



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 téziszfüzet

Tóth Zoltán

Témavezető

Dr. Kiss István
habilitált egyetemi docens

Budapest

2021

Rövidítések jegyzéke

- DEGM**D**ynamic **E**lectro-**G**eometric **M**odel
.....*dinamikus elektro-geometriai modell*
- EGM**E**lectro-**G**eometric **M**odel
.....*elektro-geometriai modell*
- EPH**e**gyenpotenciálú **h**álózat
- HMKE**h**áztartási **m**éretű **k**iserőmű
- 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 **S**hielding **F**ailures
.....*védelmi hibák között eltelt átlagos idő*
- PAM**P**rotection **A**ngle **M**ethod
.....*védőszög módszer*
- PMAS**P**robability-**M**odulated **A**ttaction **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**illamosenergia-**r**endszer

1. fejezet

A téma ismertetése, célkitűzése

A villámcsapások kialakulása, és az okozott veszélyes és káros hatások a kezdetek óta foglalkoztatják az emberiséget. Míg kezdetben az emberek az istenekhez kötötték a villámlást és a mennydörgést, a tudományos kutatás a fizikai hátteret, a kialakulás okait, a védekezés módját és eszközeit vizsgálja.

A villám nem más, mint az Isten nyila (...). És ha már egyenesen a Mindenható fáradoznék azon, hogy célba vegyen minket, akkor úgylis minden hiába. Nem igaz?

Mert az Isten bizonyára kitűnő sportlövész. Ha puskavége akar kapni minket, ha pontosan ide akar csördíteni a villámstorával, hát akkor úgylis elkap.

„Szász 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] Franklin Benjamin 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. [Horváth, 1974]

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 feletti 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 frekvenciáját. [Horváth, 1960, 1991, 1967, 2012b] Megalkotta a *valószínűséggel súlyozott vonzási tér elméletet* (PMAS), és a felfogók elhelyezésének szerkesztésére és ellenőrzésére megkönnyítésére szolgáló *gördülő*

gömb módszert (RSM). A gördülő gömb módszert [Horváth, 1973] elsőként Dr. Horváth Tibor publikálta 1973-ben. A gördülő gömb szerkesztési és ellenőrzési módszer 1962 óta része volt a magyar villámvédelmi szabványnak. A gördülő gömb módszert ma már szerzte a világban a szakirodalomban és a nemzetközi szabványokban is szerepeltetik.

Annak a meghatározására, hogy mekkora valószínűséggel ér villámcsapás egy adott objektumot (kiépített primer villámvédelem esetén a villámvédelmi felfogórendszert vagy a védendő objektumot) egyszerűbb elrendezések esetén a *dinamikus elektro-geometriai modell* (DEGM) szolgál. Összetettebb, nagyobb számítási pontosságot igénylő esetekben erre csak a PMAS, a *valószínűséggel súlyozott vonzási tér elmélet* ad megoldást. [Horváth, 1960, 1991; Horváth et al., 1978]

A PMAS elmélet az adott elrendezés és a vonzási terek (a védendő objektum és a primer villámvédelmi rendszer vonzási terének) viszonyát írja le. 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 (**1-1. ábra**) pozitív polaritású villámcsapás esetén $\varepsilon > 1$, és negatív polaritás esetben $\varepsilon < 1$.

A PMAS elmélet alapja az orientációs pont. Az a pont, ahol a felhőből lefelé haladó előkisülés feje akkor tartózkodik, amikor eldől, hogy hová fog lecsapni. Az orientációs távolság az orientációs pont és a becsapási pont közötti távolság. Ez praktikusan a szokelléssel a föld felé haladó előkisülés utolsó ugrását jelenti. Az orientációs távolság és a villámáram (a villám áramhullámának csúcserője) között többféle összefüggést is felírhatunk, de a kapcsolatot legjobban az **E-1** egyenlet közelíti. Általában ennek egy egyszerűbb formáját használják, amely alacsony objektumok esetén kielégítő. Az összefüggés azt írja le, hogy a nagyobb áramerősségű villámok esetén messzebb dől 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 folytonosan változik. Az egyszerűbb megközelítés szerint a vonzási tér határfelületét a $\beta = 0,5$ értékhez szokás kötni. Az egyszerűsítés eredményeként a vonzási téren belüli térrészt $\beta = 1$, és az azon kívüli térrészt pedig $\beta = 0$ értékkel jellemzik.

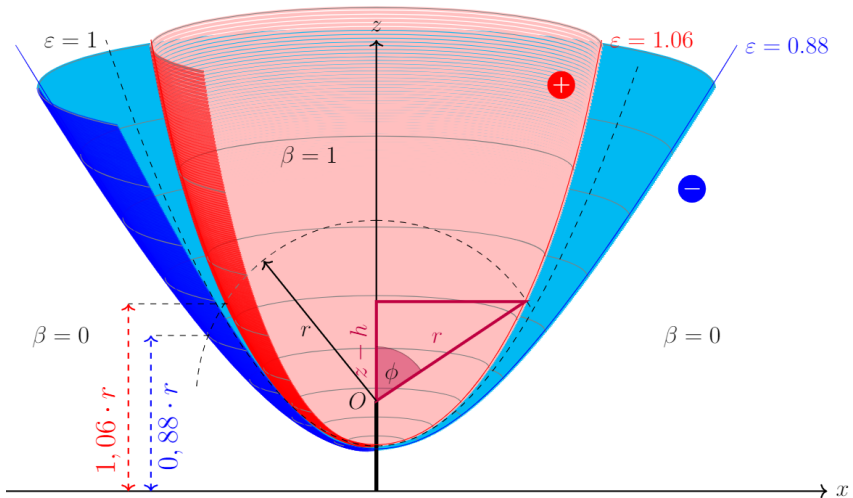
Az **E-2** egyenlet a vonzási térrészre írja le a villámcsapások évenkénti várható számát, míg az **E-3** az adott pontra a dP/dr értéket adja meg, vagyis az orientációs távolságok sűrűségfüggvényét.

$$I/I_m = (r/r_m)^p \quad (\text{E-1})$$

$$N_{Fa} = N_G \int_{V_a} \frac{dP}{dr} dV \quad (\text{E-2})$$

$$\frac{dP}{dr} = \frac{kp}{\sqrt{r\pi}} e^{-\frac{1}{2}k^2 p^2 \ln(r/r_m)^2} \quad (\text{E-3})$$

- 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, $\frac{\text{villámcsapás}}{\text{km}^2 \cdot \text{év}}$
 - N_{Fa} az objektumot (rudat) érő villámcsapások frekvenciája, a rúdba csapó villámok évenkénti száma;
 - I_m a villámáram medián értéke kA-ben;
 - I a villám áram kA-ben.



1-1. ábra A vonzási tér [Horváth, 1991] alapján

A vizsgálatok és a számítások során a célt az volt, hogy igazoljam, hogy a szélerőművek tervezésénél a PMAS elmélet használható a lapátok villámvédelmi felfogórendszerének megtervezéséhez. További célt volt, hogy igazoljam, hogy villámvédelmi szempontból nem elégséges csak szigetelő, illetve vezető részegységek halmazára bontani a vizsgálandó építményt. Fontosnak tartottam, hogy a – hazánkban is egyre jobban terjedő – fotovoltaiikus erőművekre ajánlásokat is megfogalmazzak. Megmutattam, hogy mely körülményeket szükséges figyelembe venni a fotovoltaiikus, nagyteljesítményű erőművek esetében a villámvédelmi rendszer kiépítése során.

2. fejezet

Előzmények

Az utóbbi évtizedekben hazánkban is egyre növekszik a megújuló részaránya a villamosenergia-termelésben. Ezt egyrészt a *háztartási méretű kiserőművek* (HMKE) gyors terjedése, másrészt a nagyobb szereplők, a nagy beépített teljesítményű fotovoltaikus erőművek sorozatos telepítése mutatja. Hazánkban 2012 óta a szél erőművek létesítése indirekt módon tiltott, így azok beépített teljesítménye azóta gyakorlatilag változatlan. Fontos azonban egyrészt a már meglévő erőművek esetében is vizsgálódni, másrészt a tudományos eredményeinket az európai és a nemzetközi közösségekben máshol is felhasználhatják. Ez pedig lényeges lehetőség lehet a hazai kutatás-fejlesztés impaktjának növelésére. Doktori értekezésemben ennek megfelelően nem csak a jelenleg relevánsnak tekinthető témákkal foglalkozom, hanem mindazokkal is, amelyek a közeljövőben ismét nagyobb teret nyerhetnek, illetve a nemzetközi szakmai közösségekben (CIGRÉ, IEC) problémaként jelentkeznek.

A villámvédelmi szabványokban meghatározott számítási módok és megadott értékek, amelyek az alacsony védendő objektumoknál nagy biztonsággal alkalmazhatók, magas építmények esetén (pl. szél erőművek) nem használhatók. [Madsen et al., 2009] Magas, komplex geometriájú építményeknél sem a klasszikus villámvédelmi tervezést segítő módszerek, sem pedig a *dinamikus elektro-geometriai modell* (DEGM) nem alkalmazható, bár egyszerűbb elrendezéseknél ezek jó közelítést adnak. Az összetett feladatokra alkalmasabb, megbízhatóbb és pontosabb eredményeket ad a *valószínűséggel súlyozott vonzási tér elmélet*, PMAS [Horváth, 1960] elmélet. A PMAS elmélet figyelembe veszi többek között a különböző polaritású villámok arányát, illetve a polaritásból származó fizikai különbségeket. A PMAS elmélet előnyeinek igazolása korábban már megkezdődött, de a folyamat még nem zárult le a szakirodalomban.

A megújuló energiát termelő erőművek egy másik típusának, a fotovoltaikus erőműveknek a terjedésével másfajta kérdések merülnek fel. Hipotézisem szerint a fotovoltaikus erőműveknel a primer villámvédelem adott feltételek teljesülése esetén egyes esetekben elhagyható. Ezen erőművek speciális tulajdonságai (a különleges geometria, illetve a környező épített objektumok hatásai) miatt bizonyos esetekben nem szükséges olyan primer villámvédelmet telepíteni, mint azt korábban, egyéb építményekre megállapították.

A disszertáció másik tisztázandó kérdése, hogy a különböző anyagú szerkezetek jelenlétét miként kell figyelembe venni a villámvédelmi kockázatszámítás és a tervezés során. Ez a kérdéskör többek között a szél erőművek tervezése (a magas oszlopokra helyezett nagyméretű szigetelőanyagból készített lapátok kialakítása) során is kiváltképp érdekes tudományos-szakmai, megválaszolendő kérdés. A

szigetelőanyagból készült részek villámvédelmi problémái gyakran jelentkeznek szigetelő tetők villámvédelmének tervezése és megépítése esetén is.

A disszertáció célja a tudományos eredmények összegzésén túl, hogy egy átfogó, egységesítő és tisztázó műként is szolgáljon az olvasója számára a villámvédelem témakörén belül, kitérve mind a magyar, mind pedig az angol nyelvű szakirodalom sokszínű fogalomhasználatára is.

3. fejezet

Kutatási módszerek

Számos rossz gyakorlat lelhető fel, amelyek egyrészt a különböző tervezési módszerek helytelen alkalmazásából, másrészt a különböző elméletek félreértelmezéséből erednek. A disszertációmban ezekre is hozok példát. A leggyakoribb módszertani hiba a *rácsháló módszer* (MM) helytelen, tervezéshez használt alkalmazásai, ahol nem veszik figyelembe, hogy a módszer egy eszköz a megtervezett rendszerek ellenőrzésére, de ellenkező irányban ez nem igaz minden esetben. A másik gyakori hiba az elméletek túlértékelése, vagy kifacsarása. Az elméletek többsége egyszerűsítésekkel él a kezelhetőség okán, vagyis csak adott peremfeltételek mellett alkalmazhatóak. Fontos, hogy az elméletek részállításait nem szabad összemosni egymással, mert azok önmagukban nem tartalmazzak igazságot a másik elméletre nézve.

A kutatómunkám során mind kvantitatív, mind kvalitatív kutatást is végeztem egymás kiegészítéseként.

A kvalitatív kutatás során áttekintettem a fellelhető, és szélesebb körben használatos elméleteket, amelyek ma a nemzetközi szakirodalomban jelen vannak. Egyes téziseimhez analitikus, és numerikus számításokat végeztem, amelyekhez első sorban a PMAS elméletet használtam fel. A laboratóriumi mérések hitelességének vizsgálata céljából a mérések validálására ellenőrző, numerikus szimulációkat használtam.

A kvantitatív módszer keretein belül laboratóriumi méréseket végeztem, hogy az elméleteket igazoljam, vagy lehetővé tegyem az elmélet továbbfejlesztését a mérési eredményekből származó összefüggések alapján.

Eredményeimet hazai és nemzetközi konferenciákon és folyóiratokban publikáltam, szakmai fórumokon adtam elő, illetve védtem meg.

4. fejezet

Tézisek

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

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

Konferenciacikkek

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

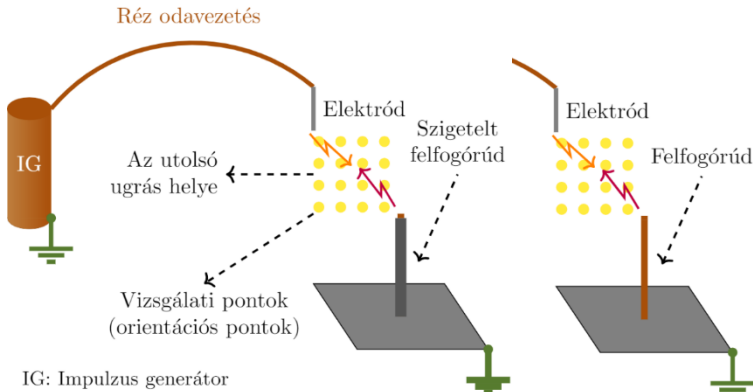
Folyóiratcikkek

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

Következtéseimet korábbi [Horváth, 1991; Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019] mérések és azok eredményei, továbbá az általam [Tóth, Kiss, & Németh, 2019a; 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

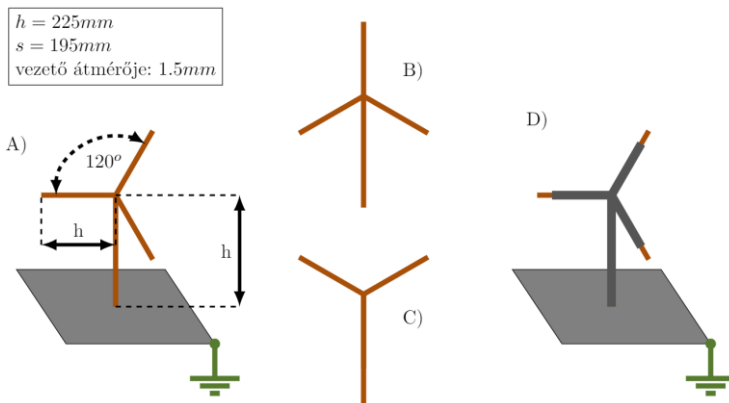
nem foglalkoznak. Ez az adott területen alkalmazható villámvédelmi szabályozások és a gyakorlat eltérését eredményezi. Kísérleteimet a polaritásfüggést figyelembe véve végeztem el az alábbi elrendezésekre:

- egymagában álló felfogó rúdon (4-1. ábra) és
- szélérőmű modellen. (4-2. ábra)



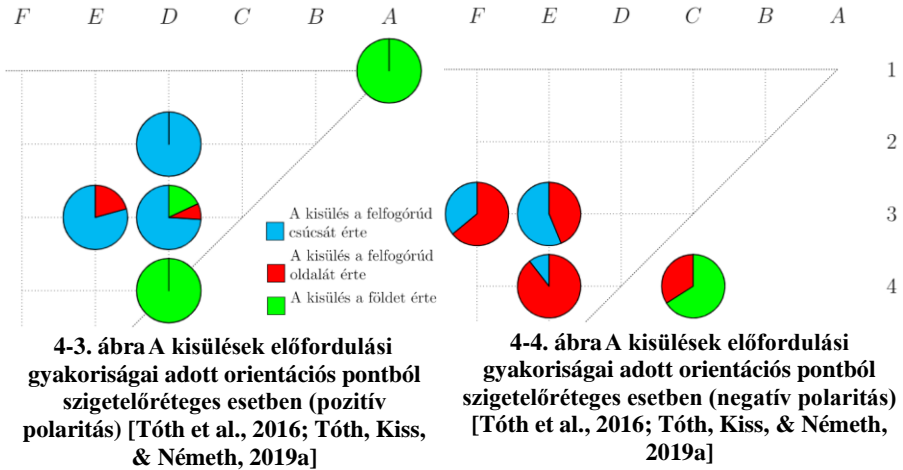
4-1. ábra A mérési elrendezés sematikus ábrája egymagában álló (bal) szigetelt és (jobb) szigetetlen felfogórúd esetében [Tóth et al., 2016; Tóth, Kiss, & Németh, 2019a; Tóth & Kiss, 2017b, 2017c]

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 szélérőmű modellt (4-2. ábra) használtam különböző lapátpozíciót beállítva.



4-2. ábra A mérési elrendezés sematikus ábrája a szélgenerátor modellre, különböző elrendezést (A, B, C) tekintve; D: a szigetelt elrendezés [Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]

A kísérleteimet egymagában álló rúdra is elvégeztem, amely egy önmagában álló, magas objektum vonzási terének meghatározását szolgálta két esetben: szigetelő réteggel és anélkül. Megfigyeltem (**4-3. ábra, 4-4. ábra**), hogy a vonzási tér a rúd mentén jelentősen csökkent, és a föld tere is eltorzult.



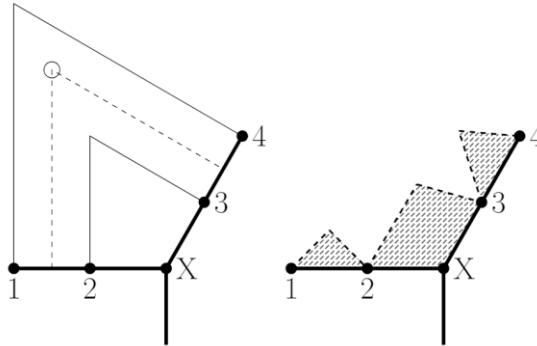
Korábbi méréseket [Birkel et al., 2018; Garolera et al., 2012; Madsen, 2017; Madsen et al., 2009] figyelembe véve végeztem méréseimet a szélerőmű modellre. Kétféle szélturbina modellt hoztam létre a laboratóriumi vizsgálatokhoz. A vonzási tér határfelülete a szigetelőanyagot is figyelembe véve jelentősen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

Megfigyelések [Holboell et al., 2006; 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 kísérletet 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 a **4-5. 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.



4-5. ábra A szélerőmű lapátjai vonzási terének határai (bal) szigetelőréteget figyelembe nem véve; illetve (jobb) a szigetelőréteget figyelembe véve [Tóth & Kiss, 2017a, 2017c]

4-1. táblázat A laboratóriumi mérés eredményei a kétreceptoros szélerőmű modellre [Tóth et al., 2016; Tóth, Kiss, & Németh, 2019a]

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

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 (4-1. táblázat) eredmények között. Ebben az esetben a szigetelt lapátok felületének vonzási tere csökken, amint az a 4-5. 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.

Tézis 2

Valószínűséggel súlyozott vonzási tér elméleten alapuló számítási módszert dolgoztam ki, alacsony magasságú, de nagy alapterületű fotovoltaiikus 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 fotovoltaiikus 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

[Tóth, Kiss, et al., 2017], [Tóth, Kiss, et al., 2020]

Konferenciacikkek

[Tóth, Kiss, et al., 2017], [Tóth, Kiss, et al., 2020]

Folyóiratcikkek

[Tóth et al., 2018], [Tóth, Kiss, Németh, et al., 2021]

A fotovoltaiikus erőművek részaránya évről-évre intenzíven növekszik. Ez megköveteli a fokozott üzembiztonságot. Csak így biztosítható, hogy miközben a villamosenergia-termelésben a PV erőművek részaránya növekszik, a villamosenergia-ellátás biztonsága is növekedjen. A biztonságos üzemelés egyik meghatározó feltétele a fotovoltaiikus erőművek korszerű és gazdaságos villámvédelme. A fotovoltaiikus erőművek esetében, ellenben a szélerőművekkel, a klasszikus villámvédelmi tervezési módszerek 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.

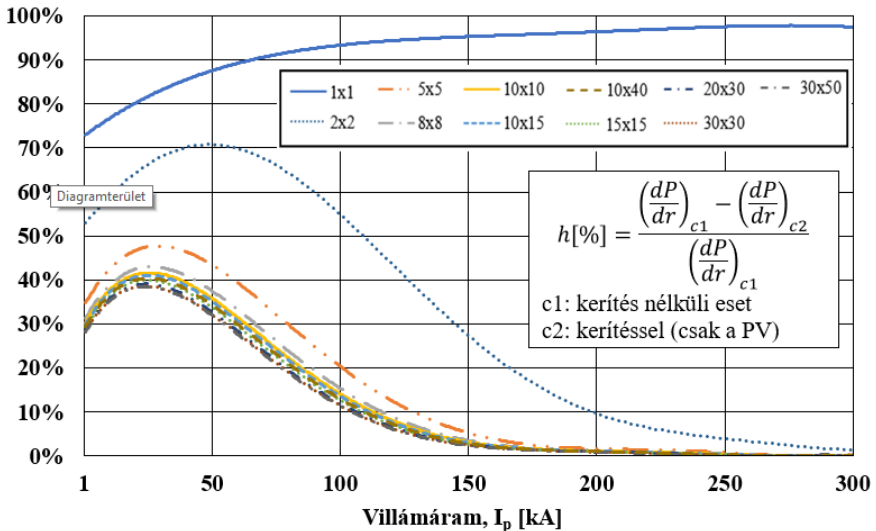
A nemzetközi szakirodalomban az elmúlt években többször találkozhattunk azzal a felvetéssel, hogy gazdasági szempontok alapján elhagyható-e a villámvédelem. [Christodoulou et al., 2016; Hannig et al., 2014; Rousseau et al., 2004] Ebben a témában saját publikáció, és könyvrészlet (folyóiratcikk) is megjelent. [Tóth et al., 2018; Tóth & Kiss, 2017b].

A problémakört több irányból közelíthetjük meg:

- A) mekkora valószínűséggel következik be kár, és annak milyen hatásai lehetnek; [Tóth et al., 2018; 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]

Kutatómunkám 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.



4-6. ábra A PMAS számítás eredményeinek különbsége (PV panelba csapás csökkenése) %-ban különböző méretű PV parkokra nézve a villámáram csúcserőértékének előfordulásának függvényében [Tóth, Kiss, Németh, et al., 2021]

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 vagyónvédelmi kerítést,

és a további vagyonvédelmi elemeket primer villámvédelmi felfogóként kell figyelembe venni. Ezáltal a teljes fotovoltaiikus erőműre a villámcsapások okozta kockázati szint csökkenthető.

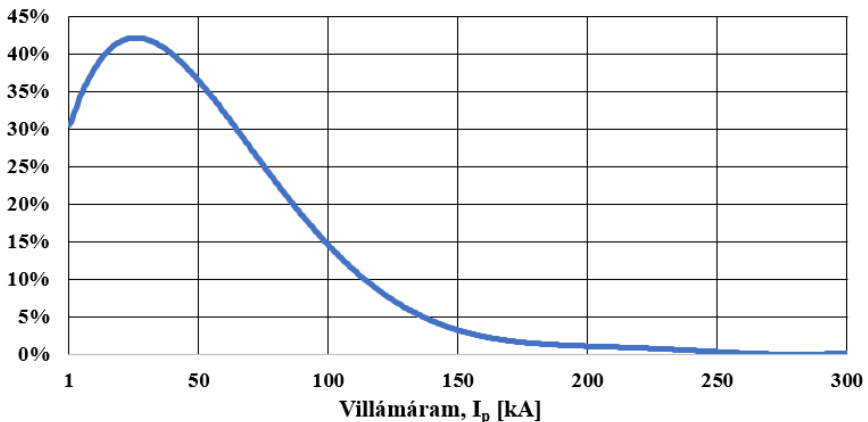
A PMAS számítást az adott, szabályos, ismétlődő elemekből álló napelemes rendszerekre elvégezve egyfajta trendet lehet kiolvasni. A szabványban megtalálható áramértékek, mint határértékek esetében élni kell egyfajta korláttal, ami alatt/felett nem tekintjük az adott osztályba sorolandónak a részértéket.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

$$f = 1/N_G \cdot A_{eq} \left[\frac{\acute{e}v}{\text{villámcsapás}} \right] \geq 10^C \quad (\text{E-4})$$

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

A következőkben **(4-6. 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 **4-7. 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.



4-7. ábra A PMAS számítás eredményeinek, különbségének határértéke [Tóth, Kiss, Németh, et al., 2021]

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 osztállyal 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 vagyonsvédelmi 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.

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

[Tóth, Kiss, & Németh, 2019a], [Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019], [Tóth, Kiss, & Németh, 2019b], [Tóth, Kálec, et al., 2019]

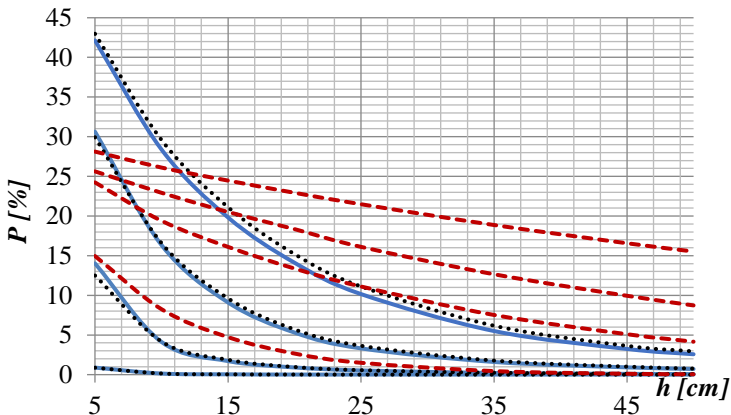
Konferenciacikkek

[Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]

Folyóiratcikkek

[Tóth, Kiss, & Németh, 2019a], [Tóth, Kiss, & Németh, 2019b], [Tóth, Kálec, et al., 2019]

A villámvédelemben a rácshálós módszer főleg a lapostetős szerkezeteknél terjedt el. Korábban abból a feltételezésből indultak ki, hogy a rácsháló egy Faradaykalitkaszerű 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 egyenpotenciálra hozó 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) 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 lehülésének idejétől függően – meghatározza a villámvédelmi felfogó háló magasságát.



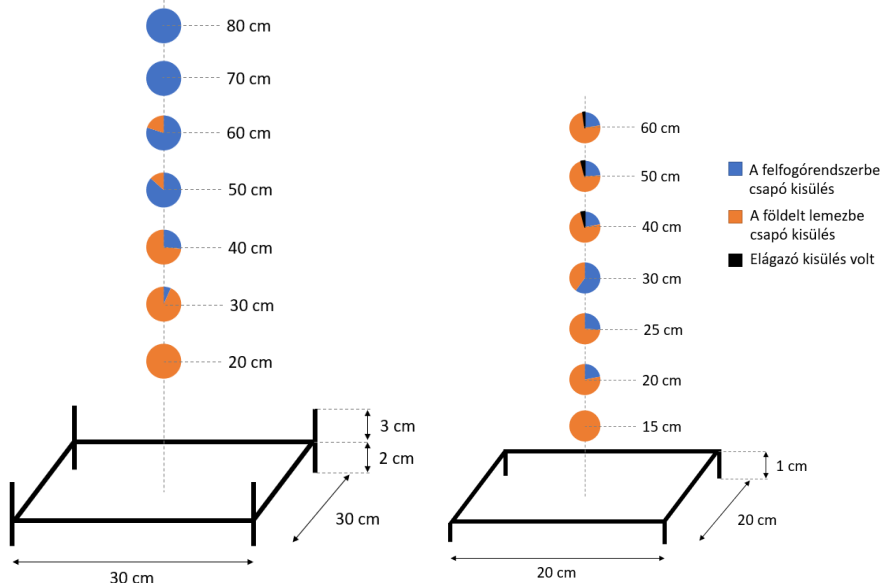
4-8. ábra A 40 m × 40 m-es rácshálóra végzett számítások eredményei [Tóth, Kálcz, et al., 2019; Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]

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 felfogóháló jó működtek.

A fenti ábrán (4-8. 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 [Tóth, Kálcz, et al., 2019; 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 (4-8. 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.



4-9. ábra A rácshálókon végzett laboratóriumi mérések eredményei [Tóth, Kálcz, et al., 2020; Tóth, Kiss, Németh, et al., 2019]

A fent említett hatás szemléltetésére laboratóriumi mérést végeztem egy villámvédelmi felfogórendszer segítségével, amely négy vezetőt tartalmazott egy négyzet oldalain (ld. 4-9. ábra jobb), és másik esetben négy felfogórúd a csúcsain (ld. 4-9. ábra bal).

A különböző struktúrákban a várható kisülések száma nem csak a geometriai elrendezéstől függ. A tervezési folyamatban hasznos, ha a villámvédelmi felfogrendszer 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 tette, 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.

Válogatott hivatkozások

- Birkel, J., Plumer, J. A., Madsen, S. F., & Montanya, J. (2018). Lightning Protection of Wind Turbines. 34th International Conference on Lightning Protection, 0–5.
- 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>
- 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>
- 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>
- Holboell, J., Madsen, S. F., Henriksen, M., Bertelsen, K., & Erichsen, H. V. (2006). 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.
- Horváth, T. (1960). Villámhárítók védőhatásának vizsgálata kismintán (Investigation of the protective effect of lightning rods on a small sample).
- 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. (1991). Computation of lightning protection. In *Cargese Lectures in Physics*. John Wiley & Sons Inc.
- 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., & Pankasz, L. (1978). Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten von Nahe- und Seiteneinschläge bei Fernsehturm Moskau durch Modellversuche. 13. Internationale Blitzschutzkonferenz.
- IEC. (2011). IEC/EN 62305:2011 - Lightning Protection.
- 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., & 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).
- 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.
- 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>
- 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., Kálec, 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., Kálec, 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 Lightning 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., Kálec, 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., & Berta, I. (2021). Lightning Protection of High-Performance Photovoltaic Power Plants. Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science.
- Tóth, Z., Kiss, I., Németh, B., & Szedeník, 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.