightning protection. *Journal of Physics: Conference*

Series, *1322*(1), 012009. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1322/1/012009

Tóth, Z., Kiss, I., Németh, B., & Szedenik, N. (2019). Relation Between The Material of Roof and The Risk of Lightning Caused Damage. *2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, *October*, 1–4. https://doi.org/10.1109/SIPDA47030.2019.8951630

Tóth, Z., Kiss, I., & Palotai, R. (2016). Problematic of the simulation and modelling in the aspect of lightning protection. In *12th Miklós Iványi International PhD and DLA Symposium* (pp. 117–117). Pollack Press.

Tóth, Zoltán, Kiss, I., Németh, B., & Berta, I. (2021). Lightning Protection of High-performance Photovoltaic Power Plants: Issues of Parts to Be Covered by the Lightning Protection System. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. https://doi.org/10.3311/PPee.17392

Verebélÿ, L. (1949). *Villámhárító rudak és vezetők védőhatása*. Egyetemi Nyomda.

Vogel, S., Holboell, J., Lopez, J., Garolera, A. C., & Madsen, S. F. (2016). European cold season lightning map for wind turbines based on radio soundings. *33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016)*, 1–7. https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791373

Vogel, S., Ishii, M., Saito, M., & Natsuno, D. (2017). Upward lightning attachment analysis on wind turbines and correlated current parameters. *4th International Symposium on Winter Lightning*, *138*(5), 327–332. https://doi.org/10.1541/ieejpes.138.327

Wiesinger, J., & Hasse, P. (1977). *Handbuch für Blitzschutz und Erdung*. VDE-Verlag.

Zaini, N. H., Ab-Kadir, M. Z. A., Izadi, M., Ahmad, N. I., Radzi, M. A. M., Azis, N., & Hasan, W. Z. W. (2016). On the effect of lightning on a solar photovoltaic system. *33th International Conference on Lightning Protection*, 1–4. https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791421

Saját publikációk listája

Tóth, Z., Kálecz, G., Kiss, I., & Berta, I. (2019). Evaluation of the estimation methods for lightning interception efficiency of air-termination mesh. CIGRE SCIENCE & ENGINEERING Power Systems, 16, 24–28.

Tóth, Z., Kálecz, G., Kiss, I., & Berta, I. (2020). Evaluation of the Estimation Methods for Lightning Interception Efficiency of Air-Termination Mesh. ELECTRA, N° 016 Dec, 24–28.

Tóth, Z., & Kiss, I. (2017a). Magas építmények villámvédelme esetén felmerülő problémák. In VII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó (p. 8). Magyar Elektrotechnikai Egyesület.

Tóth, Z., & Kiss, I. (2017b). Szélturbinák villámvédelmének különleges kérdései (Specific Questions related to the Lighting Protection of Wind Turbines). Elektrotechnika, 2017/7-8, 8–11.

Tóth, Z., & Kiss, I. (2017c). Evaluation of striking frequency in case of wind turbines with multiple receptors. 4th International Symposium on Winter Lightning (ISWL), 6.

Tóth, Z., Kiss, I., Kálecz, G., & Németh, B. (2020). A fotovoltaikus, megújuló erőművek primer villámvédelmi kérdései - A PV erőművek az IEC 62305 szabvány és a PMAV szempontjából. X. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, 49–53. https://doi.org/10.5281/zenodo.4054032

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2017). Effect of near wind turbines on the risk of lightning stroke on overhead lines. International Colloquium on Lightning and Power Systems.

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2018). Some Significant Problems of Lightning Protection in Flexible Energy Systems. In IFIP Advances in Information and Communication Technology (Vol. 521, pp. 293–299). https://doi.org/10.1007/978-3-319-78574-5_28

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2019a). Problems of the simulation and modeling the lightning protection of high structures. Pollack Periodica, 14(2), 223–234. https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.20

Tóth, Z., Kiss, I., & Németh, B. (2019b). Case study to determinate the angle-dependence during the risk determination in lightning protection. Journal of Physics: Conference Series, 1322(1), 012009. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1322/1/012009

Tóth, Z., Kiss, I., Németh, B., & Szedenik, N. (2019). Relation Between The Material of Roof and The Risk of Lightning Caused Damage. 2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA), October, 1–4. https://doi.org/10.1109/SIPDA47030.2019.8951630

Tóth, Z., Kiss, I., & Palotai, R. (2016). Problematic of the simulation and modelling in the aspect of lightning protection. In 12th Miklós Iványi International PhD and DLA Symposium (pp. 117–117). Pollack Press.

Tóth, Zoltán, Kiss, I., Németh, B., & Berta, I. (2021). Lightning Protection of High-performance Photovoltaic Power Plants: Issues of Parts to Be Covered by the Lightning Protection System. Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. https://doi.org/10.3311/PPee.17392

Függelék

F-1. Fogalmak rendszerezése az angol szakirodalmi megfelelőivel

becsapási pont – point of strike

belső/szekunder villámvédelmi rendszer – internal lightning protection system

egyenértékű terület – equivalent area

ellenkisülés – upward leader, connecting leader

előkisülés – downward leader, initial leader

felfelé meginduló előkisülés – upward initial leader

főkisülés – main stroke

kisülés – discharge

külső/primer villámvédelmi rendszer – external lightning protection system, air-termination system

orientációs pont – orientation point (néhány más korábbi publikációban: striking point,)

orientációs távolság – orientation distance (néhány más korábbi publikációban: striking distance, attractive radius)

részkisülés – streamer, partial discharge

védelmi hiba – failure of interception, interception failure (néhány más korábbi publikációban: shielding failure)

védelmi hiba – failure of interception, interception failure, shielding failure

villámcsapás – lightning strike

villámcsatorna –lightning channel (néhány más korábbi publikációban: leader)

villámvédelmi felfogó

- **~ hálózat** – air termination network, air termination system
- **~ levezető** – down conductor
- **~ rúd** – air termination rod, lightning rod, Franklin rod
- **~ vonal** – air termination line

vonzási tér – attractive space (néhány más korábbi publikációban: collection area)

F-2. A villámok kialakulása és jellegzetes paraméterei

A villámok kialakulásával és fizikájával többen foglalkoztak, többek között Golde is, aki összefoglaló könyvében **[Golde, 1973]** összegyűjtötte a villámokra jellemző egyes tulajdonságokat és paramétereket, úgy mint:

- a villámok csúcsértékének ($\hat{I}_v$) eloszlása (valójában ez a villámáramok csúcsértékének eloszlása);
- a villámcsatorna töltésváltozásának (dQ/dt) eloszlása; és
- fajlagos energia (W/R);

Ezekről a paraméterekről az **F-2.3** alfejezetben található részletesebb leírás.

Fontos továbbá felsorolni a villámkutatás és a villámvédelem legnagyobb személyiségeit és meghatározó munkáikat, a teljesség igénye nélkül:

- Verebélÿ László: **[Verebélÿ, 1949]**;
- Karl Berger **[Berger, 1955]**;

Hans Prinz **[Prinz, 1965]**;

- Rudolf Heinrich Golde **[Golde, 1973]**;
- Horváth Tibor **[Horváth, 1965, 1991]**;
- J. Wiesinger, Peter Hasse: **[Wiesinger et al., 1977]**;
- M.C. Newman: **[Newman et al., 1998]**;
- Vladimir A. Rakov :**[Rakov et al., 2003]**.

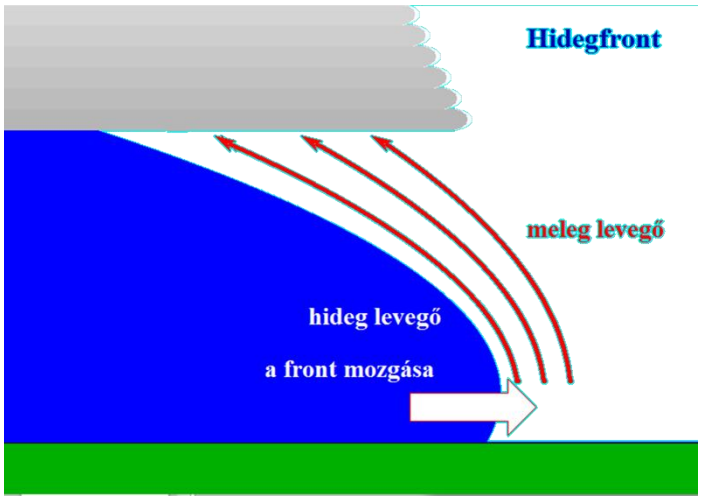
F-2.1. A zivatarfelhők kialakulása

Először is fontos tisztázni, hogy mit is nevezünk zivatarnak. *Zivatar*, az a légköri jelenség, amely villámok keletkezésével (villámcsapásokkal és mennydörgéssel) is jár. Nem szükséges feltétele a zivatarnak, hogy csapadékkal társuljon, viszont a villámok nélküli zápor vagy szélvihar nem zivatar. **[Horváth, 1997]** A csapadékmentes zivatart *szárazzivatar*nak nevezzük.

Zivatar esetén meleg, nedves légtömeg emelkedik gyorsan fölfelé, és miközben lehűl párakicsapódás, felhőképződés indul meg. A kialakulás folyamata alapján a zivatar lehet:

- frontzivatar;
- hőzivatar; vagy
- domborzati zivatar.

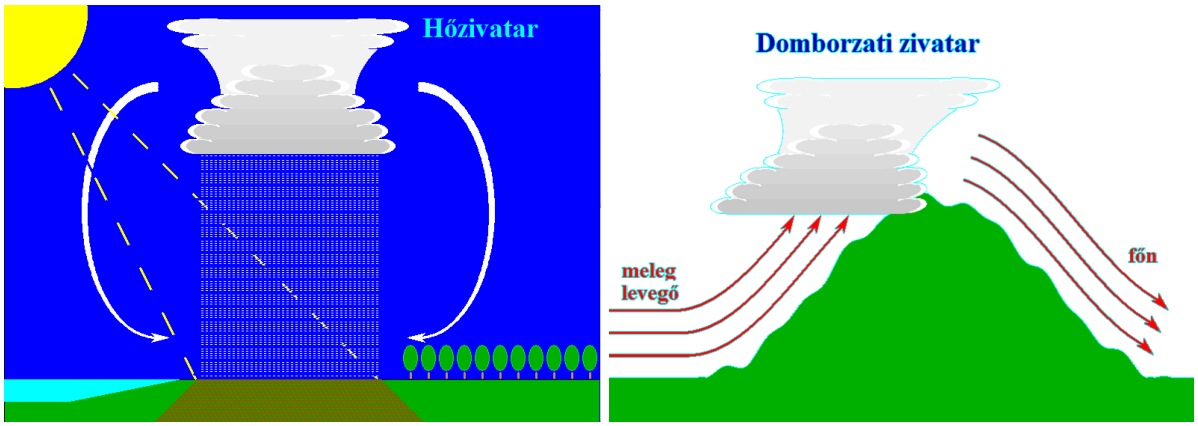
Hazánkban leggyakrabban *frontzivatar* képződik, amikor pl. nyugat felől hidegfront tör be. Az óceán vagy a Földközi-tenger felől nagy sebességgel érkező és az itt levőnél hidegebb légtömeg a **F-1. ábra** szerint fölfelé szorítja az előtte lévő meleg, nedves légtömegeket, és a meleg, nedves erős felfelé áramlása hozza létre a zivatarfelhőt. A betörő hidegfrontot és így a frontzivatart is a mérsékelt égövre jellemző ciklonok alakítják ki, amelyek néhány nap alatt egész Európán végighaladnak, légnyomáscsökkenést és lehűlést okozva. **[Horváth, 1997]**



F-1. ábra Frontzivatarok, amikor egy hidegfront utolér egy melegfrontot **[Horváth, 2014]**

A másik jellemző zivatarforma a *hőzivatar* (**F-2. ábra**) a domborzat különböző talajösszetételű, s így különböző hőelnyelő képességű része gyorsabban nyelvi el a napsugarak hőjét, s az ennek következtében létrejövő kipárolgás, és a felfelé áramló vízpára tömeg hozza létre a zivatarfelhőt.

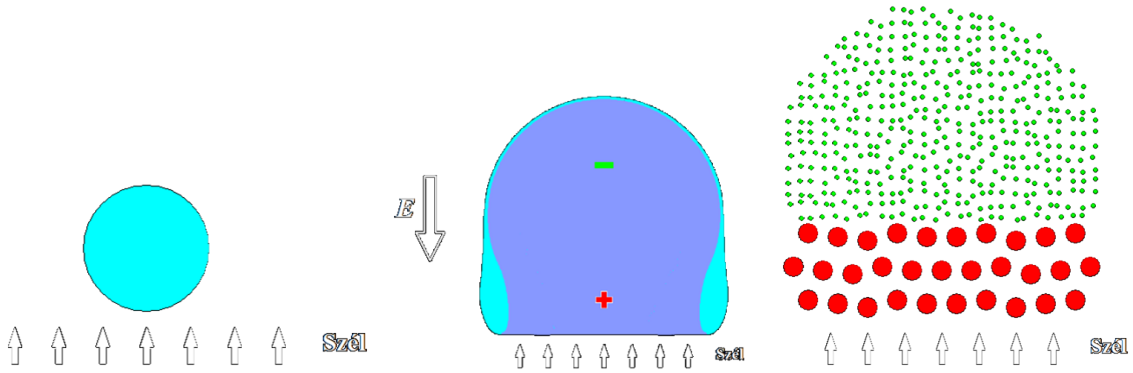
A *domborzati zivatar* (**F-2. ábra**) esetén a domborzat hírtelen szintemelkedése a zivatar frontját megemeli. Így a víztömeg hírtelen kondenzálódik, és megindul a zivatarképződés.



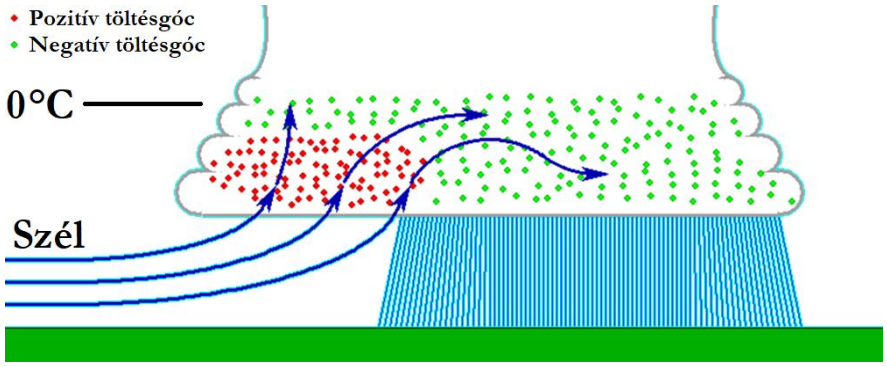
F-2. ábra Hőzivatar és domborzati zivatar **[Horváth, 2014]**

A zivatarfelhő kialakulása abban a magasságban indul el a troposzférában, ahol a felszálló légtömeg hőmérséklete eléri a harmatpontot (telítési hőmérsékletet). Emiatt látszik a felhő alja egyenesnek, illetve minden felhő aljáé körülbelül ugyanabban a magasságban elhelyezkedik el. A felszálló légtömeg folyamatosan hűl, és 2000 – 4000 m magasságában éri el a fagypontot. Az ionoszféra és a föld közötti villamos erőtér, és a folyamatos felfelé mutató légáramlás együttes hatására töltésszétválás következik (ld. **F-3. ábra**). Ezt a folyamatot írja le a Lenard-Simpson elmélet.

A Lenard-Simpson elmélet szerint a felfelé áramló vízcseppekre villamos erőtér hat. A villamos megosztás miatt a pozitív és negatív töltéshordozók (a kationok és hidroxid-ionok) elkülönülnek egymástól (**F-3. ábra**). A felfelé mozgó levegő miatt szétrobbanó vízcseppekből képződő kisebb, negatív töltésű cseppecskéket felfelé viszi a légáram, míg a nagyobb méretű, nehezebb pozitív cseppek lefelé mozognak. így a felhő közepén negatív, a felhő alján pedig pozitív töltésgóc alakul ki (ld. **F-4. ábra**).



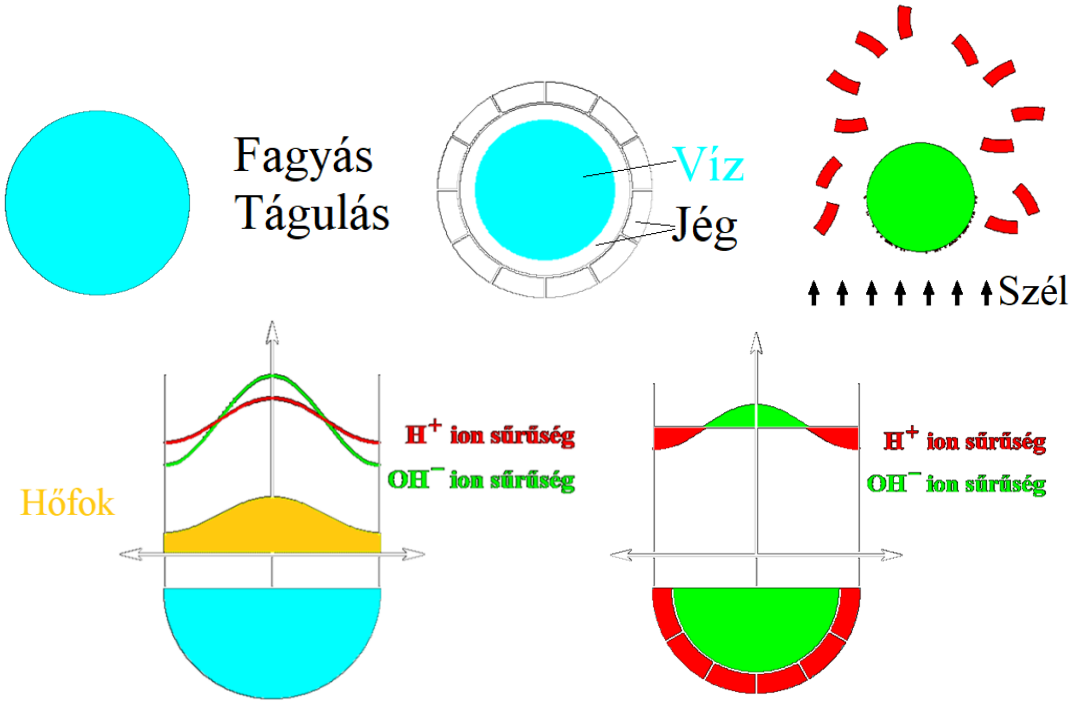
F-3. ábra A Lenard-Simpson elmélet **[Horváth, 2014]**



F-4. ábra A felhőzetben a Lenard-Simpson modellnek megfelelő töltés-szétválasztódás **[Horváth, 2014]**

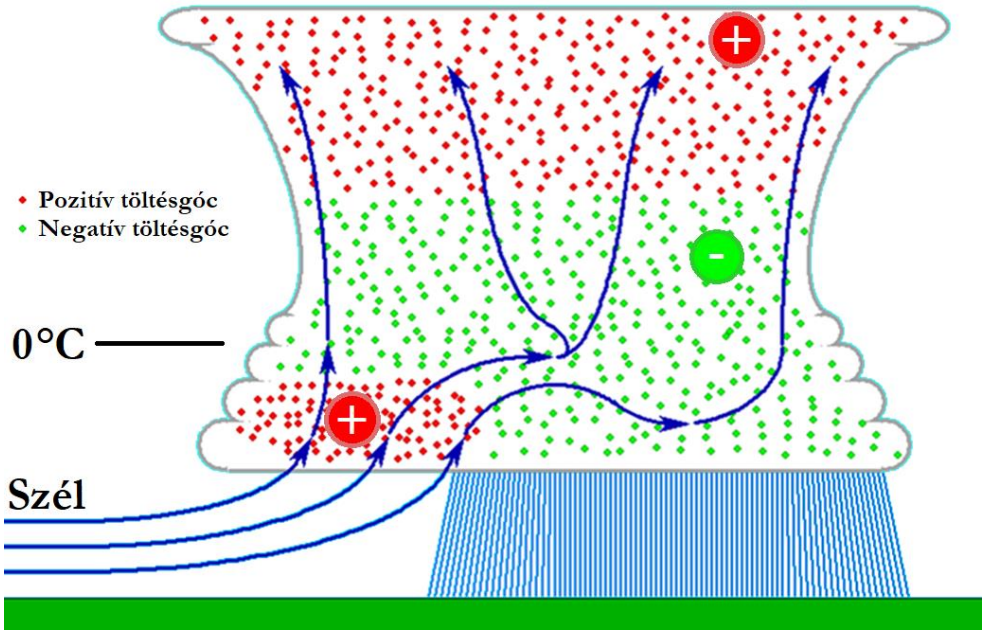
A fagypont felett túlhűtött vízcseppek, majd jégszemcsék keletkeznek (ld. **F-5. ábra** felső része). A zivatarfelhők tetején, 8 000 – 10 000 m magasan, apró jégkristályokból álló,

ernyőszerűen szétterülő képződmény jelenik meg. Ez a zivatarfelhők messziről látható ismertetőjegye.



F-5. ábra Mason-Latham elmélet **[Horváth, 2014]**

A jégszemcsék belsejében jellegzetes töltéseloszlás figyelhető meg, amelynek oka a kationok és a hidroxid-ionok vízcseppen belüli eloszlása (**F-5. ábra** alsó része). Ezt a folyamatot a Mason-Latham elmélet írja le. A jégszemcséről a térfogat növekedés miatt (a vízjég hűlés közben a tágul) apró, könnyebb, pozitív töltéstöbblettel rendelkező jégdarabok válnak le. Ezeket a felszálló levegő magával ragadja. így alakul ki a felhő tetején egy újabb pozitív töltésgóc. A nagyobb, negatív töltésű jégszemcsék pedig tovább növelik a felhő közepén lévő negatív tértöltést (ld. **F-6. ábra**).



F-6. ábra A töltések eloszlása a zivatarfelhőben **[Horváth, 2014]**

Az így kialakult zivatarfelhőben a töltések arányaiban a következők:

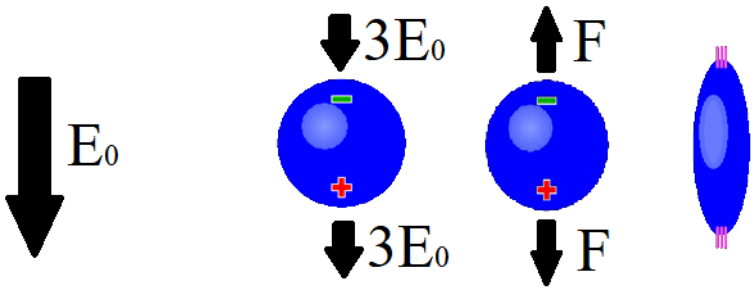
- alul egy 4 C pozitív góc;
- mellette és felette egy 24 C-os negatív góc és
- a felhő tetején egy 20 C-os pozitív góc.

A töltések összege – hiszen töltésszétválás következett be – természetesen zéró.

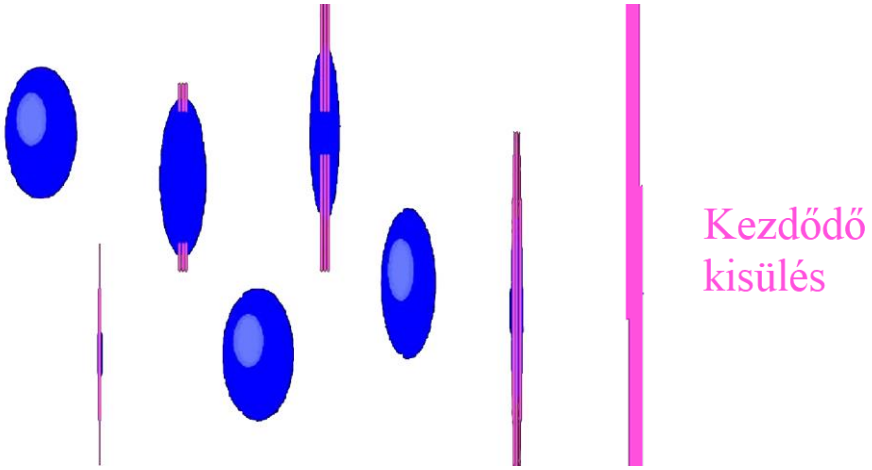
F-7. ábra Zivatarfelhő 11 km-es magasságból **[Borja, 2018]**

F-2.2. A villámcsatorna kifejlődése

A villamos erőtér hatására – a villamos megosztás következtében – a vezető vízcseppek deformálódnak. Az ilyen módon eldeformálódott vízrészecskéken koronakisülés jelenik meg a nagy mennyiségű felhalmozódott töltés következtében (**F-8. ábra**). Ezek a részleges kisülések összekapcsolódhatnak (**F-9. ábra**). Ennek köszönhetően megindul az előkisülés (**F-10. ábra, bal**). **[Csernátony-Hoffer, 1961]**

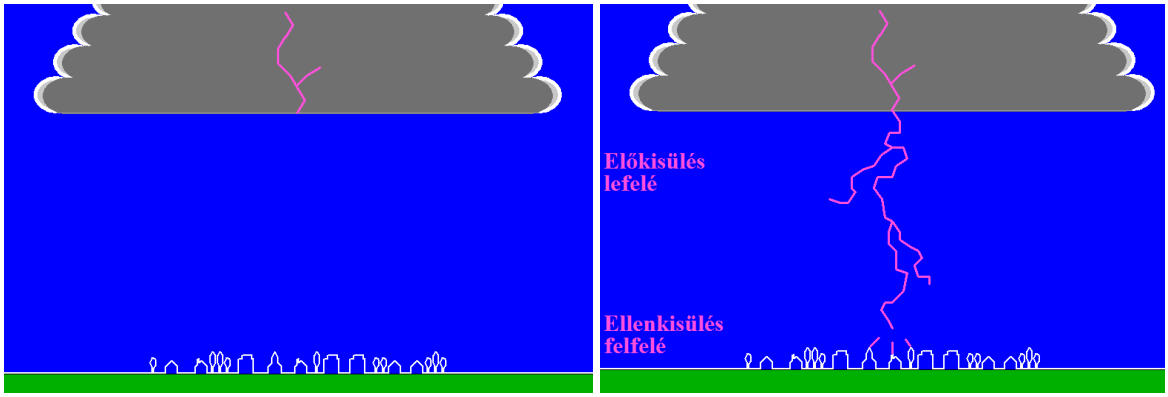


F-8. ábra Részkisülések kialakulása az ionoszféra és a föld közötti villamos erőtér miatt fellépő villamos megosztás hatására **[Horváth, 2014]**



F-9. ábra A részkisülések kezdődő kisüléssé, előkisüléssé fejlődése **[Horváth, 2014]**

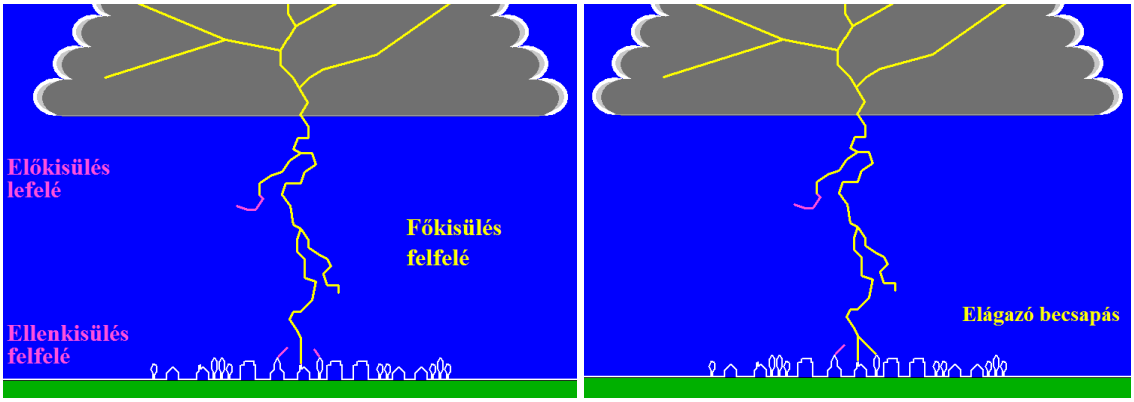
A továbbiakban csupám a felhő-föld típusú villámok kialakulásának folyamatát vizsgáljuk. A felhő irányából meginduló előkisülés csatorna (**F-10. ábra, jobb**) a föld felszíne felé indul meg. A kisülés zegzugos, esetenként elágazó szökellésekkel halad előre, egy-egy ugrás után rövid időre meg-megtorpanva. A felszínhez közel érve a földelt objektumokból ellenkisülés (esetenként több ellenkisülés) indul meg a csatorna töltése által keltett nagy villamostérerősség hatására (**F-10. ábra, jobb**). Azt a nevezetes pontot, ahol az előkisülés feje éppen tartózkodik, amikor az ellenkisülések megindulnak, orientációs pontnak nevezzük.



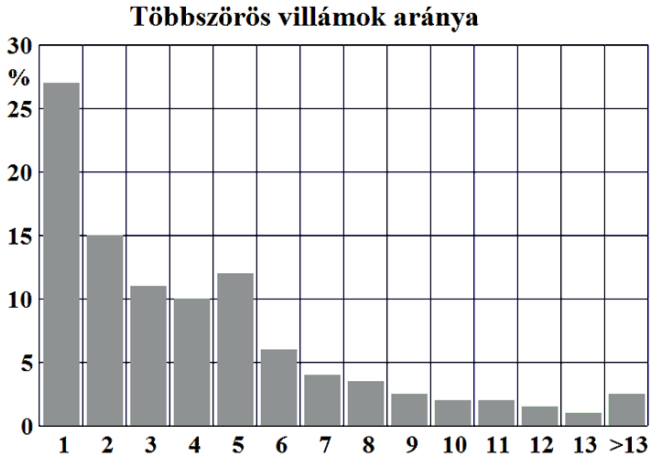
F-10. ábra Az előkisülés és az ellenkisülés fejlődése**[Horváth, 2014]**

Az ellenkisülések közül általában egy, ritkábban több találkozhat az előkisüléssel (**F-11. ábra**). Az így kialakult vezető csatornán át a földből a felhő irányába alakul ki a villám főkisülése. A főkisülés árama (mikroszekundumos meredekségű, ~10–300 kA csúcsértékű áramimpulzus) semlegesíti egyrészt a csatorna töltéseit, másrészt a felhőben lévő töltésgócot.

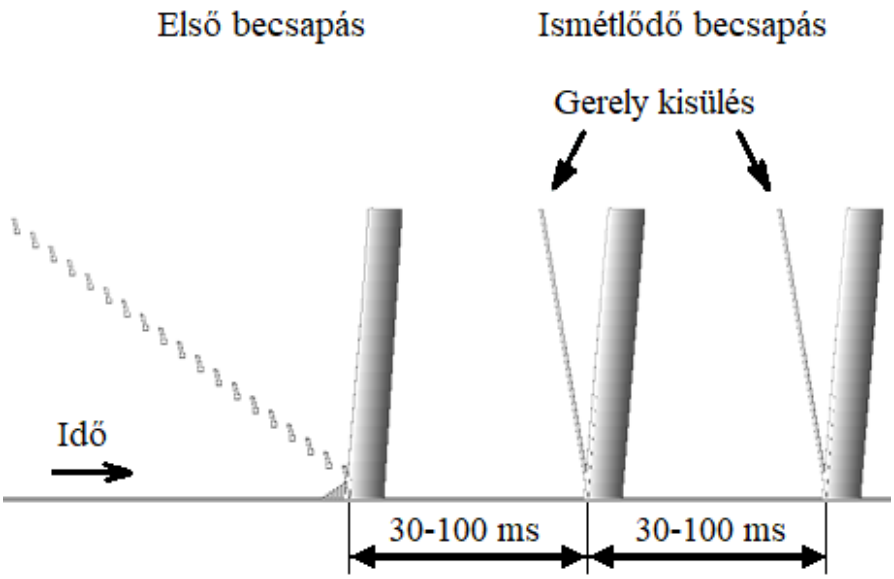
A közhiedelemmel ellentétben a villám többször is csap ugyanabba a földi tárgyba, és ez elég gyakran elő is fordulhat (**F-12. ábra**).



F-11. ábra A villám főkisülése, és az elágazó becsapás **[Horváth, 2014]**

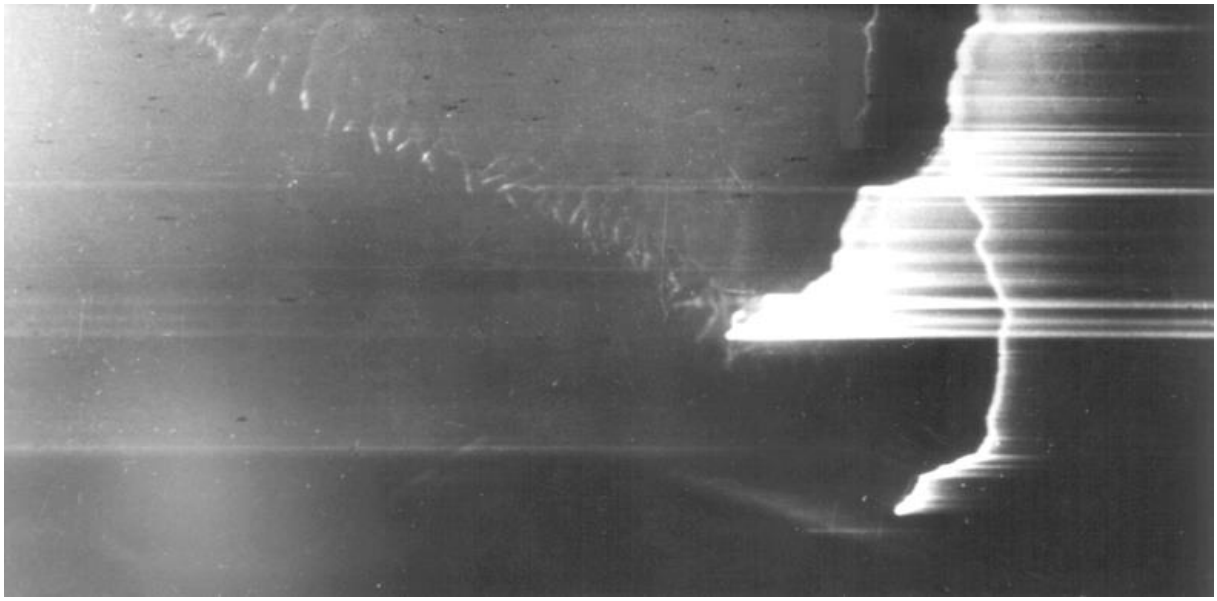


F-12. ábra A többszörös villámok aránya (>2) az egyszeres villámokhoz képest (=1) százalékos értékében **[Horváth, 2014; Rakov et al., 2013]**



F-13. ábra Boys-féle felvétel a villámcsatorna fejlődéséről **[Horváth, 2014]**

A villámcsapás folyamatát a Boys-féle felvételeken (**F-13. ábra**, **F-14. ábra**) részletesen nyomon lehet követni. (A Boys-féle kamerában az objektív mögött nagy sebességgel mozgatott filmen jelenik meg a lefelé, és a felfelé haladó kisülések képe.) A felvételek az orientációs pont elméletét is igazolják.



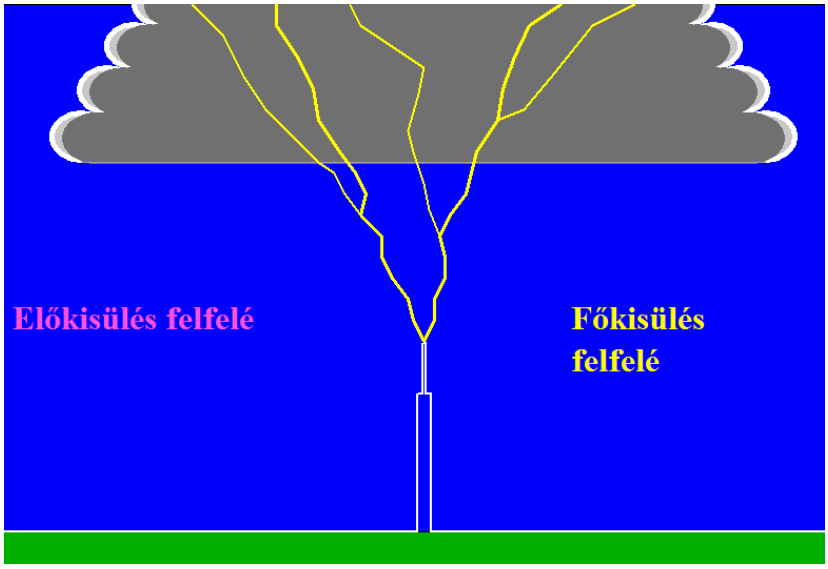
F-14. ábra Boys-féle kép a Monte San Salvatore villámfigyelő állomás 1953-as felvételén, 1953 **[Horváth, 2014]**

F-2.2.1. Felfele meginduló kisülés

A felfele meginduló villámok (**F-15. ábra**) egy elég speciális részét alkotják a villámoknak. Érdemes itt megemlíteni egy zivatarfajtát, ami korábban a felsorolásból kimaradt. Ez a zivatar nem a kifejlődésének módja alapján különbözik a többitől, hanem abban, hogy jellemzően a téli időszakban fordul elő.

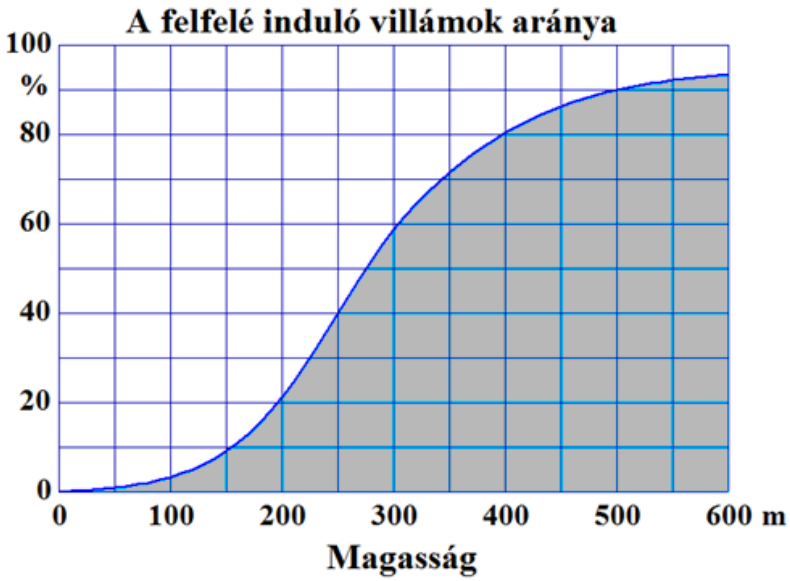
Télen jellemzően a hőmérséklet jelentősen alacsony a többi évszakhoz képest, s ilyenkor a zivatarfelhő aljának kifejlődése (kondenzáció a harmatponton) hamarabb (kisebb magasságban) következik be. A kis hőmérséklet miatt a fagypontot is hamarabb (alacsonyabban) éri el, ezért a jégkristályokban végbemenő töltés-szétválasztódási folyamatoknak a termikus jellege lesz a meghatározó. **[Browning et al., 1963]** Egyebek mellett ez az oka annak, hogy a téli zivatarokban a villámok (és így az előkisülések töltése is) jellemzően pozitív polaritásúak **[CIGRE WG C4.407, 2013; Napolitano et al., 2019; Rakov, 2003]**.

A téli zivatarok során az alacsony felhőmagasság következtében a felfelé meginduló villám is. **[Miki et al., 2014; Vogel et al., 2016]** Számos – a téli villámokra vonatkozó – megfigyelést a szélerőműveknél végezték **[Ishii et al., 2014; Montanyà et al., 2017]**.



F-15. ábra Felfele meginduló előkisülés fejlődése főkisüléssé **[Horváth, 2014]**

A szélerőműveknél is jellemző, hogy a kockázatnövelő hatás a környezetből jelentősen kiemelkedő objektum. A felfelé meginduló villámok aránya az objektum magasságával arányosan drasztikusan megnő (ld. **F-16. ábra**).



F-16. ábra A felfele meginduló villámok aránya a magasság függvényében **[Horváth, 2014]**

A felfelé meginduló villámok kialakulása, részletes fizikai háttere ma még nem ismert minden kérdést kielégítően, a fizikai modellek és a kísérletek nehezen kivitelezhetőek.

F-2.3. A villám fizikai tulajdonságai és jellegzetes paraméterei

A földbe lecsapó villámokat pozitív vagy negatív villámoknak nevezzük, attól függően, hogy milyen polaritású töltésgócot sütnek ki a felhőben, azaz, hogy milyen töltésű az előkisülés

csatorna. A kétféle polaritású villám között a lényeges fizikai tulajdonságokban is nagy különbségek vannak, ezeket az **F-1. táblázat** foglalja össze.

A tornyokon és hasonló magas építményeken végzett megfigyelések azt mutatják, hogy az összes villámcsapások között kb. 90%-a negatív, vagyis a pozitív villámok ritkábbak. A távvezetéknél ez az arány eltolódik, kb. 80% a negatív villámok aránya. Elméleti úton kimutatható, hogy a tornyok esetében nagyobb a villámcsapások száma, vagyis elmondhatjuk, hogy a tornyok jobban vonzzák magukhoz a negatív villámokat. A pozitív villámcsapások viszont gyakrabban érik magas torony közelében lévő alacsonyabb tárgyakat. Fontos kiemelni, hogy a kétféle polaritású villámok megfigyelt arányát a megfigyelési hely geometriai viszonyai már eltorzítják. Erre a hatásra mutat a tornyokon, és a vezetékeken 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

F-1. táblázat A villámáram jellemző értékeinek előfordulási gyakorisága **[Horváth, 1991; IEC, 2011; Rakov et al., 2013]**

A jellemző értékek	**A villám polaritása és a kisülés, amire vonatkozik**	**50% medián érték**	**10% gyakorisággal nagyobb, mint**	**5% gyakorisággal nagyobb, mint**	**1% gyakorisággal nagyobb, mint**
A villámáram csúcsértéke [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
A kiegyenlítődő töltés [C]	- áramlökés	5,2	17,3	24,3	46,0
	- teljes villám	7,5	27,6	40,0	80,0
	+ áramlökés	16,0	82,7	131,6	315,9
	+ teljes villám	80,0	252,5	350,0	644,7
A meredekség [kA/μ s] maximumának átlagos értéke	- 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
	- ismételt részvillám	20,0	69,1	98,3	190,0
Az áramhullám homlokideje [μs]	- 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
A fajlagos energia [MJ/Ω]	- teljes villám	0,055	0,32	0,53	1,30
	+ teljes villám	0,650	7,90	16,00	60,00

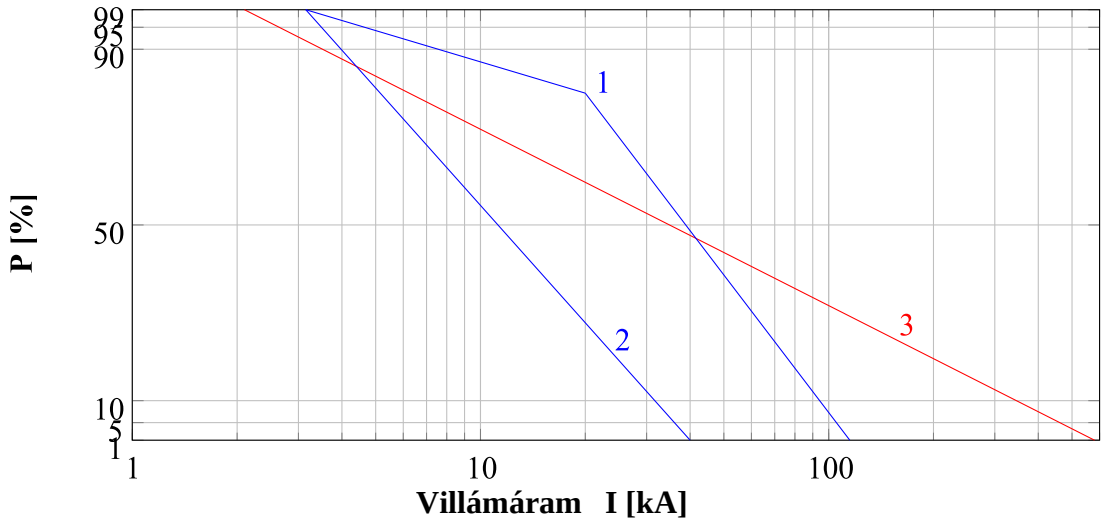
adódik a tornyokon és a vezetékeken megfigyelt torzított érték. A számítások azt mutatják **[Horváth et al., 1978]**, hogy sík területen az összes villámcsapás kb. 70%-a lehet negatív és 30%-a pozitív villám.

A villámcsapás egyik legjellemzőbb fizikai tulajdonsága az áramhullám csúcsértéke 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.

F-2. táblázat A villámáram és a fajlagos energiasűrűség szórása és középértéke a kisülés fajtájától függően **[Horváth, 1991; IEC, 2011; Rakov et al., 2013]**

Paraméter	Átlag μ	Szórás σ_{log}	A kisülés típusa
I [kA]	61,1	0,576	Első negatív (80%)
	33,3	0,263	Első negatív (80%)
	11,8	0,233	Gerelykiülés
	33,9	0,527	Pozitív kisülés
W/R [kJ/Ω]	57,5	0,596	Első negatív
	5,35	0,600	Gerelykisülés
	612	0,844	Pozitív kisülés

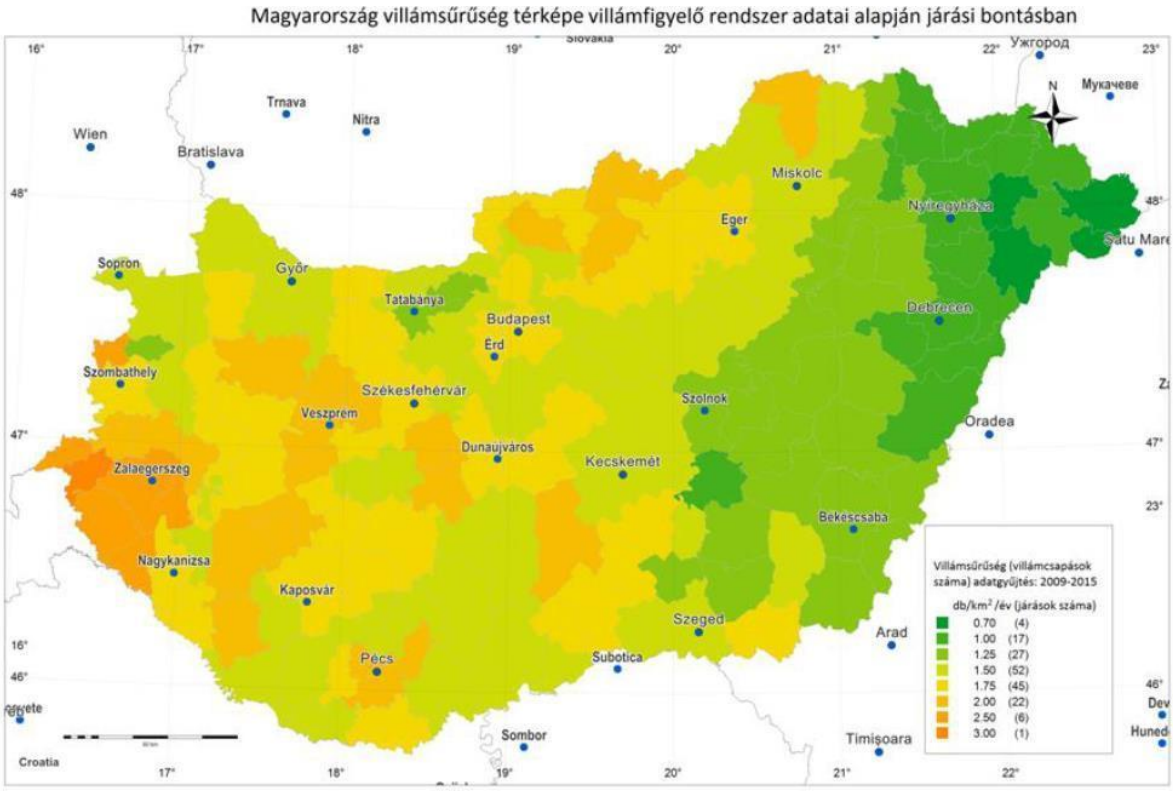
A villámáram értékeinek eloszlásával kapcsolatban egy érdekes megfigyelést tehetünk (**F-17. ábra**), ugyanis az eloszlásfüggvényben egy törést figyelhetünk meg 20 kV környékén. Az utóbbi időkben ezt azzal magyarázzák, hogy míg a korábbi statisztikák adatait magas építményekre szerelt megfigyelőállomásokon gyűjtötték, addig az új értékeket már jobb, pon-



F-17. ábra A (1) negatív első, a (2) negatív gerely- és a (3) pozitív kisülés csúcsáramának eloszlása **[IEC, 2011]**

tosabb metódusok szerint jegyzik fel, amelyek esetén a megfigyelő objektum tértorzító hatása elhanyagolható.

A PMAS (**F-3 fejezet**) számítások során az N_G villámsűrűség (izokeraunikus szint), vagyis az évente négyzetkilométerenként lecsapó villámok száma, az adott terület hely koordinátáitól függ. Magyarországon ez az érték 0,5 és 4 között változik, mint azt a mellékelt **F-18. ábra** is mutatja. A trópusokon ez a szám akár 50 és 100 közötti, vagy ennél is nagyobb lehet.



F-18. ábra A villámsűrűség Magyarországon (villám/km^2/év) **[Belügyminisztérium, 2020]**

F-3. Az Elektro-Geometriai Modell

A dinamikus elektro-geometriai modell (DEGM) az elektro-geometriai modell (EGM) továbbfejlesztett változata numerikus számításra optimalizálva. Az EGM a vonzási terek viszonyát írja le a PMAS-hez képest egyszerűsítésekkel élve, és nem veszi figyelembe az elmélet kitalálása óta újonnan megfigyelt fizikai folyamatokat.

Olyan térdarabokat vesz figyelembe a térben, amelyek az adott objektumhoz tartozó azon pontok halmazát tartalmazzák, és amelyek az adott véges térben az objektumok közül a kiválasztotthoz közelebb helyezkedik el. A villámok polaritását nem veszi figyelembe. Hasonlóan mint a PMAS az orientációs távolság és a villámáram közötti összefüggés alapján állítja fel a hipotézist az alábbiak **[Dehn+Söhne, 2017]** szerint:

$$r = 10 \cdot I^c \ [m] \tag{F-1}$$

ahol r a csapás távolság (PMAS esetében orientációs távolság) méterben;
I a villámáram kA-ben;
c egy 0,6 és 0,8 közötti kitevő, de általában 0,65.

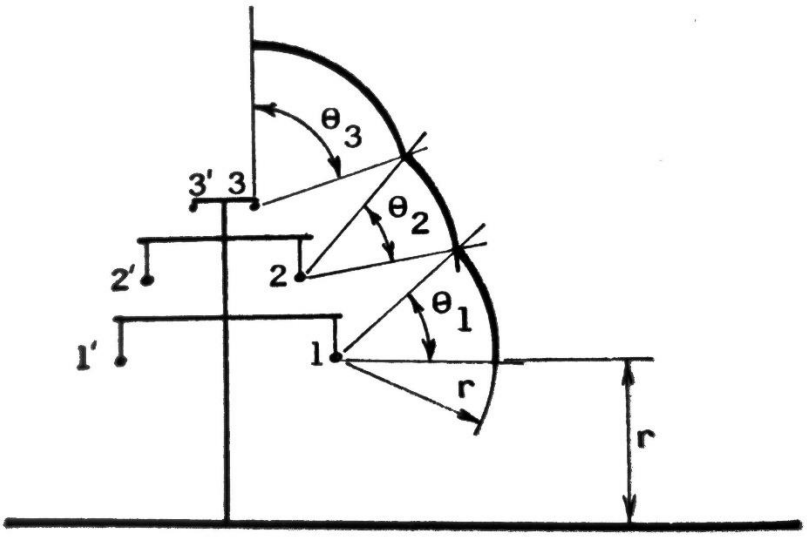
Az F-1 egyenletből kiindulva azonban ez a távolság függhet a magasságtól is, ebben az esetben viszont a következő egyenletet **[Horváth, 1991]** írhatjuk fel:

$$r = a \cdot I^c \cdot h^b \ [m] \tag{F-2}$$

ahol h az objektum magassága méterben;
a egy együttható, amely értéke 1 és 1,5 közötti;
b egy együttható, amely értéke 0,5 és 0,7 közötti.

Az a és b együtthatók empirikus értékek, amelyek megválasztása egyéni, és az adott viszonyoktól függ. Az EGM meghatároz továbbá egy minimális távolságot is, amely azt a távolságot adja meg, amely még előfordulhat. Mindezt a gyakorlatban az **F-19. ábra** szemlélteti. Megfigyelhetjük a vonzási szögeket (θ_i) és a minimális távolságot (r). Ez alapján a 3-as és 3'-as védővezetők hatékonyságát az alábbi módon számíthatjuk:

$$p_i = \frac{\theta_1+\theta_2}{\theta_1+\theta_2+\theta_3} \tag{F-3}$$

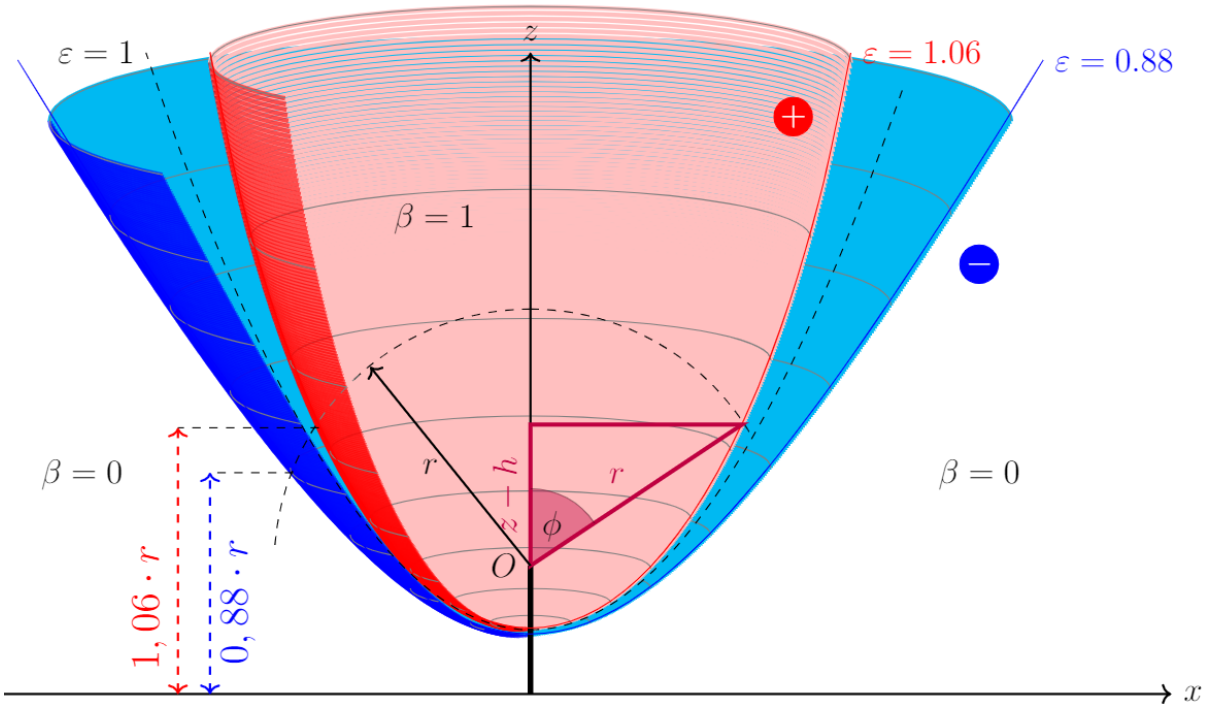


F-19. ábra A vonzási szög nagyfeszültségű távvezetékre **[Horváth, 1991]**

A hatályos nemzetközi szabványban **[IEC, 2011]** szereplő értékeket az EGM alapján számítják, amely értékek polaritásfüggetlenek, illetve korlátozott feltételek mellett alkalmazhatóak. Ilyen korlátozás például, hogy az épületnek alacsonynak kell lennie (<30 m). A szabványos értékek azonban nem alkalmazhatók azokon a területeken, ahol nagyobb számú a pozitív villámok aránya. Ez – többek között amiatt áll fenn – mert a villámok polaritását, illetve azok arányát nem veszi figyelembe alapvetően.

F-4. A valószínűséggel súlyozott vonzási tér elmélet

A valószínűséggel súlyozott vonzási tér (PMAS – Probability-Modulated Attractive Space) **[Horváth, 1960, 1991; Horváth et al., 1978]** elmélet az adott elrendezés és a vonzási terek (a védendő objektum és a primer villámvédelmi rendszer vonzási terének) viszonyát írja le. Az elektro-geometriai modellből kiindulva (DEGM – Dynamic Electro-Geomtric Model) ezek olyan térrészek, amelyek az adott objektumhoz tartozó azon pontok halmazát tartalmazzák, amelyek az adott véges térben az objektumok közül a kiválasztotthoz közelebb helyezkednek el. Ez a legtöbb esetben igaz is lehet, de mindez semmit sem mond a villámcsapások valószínűségéről azok polaritásának összefüggésében. A védendő objektum vonzási tere a tér azon pontjainak halmaza, ahol $0 \leq P \leq 0{,}5$. Mindezen állítás azzal a kiegészítéssel igaz, hogy ezen térrész kiterjedése polaritásfüggő. Ezt a tényt nagyszámú megfigyelési adat már igazolta, de kísérleti úton is kimutattak **[Horváth, 2012a]** Az $\varepsilon = z/h$ tényezőt bevezetve, ahol z az adott becsapási pontból, azaz a rúd csúcsából a tér adott pontjába mutató vektor, illetve h az objektum csúcspontjának síkhoz viszonyított magassága (**F-20. ábra**)) pozitív polaritású villámcsapás esetén $\varepsilon > 1$, és negatív polaritás esetben $\varepsilon < 1$. **[Horváth, 1963]**

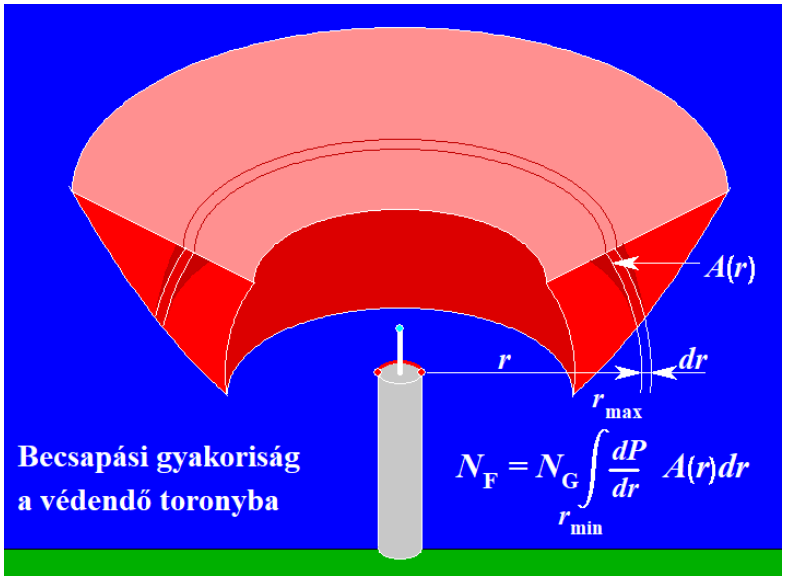


F-20. ábra A vonzási tér **[Horváth, 1991]** alapján

A PMAS elmélet alapja az orientációs pont, amely kialakulását az **F-1** fejezetben írtam le. Az a pont, ahol a felhőből lefelé haladó előkisülés feje akkor tartózkodik, amikor a villám eldönti, hogy hová fog lecsapni. Az orientációs távolság az orientációs pont és a becsapási pont

közötti távolság. (Ez praktikusan a szökellésekkel a föld felé haladó előkisülés utolsó ugrását jelenti.) Az orientációs távolság és a villámáram (a villám áramhullámának csúcsértéke) között többféle összefüggést is felírhatunk, de a kapcsolatot legjobban az **F-6** egyenlet közelíti. Általában ennek egy egyszerűbb formáját használják, amely alacsony objektumok esetén kielégítő. Az összefüggés azt írja le, hogy a nagyobb áramerősségű villámok messzebb döntik el, hogy hová csapnak.

Az orientációs pontból a villám adott valószínűséggel csap az adott objektumba. Ezt a valószínűség értéket β csapási faktornak nevezzük. A valóságban a csapási faktor 0 és 1 között folyamatosan változik. Az egyszerűbb megközelítés szerint a vonzási tér határfelületét a $\beta = 0{,}5$ értékhez szokás kötni. Az egyszerűsítés következménye, hogy a vonzási téren belüli térrész $\beta = 1$, és az azon kívüli térrészt pedig $\beta = 0$ jellemzi.



F-21. ábra A vonzási tér **[Horváth, 1991]**

Az **F-4** egyenlet a vonzási térrészre írja le a villámcsapások évenkénti várható számát, míg az **F-5** az adott pontra a *dP/dr* értéket adja meg, vagyis az orientációs távolságok sűrűségfüggvényét.

$$N_{F_a} = N_G \int_{V_a} \frac{dP}{dr} dV \qquad \text{(F-4)}$$

$$dP/dr = \frac{k\,p}{\sqrt{r\,\pi}}\; e^{-\frac{1}{2}k^2p^2\,ln\left(r/r_m\right)^2} \qquad \text{(F-5)}$$

$$I/I_m = \left(r/r_m\right)^p \qquad \text{(F-6)}$$

ahol P a becsapás valószínűsége az r pontból;

k egy paraméter, amely a villám polaritásától függ;

p általában 1,2 és 2 közötti érték (az $I/I_m = (r/r_m)^p$ kitevője);

r_m az orientációs távolság medián értéke méterben;

r az orientációs távolság méterben;

N_G az adott területen a villámsűrűség, $\frac{villámcsapás}{km^2 \cdot év}$

N_{Fa} az objektumot (rudat) érő villámcsapások frekvenciája, a rúdba csapóvillámok évenkénti száma;

I_m a villámáram medián értéke kA-ben;

I a villám áram kA-ben.

Annak meghatározása, hogy egy adott objektumot mennyi villámcsapás ér adott időszakban az **F-7** egyenlet szerinti egyenletből megkapható.

$$N_S = N_G\, A_{EQ} = N_G \int_{V(A)} \frac{dP}{dr} dV = N_G \int_{V(A)} \frac{dP}{dr} A(r) dr \qquad \text{(F-7)}$$

ahol A_{EQ} az egyenértékű terület, az a sík terület, amelyet évente ugyanannyi villámcsapás ér, mint a vizsgált objektumot, km^2;

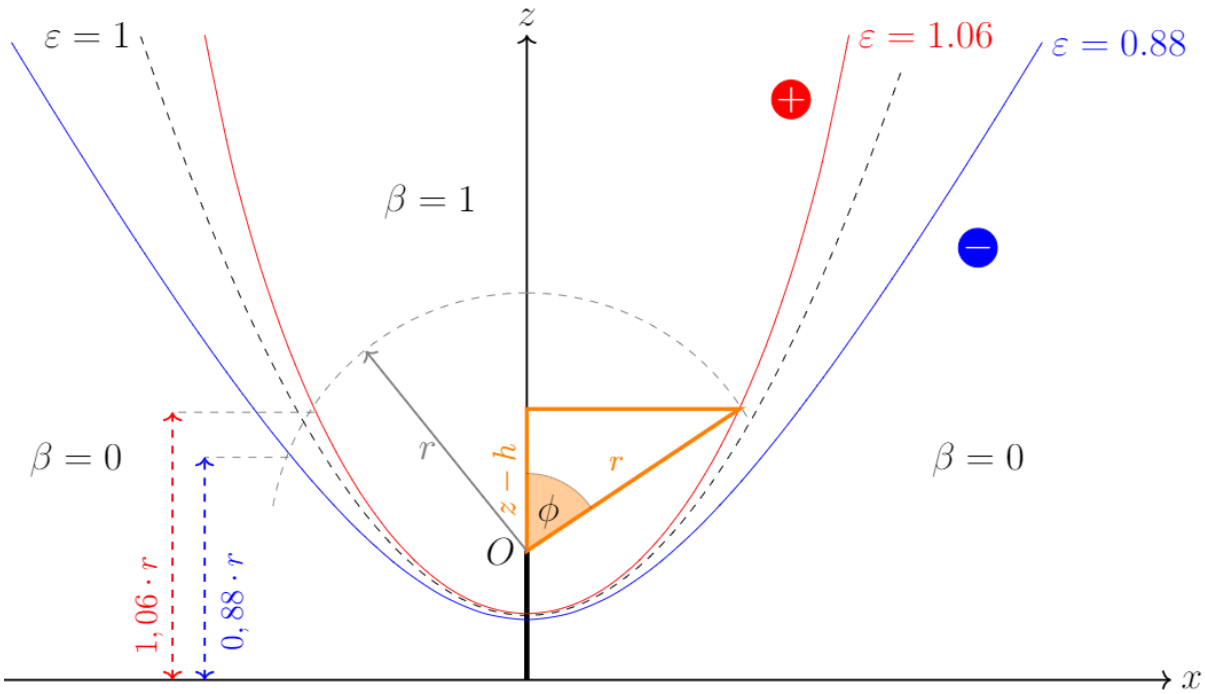
N_S az adott objektumba csapó, várható villámok száma évente.

Leegyszerűsítve a módszer a tér egyes pontjait az alapján választja el egymástól, hogy az adott pontok halmaza melyik objektumhoz van közelebb. A valóságban és a gyakorlatban mindez bonyolultabb. Laboratóriumi méréssekkel kimért **[Horváth, 1960]** és a természetből vett nagyszámú tapasztalati megfigyelés **[Horváth, 1967, 2012b; Horváth et al., 1978]** alapján megállapították, hogy a vonzási tér pozitív és negatív polaritású villámok esetében eltérő. Egy pont és sík elrendezésre nézve a(z) 3-2. ábrán látható módon alakul. Amennyiben a $\varepsilon = z/r$ arány 1, úgy egy paraboloid egyenletét kapjuk. A kísérleti és tapasztalatai eredmények azt mutatják, hogy míg pozitív polaritású villámok esetében az $\varepsilon > 1$, addig negatív polaritásúaknál ez $\varepsilon < 1$. Ennek következménye az, hogy pozitív esetben egy ellipszoid, addig negatív esetben egy hiperboloid lesz. Az ellipszoid egyenletét vizsgálva egy globális maximumot találunk, amelyet az **F-8**, illetve **F-9** egyenletekkel határozhatunk meg.

$$r_{max} = \frac{h}{\varepsilon - 1} \qquad \text{(F-8)}$$

$$z_{max} = h + r_{max} = h\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \qquad \text{(F-9)}$$

Amennyiben igaz az, hogy a Kárpát-medence klímája egyre szárazabb lesz az évszázad vége felé **[Bartholy et al., 2009; Mezősi et al., 2014]**, akkor az együtt jár azzal is, hogy kevesebb ciklon, zivatar éri el hazánkat. Ezzel összefüggésben pedig várhatóan kevesebb lesz a zivataros napok száma és esetleg a villámok száma is. Annak a feltételezése, hogy a klíma egy statikus rendszer, nem helytálló. A mindenkori villámvédelmi rendszereket nagyobb projektek esetében érdemes már ennek tudatában tervezni, hogy a később felmerülő extra kiadások a megtérülést ne befolyásolják számottevő mértékben a rendszeres felülvizsgálatok során sem.

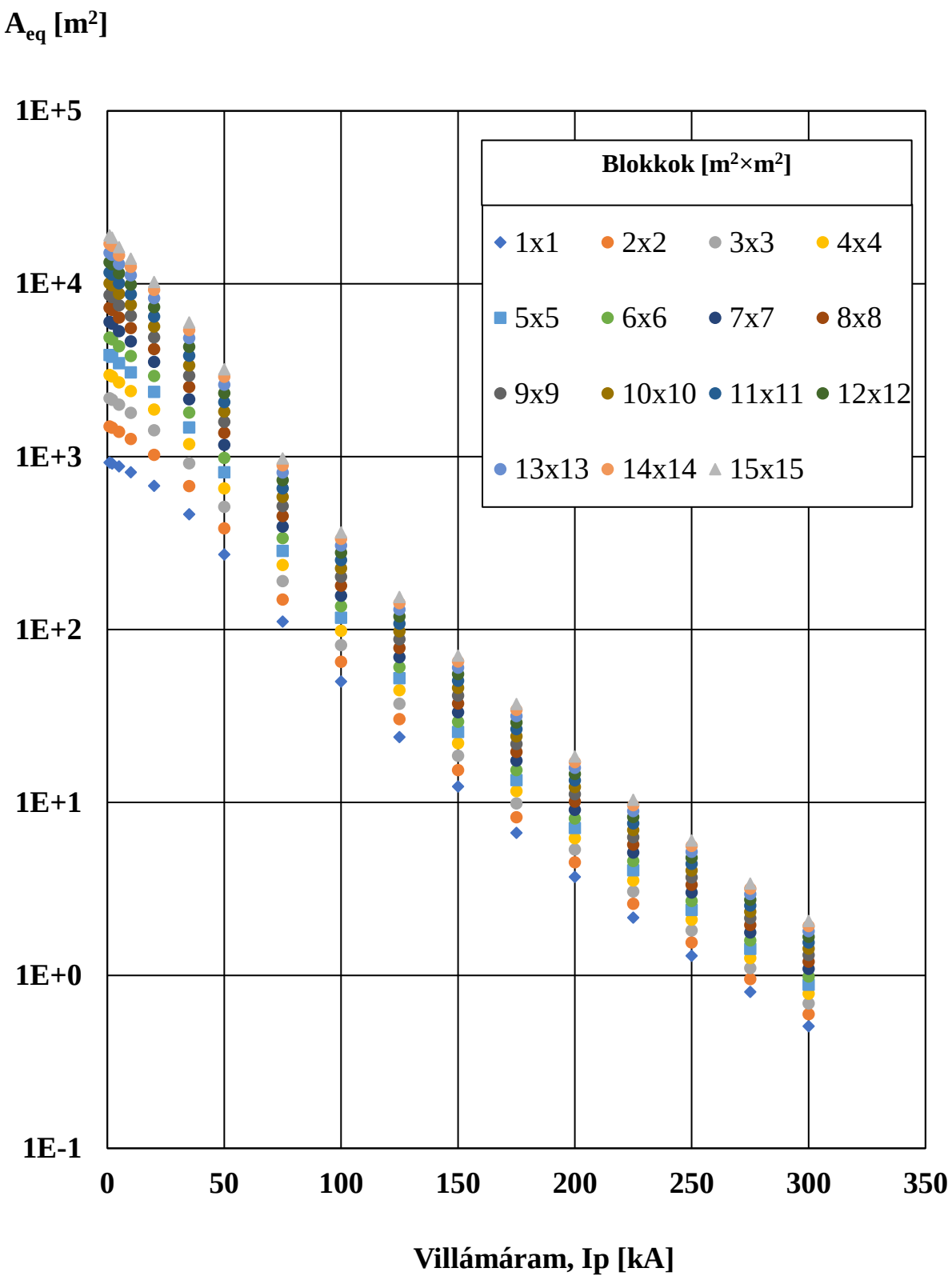


F-22. ábra A vonzási tér határfelülete a különböző polaritású villámok esetén

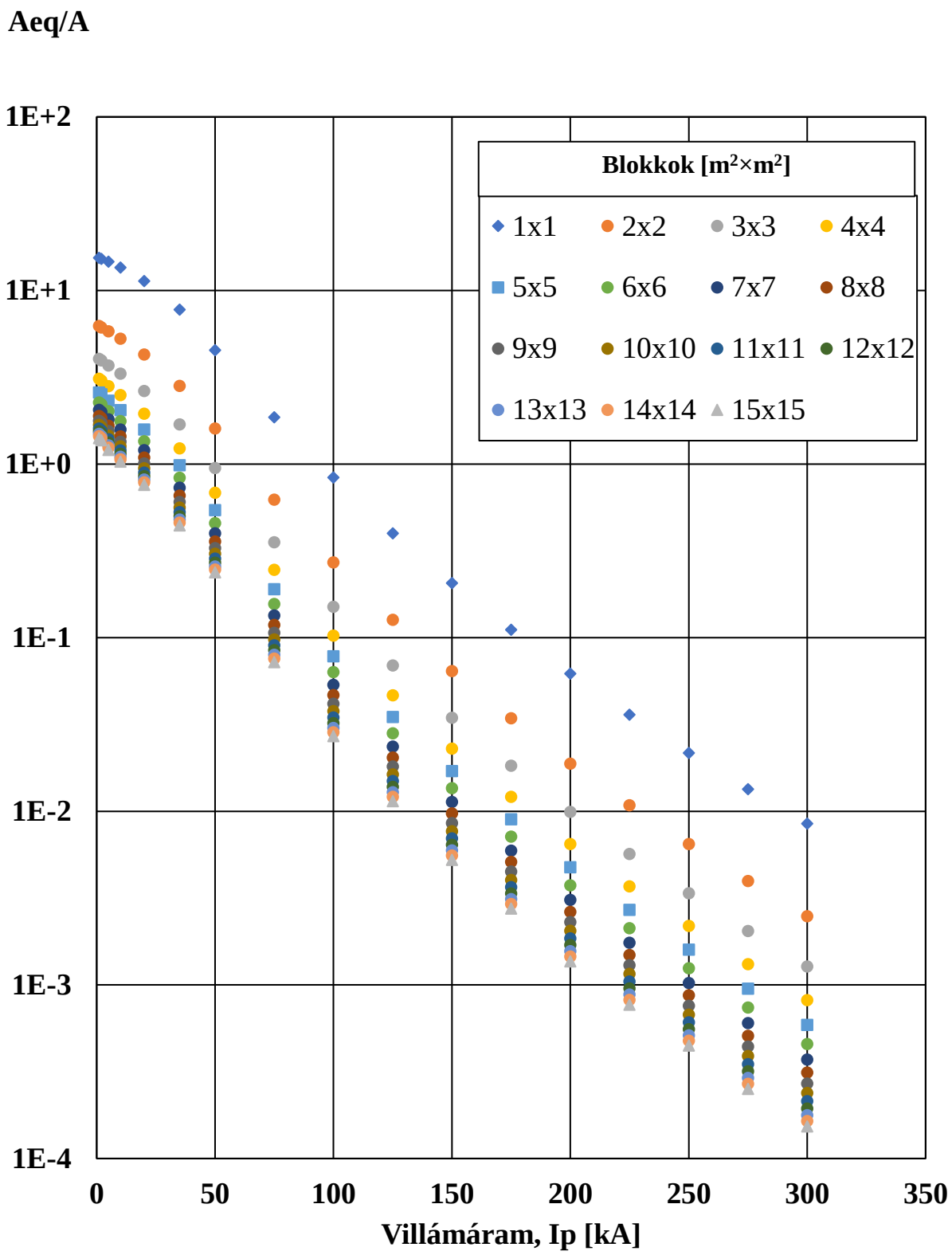
A várható villámok évenkénti számát a villámcsapások jellemzői mellett döntően befolyásolja az objektum alakja, de különösképpen a magassága is. **[Horváth, 1991, 2012a, 1967]**

Az **F-5** összefüggésben szereplő térfogati integrál számítható az *r* szerint egyváltozós formában. Ennek a módszernek az előnye, hogy a korai számítástechnikai eszközökkel is relatíve gyorsan ki lehetett számolni néhány egyszerűsítést követően az adott pár összetevős elrendezésre az objektumot érő évenkénti villámcsapások számát adja meg. Összetettebb struktúrák esetében viszont nehézkesen kivitelezhető, érdemesebb nem analitikus úton számolni.

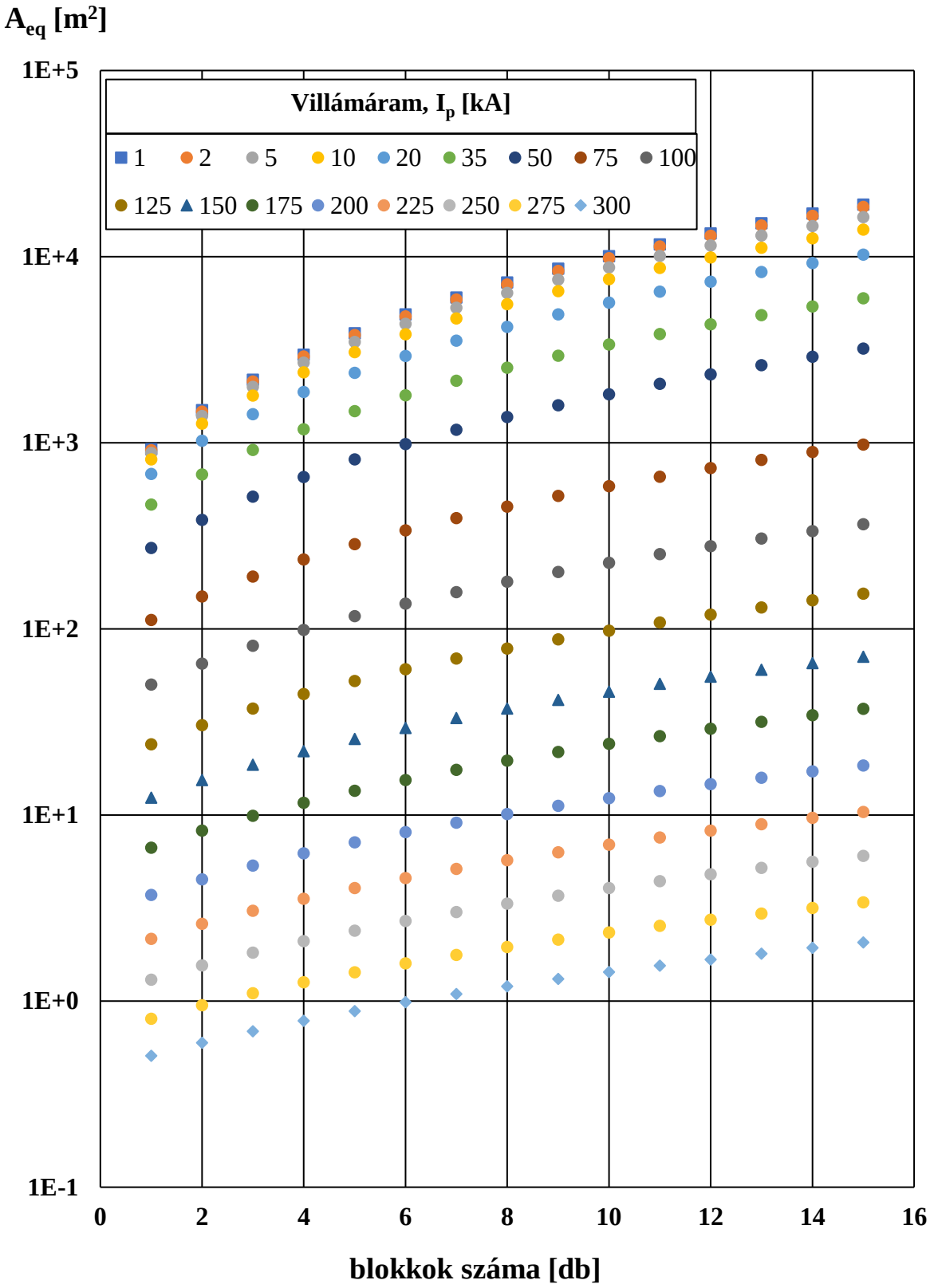
F-5. Grafikonok



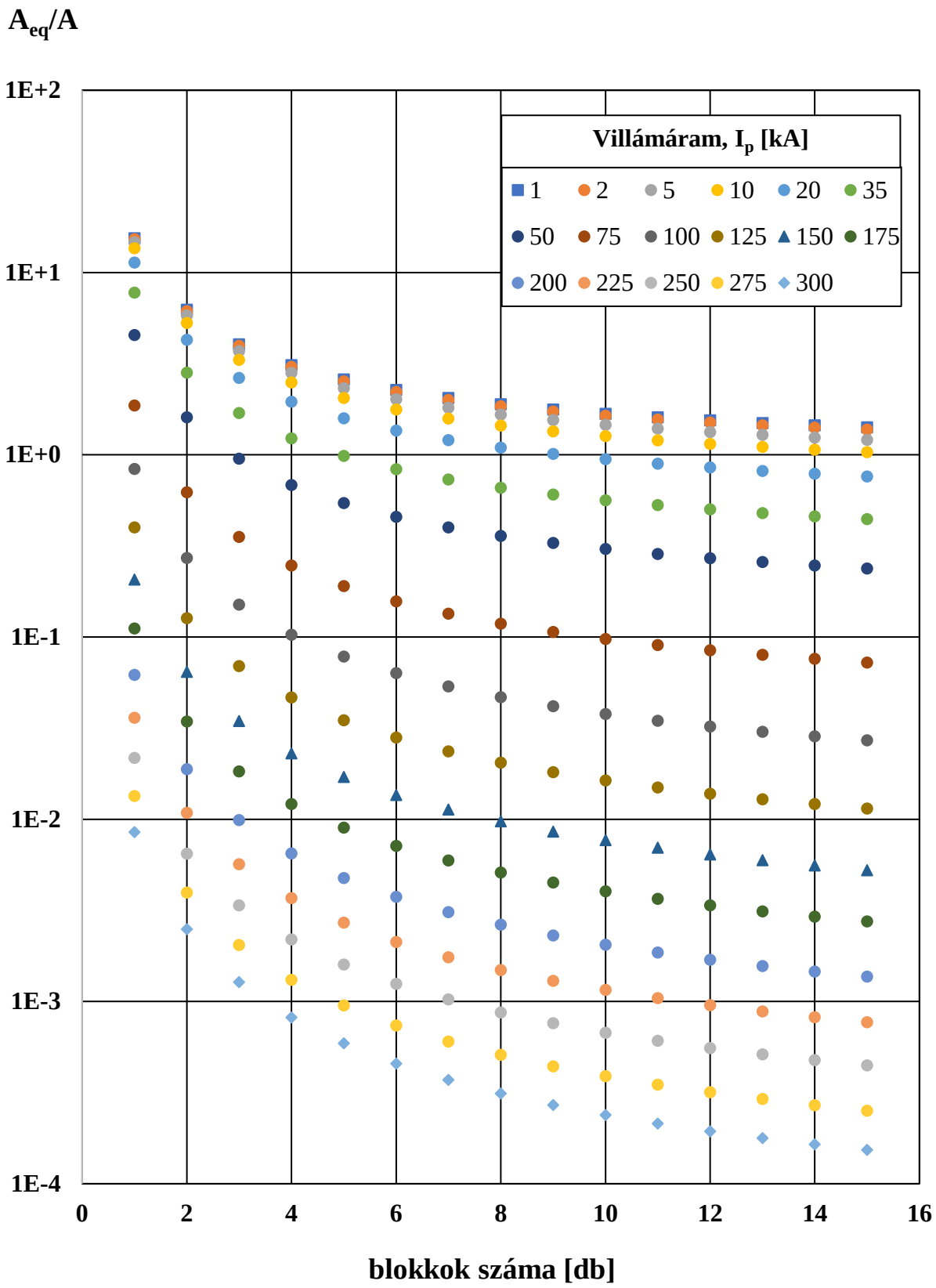
F-23. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra nézve. Az egyenértékű terület a villámáram csúcsértékének előfordulásának függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]**



F-24. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra az egyenértékű terület normált értéke a villámáram csúcsértékének függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]**



F-25. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra az egyenértékű terület a blokkok számának függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]**



F-26. ábra A PMAS számítás eredményei különböző méretű PV parkokra az egyenértékű terület normált értéke a blokkok függvényében **[Zoltán Tóth et al., 2021]**

F-6. Táblázatok

F-3. táblázat A P_{SPD} valószínűség értéke az LPL függvényében, amelyre az SPD-ket tervezték (IEC 62305 - Table B.3 alapján) **[IEC, 2011]**

LPL	P_{SPD}
Nincs koordinált SPD rendszer	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01

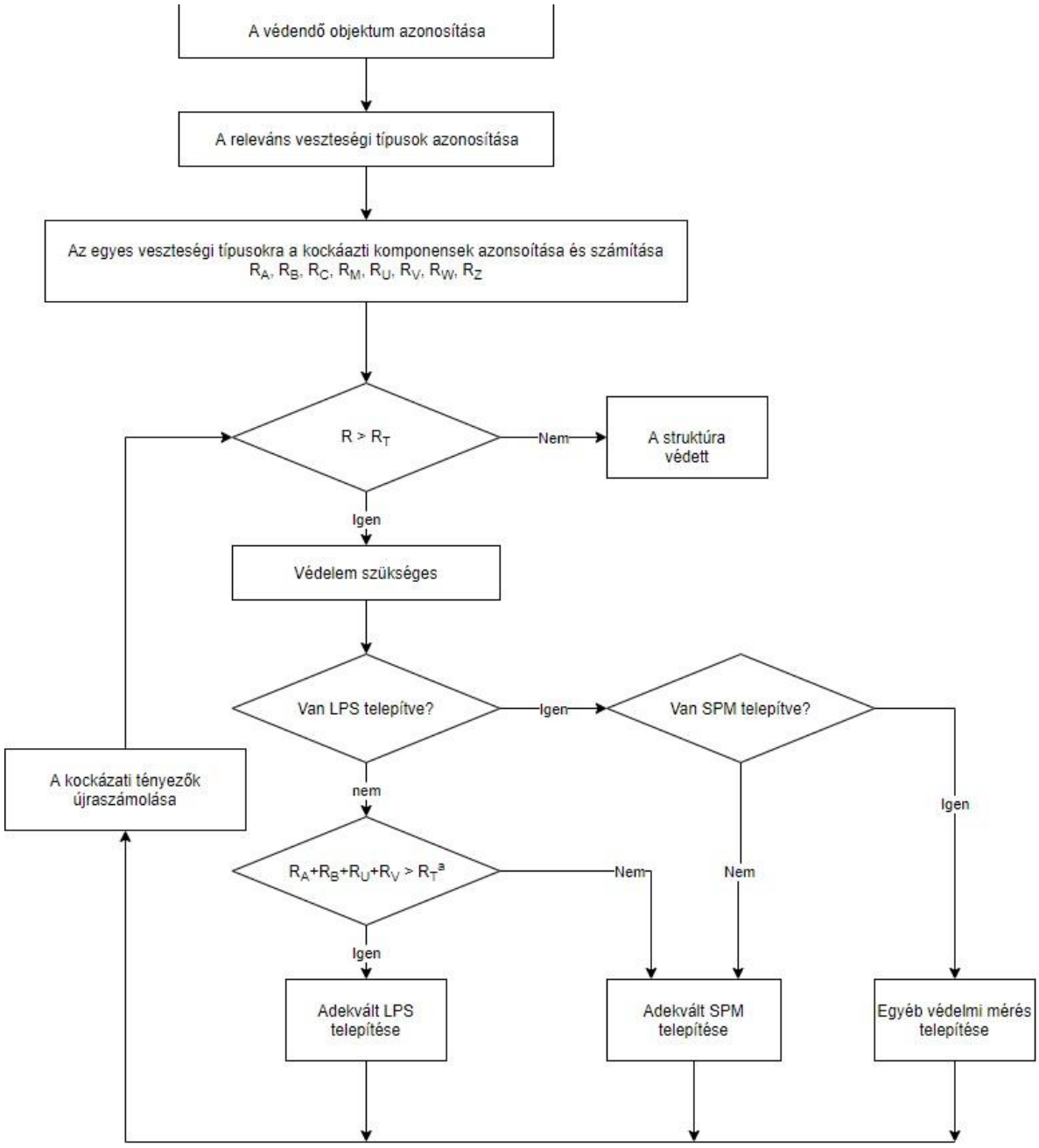
F-4. táblázat A C_{LD} tényezők értékei az árnyékolás, a földelés és az elszigetelés körülményeitől függően (IEC 62305 - Table B.4 alapján) **[IEC, 2011]**

A külső vonal típusa	Csatlakozás a bejáratnál	C_{LD}
Árnyékolatlan légvezeték	Határozatlan	1
Árnyékolatlan földvezeték	Határozatlan	1
Több földelésű semleges távvezeték	-	1
Árnyékolt eltemetett vonal (teljesítmény vagy TLC)	Az árnyékolás nem kapcsolódik ugyanahhoz a rögzítő rúdhoz, mint a berendezés	1
Árnyékolatlan légvezeték (teljesítmény vagy TLC)	Az árnyékolás nem kapcsolódik ugyanahhoz a rögzítő rúdhoz, mint a berendezés	1
Árnyékolatlan földvezeték (teljesítmény vagy TLC)	A védőburok ugyanahhoz a kötőrúdhoz van rögzítve mint az eszközök	1
Árnyékolatlan légvezeték (teljesítmény vagy TLC)	A védőburok ugyanahhoz a kötőrúdhoz van rögzítve mint az eszközök	1
Villámvédő kábel vagy vezeték villámvédő kábelcsatornákban, fémes vezetékekben vagy fémes csövekben	A védőburok ugyanahhoz a kötőrúdhoz van rögzítve mint az eszközök	0
Egyéb további típus	A védőburok ugyanahhoz a kötőrúdhoz van rögzítve mint az eszközök	0

F-5. táblázat A P_B valószínűségi érték, amely függ a fizikai károk csökkentését szolgáló védelmi intézkedésektől (IEC 62305 - Table B.2 alapján) **[IEC, 2011]**

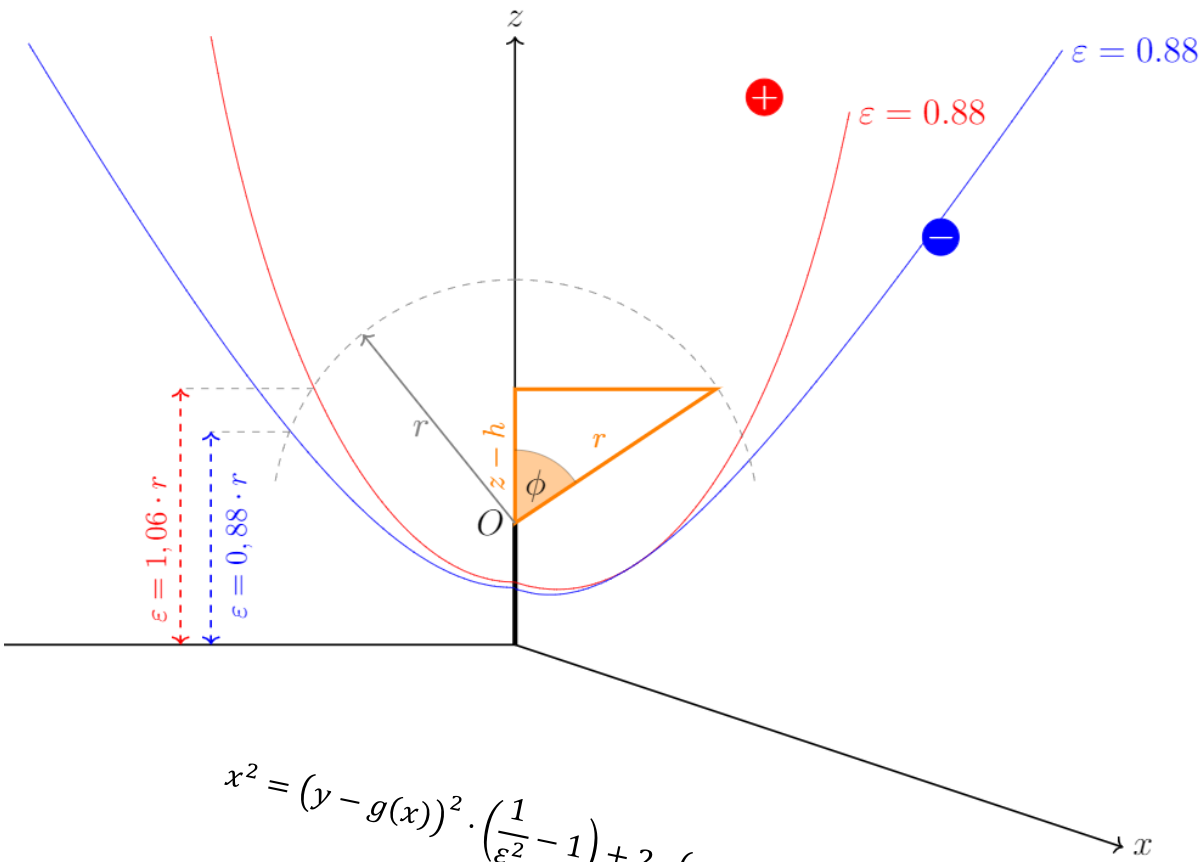
Szerkezet jellemzői	Class of LPS	P_B
Az LPS által nem védett szerkezet	-	1
Az LPS által védett szerkezet	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Az LPS I-nek megfelelő villámvédelmi felfogórendszerrel és folytonos fém- vagy vasbeton vázzal rendelkező szerkezetek, amelyek természetes levezető rendszerként működnek		0,01
Fémtetős és villámvédelmi felfogó rendszerű szerkezetek, esetleg természetes részekkel, a tetőszerkezetek teljes védelmével a közvetlen villámcsapások ellen, valamint a folyamatos fém- vagy vasbetonvázzal, amely természetes levezető rendszerként működik.		0,001

F-7. Ábrák



F-27. ábra Az IEC szabvány folyamatábrája a megfelelő védelmi szint kiválasztásához **[IEC, 2011]**

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



$$x^2 = (y - g(x))^2 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^2} - 1\right) + 2 \cdot (y - g(x)) \cdot H - H^2$$

$$g(x) = \begin{cases} x & ha\ x \leq 0 \\ -\frac{1}{3}x & ha\ x > 0 \end{cases}$$

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamosmérnöki Tudományok Doktori Iskola

2021